

Pedro Gonçalves

2º Ciclo de Estudos em Sistemas de Informação Geográficos e Ordenamento
do Território

A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça – modelação hidráulica
para duas áreas do concelho de Matosinhos

2012

Orientador: Professor Doutor António Alberto Gomes

Classificação final:

Dissertação:

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado, só foi possível de ser realizada com o inestimável contributo de algumas pessoas e instituições às quais não se poderia deixar de atestar o devido contributo.

Ao meu orientador, Professor Doutor Alberto Gomes, pela preciosa orientação, contribuições e disponibilidade, por toda a ajuda prestada no decurso da validação e trabalho de campo, partilha de conhecimento, revisão, reestruturação, rigor científico e exigência que contribuíram para a realização da presente dissertação

Ao Professor Doutor Carlos Bateira e Professora Doutora Laura Soares, pela preocupação e sugestões que se revelaram decisivas para a realização da presente dissertação.

Aos técnicos da Câmara Municipal de Matosinhos que forneceram a planimetria do concelho à Mapoteca da Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

Ao Carlos Delgado e António Costa, pela partilha de experiencias, sugestões e palavras de incentivo.

Á Inês Marafuz, pela amizade e inestimável contributo prestado em todas as fases de realização da presente dissertação.

Ao António Pereira por toda a ajuda prestada no decurso da presente dissertação, companheirismo e amizade. Por todas as trocas de ideias, disponibilidade e sugestões que contribuíram para uma maior objetividade e leitura da cartografia apresentada.

Ao Hugo Baptista, pelo companheirismo e amizade. Por me ter acompanhado e ajudado na reta final do trabalho.

Ao Luciano Martins, pela ajuda e esclarecimentos de dúvidas relativamente à operacionalidade do *software* HEC-RAS.

Á Luciana Barbosa, pela amizade e ajuda prestada na correção e tradução do *abstract* da dissertação.

Ao Sr. David e D.^a Ana, pela disponibilidade em abrir as portas de sua casa, permitido efetuar medições cruciais para validação dos resultados. Agradeço ainda a disponibilidade e cedência de fotografias, um contributo inestimável para a validação dos resultados apresentados.

Aos Bombeiros Voluntários de Leça do Balio, mais concretamente ao Sr. Comandante Artur Dias pelos contactos, disponibilidade e ajuda prestada na validação dos resultados obtidos e identificação dos pontos críticos.

A todos os meus amigos pela amizade e apoio, e sobretudo ao António Araújo e Rui Pires que contribuíram para a valorização da presente dissertação.

À minha família e particularmente aos meus pais, irmãos e tias, por toda a ajuda e apoio incondicional, pela paciência, por todos os sacrifícios e pelo contínuo incentivo, motivação e carinho.

À Joana, agradeço os estímulos e incentivos constantes, a dedicação, paciência e compreensão.

A todos estes e a muitos outros, dedico esta dissertação e expresso a minha gratidão.

RESUMO

A presente dissertação apresenta dois casos de estudo referentes ao município de Matosinhos, onde se efetua a modelação hidráulica necessária à delimitação de perímetros de inundação no rio Leça, considerando três períodos de retorno (10, 50 e 100 anos).

A aplicação de modelos hidráulicos de cálculo na delimitação de perímetros de inundação, acarretou invariavelmente, pesquisa aprofundada sobre o *software* adequado para trabalhar o problema, recaindo a escolha na aplicação HEC-RAS para atingir os objetivos propostos. Este *software*, de forma relativamente simples, permite a criação dos dados necessários à modelação e comparativamente a modelos mais sofisticados é assumido por vários autores (Horritt and Bates 2002, Hicks and Peacock 2005) que a precisão dos resultados é maior.

A aplicação da modelação hidráulica proposta compreende três fases distintas: a primeira envolve a criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) que serviu de base para a aquisição de elementos geométricos do vale/planície aluvial/canal. A segunda fase está associada à obtenção de dados, quer geométricos, quer do escoamento, recorrendo-se a duas fórmulas distintas: a fórmula cinemática de *Giandotti* (Giandotti 1953) e a fórmula estatística de Loureiro (Loureiro 1984).

Com aplicação dos valores de caudal, calculados com estas fórmulas diferentes, obtiveram-se perímetros de inundação. Nesta terceira fase, os resultados obtidos serão confrontados com os dados recolhidos no campo, e sujeitos a uma validação face aos dados colhidos para a cheia centenária de Março de 2001.

Durante o processo de validação foi construída uma ficha de inventário, que reúne todas as informações obtidas, quer através de registos informais, notícias de jornal, relatos dos moradores e bombeiros que atuam sobre as áreas de estudo, assim como, as observações feitas no local e os resultados provenientes da modelação.

No processo de validação verificaram-se algumas inconsistências entre a cartografia de base usada e a realidade, e desta forma decidiu-se proceder à correção da cartografia de base e gerar novos MDT, de forma a gerar resultados mais fiáveis.

A solução proposta passou por efetuar medições no campo com auxílio de um distanciómetro e corrigir as curvas de nível, para desta forma ser possível criar novos

ficheiros TIN¹, utilizando-se novamente os mesmos ficheiros geométricos e de escoamento criados anteriormente, para o cálculo de novos resultados com base nos MDT corrigidos.

Sabendo-se da importância que a delimitação de perímetros de inundação tem no ordenamento do território, assim como no quadro legislativo que regula esta temática, efetuou-se um esboço de uma carta de zonas inundáveis para uma área de risco. Nesta, foram incluídos os elementos considerados fundamentais, considerando o que é descrito no enquadramento legislativo, assim como outros elementos considerados pertinentes para uma correta análise dos perímetros modelados, assim como, os elementos estruturantes do território.

Palavras-chave: Cheias progressivas, modelação hidráulica, perímetros de inundação, altura da coluna de água, ordenamento do território.

¹ *Triangulated Irregular Network* ou RIT, Rede Irregular de Triângulos.

ABSTRACT

This essay presents two case-studies in the Matosinhos municipality, where the necessary hydraulic modeling is performed in order to determine the flood prone areas around Leça river, considering three return periods (10, 50 and 100 years).

The application of hydraulic models for calculating the flood prone areas led to a deep research on the appropriate software to work the problem, resulting in the choice of HEC-RAS to achieve the proposed objectives. This software, in a relatively simple way, allows the creation of data needed for modeling, and when compared to more sophisticated models it is assumed by many authors (Horritt & Bates 2002; Hicks & Peacock 2005) that the accuracy of the results is higher.

The application of the hydraulic modeling proposal comprises three distinct phases: the first involves the creation of a Digital Terrain Model (DTM), which formed the basis for the acquisition of geometric elements from the valley / floodplain / channel. The second phase consists in obtaining data, either geometric or flow, resorting to two different formulas: the cinematic Giandotti formula (Giandotti 1953) and the statistical formula of Loureiro (Loureiro 1984).

Applying flow rates, calculated with these different formulas, flooding perimeters were obtained. In this third phase, the results were compared with data collected in the field and then subjected to validation against the data collected from the centennial flood of March 2001.

During the validation process, an inventory sheet was created, gathering all the information obtained, either through informal records, newspaper articles, reports of residents and fire-fighters who work on areas of study, as well as the observations made on site and the results arising from modeling.

In the validation process there were some inconsistencies between the base maps used, so it was decided to proceed with the correction of cartographic database and generate new DTM 's in order to generate more reliable results.

The proposed solution included taking measurements in the field, with the aid of a rangefinder, and correct the contour lines, in order to enable the creation of new TIN files, again using the same geometry and flow files created previously for the calculating new results based on corrected DTM.

Knowing the importance that the delineation of flood perimeters has in land management, as well as the legislative framework that governs this issue, we performed

a sketch of flood prone areas to an area of risk. Here we included the elements considered essential, bearing in mind what is described in the legislative framework, as well as other factors deemed relevant for a correct analysis of the modelled perimeters, as well as the structural elements of the area.

Keywords: Progressive floods, hydraulic modelling, flood prone areas, height of water column, land management.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Registos históricos de cheias no rio Leça	16
1.3 Área de estudo	18
1.4 Estrutura do trabalho.....	21
1.5 Conceitos de base sobre cheias.....	22
1.6 Efeitos das cheias.....	31
2. METODOLOGIA	37
2.1. Reflexão metodológica prévia	37
2.2. Metodologia HEC-RAS	55
2.2.1. Pré-Processamento dos dados.....	55
2.2.2. Delimitação da bacia hidrográfica	57
2.2.3 Modelo Hidráulico.....	59
2.4 Aquisição de dados.....	61
2.5 Tratamento e Pré-processamento dos dados.....	62
2.6 Processamento dos dados e representação da informação.....	69
3. RESULTADOS	75
3.1. Resultados Iniciais	76
3.2. Validação	83
3.3. Correção do MDT	95
3.4. Resultados Finais	100
4. CONCLUSÕES.....	107
4.1. Vantagens e limitações na modelação da planície de inundação no concelho de Matosinhos.....	107
4.2. Perímetros de inundação e Ordenamento do Território	109
5. BIBLIOGRAFIA.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Cheias registadas no rio Leça.	16
Figura 2 - Cheias no sector terminal da bacia hidrográfica do rio Leça, na situação anterior à construção e aprofundamento do estuário do Leça.	17
Figura 3 - Foz do rio Leça, perspetiva Porto de Leixões. Figura A - Actualidade, Figura B – 1955.	18
Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do rio Leça (B), hipsometria e rede hidrográfica (A).	19
Figura 5 – Perfil longitudinal do rio Leça e áreas de estudo modeladas.	19
Figura 6 – Localização das áreas de estudo abordadas neste trabalho.	20
Figura 7 - Fluxo de Trabalho.	22
Figura 8 – Leitos que se podem definir na planície aluvial.	24
Figura 9 – Ciclo da água.	25
Figura 10 - Interceção entre o rio e as águas subterrâneas. A – Águas subterrâneas contribuem para a alimentação do canal; B – A água do canal infiltra contribuindo para a alimentação das águas subterrâneas.	26
Figura 11 – A - Padrão de drenagem predominantemente paralelo; B – Padrão de drenagem dentítrico.	28
Figura 12 - Hidrograma.	29
Figura 13 - Perímetros de inundação para diferentes períodos de retorno, assim como a altura da coluna de água para cada período considerado.	30
Figura 14 - Distribuição espacial e número de ocorrências por país (1974 a 2003).	31
Figura 15 - Número de desastres naturais reportados entre 1900 e 2010.	32
Figura 16 - Número de cheias reportadas (por tipo) entre 1900 – 2010.	32
Figura 17 - Parte do Modelo Utilizado para Extração da Informação Linear da Cartografia Municipal de Matosinhos.	56
Figura 18 - Esquema Metodológico Seguido na delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Leça.	58
Figura 19 -Esquema Metodológico de Aplicação do Método Hidráulico.	60
Figura 20 - Perfil transversal criado no <i>software</i> Hec-GeoRas.	64
Figura 21 - Variáveis que compõe o modelo hidráulico.	68
Figura 22 - Exemplo de uma ponte, modelada no HEC-RAS.	70
Figura 23 - Exemplo de um ficheiro de geometria utilizado na modelação hidráulica.	71
Figura 24 - Erros, avisos e notas gerados pelo <i>Hec-Ras</i>	73
Figura 25 - Exportação de dados para ambiente SIG.	73
Figura 26 – Esquema metodológico seguido para a obtenção dos resultados.	75
Figura 27 - Sector de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de <i>Giandotti</i>	79
Figura 28 - Sector de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal calculados com base na fórmula estatística de Loureiro.	79
Figura 29- - Sector de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de <i>Giandotti</i>	82
Figura 30 - Sector de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal calculados com base na fórmula estatística de Loureiro.	83
Figura 31 – Limite do sector – Santa Cruz do Bispo e localização dos locais onde se efetuou trabalho de campo/entrevistas aos moradores.	84

Figura 32 - Limite do sector – Leça do Balio e localização dos locais onde se efetuou trabalho de campo/entrevistas aos moradores.	84
Figura 33 - Parte gráfica da ficha de inventário aplicada em Leça do balio, mais concretamente no sector da ponte de Ronfes.	87
Figura 34 - Leça do Balio, sector da ponte de Ronfes – Pormenor.	89
Figura 35 – Sector da Ponte do Carro. Elementos do Sector: A – Moinho e Residências Afetadas, B – Ponte do Carro, C – Ponte de Madeira, D- Pormenor da habitação afetada.	90
Figura 36 - Santa Cruz do Bispo, sector da ponte do Carro – Pormenor.	91
Figura 37 – Medições efetuadas à possível altura da coluna de água no moinho localizado no sector da Ponte do Carro em Santa Cruz do Bispo.	92
Figura 38 - Perímetros de inundação, para três períodos de retorno (2, 10 e 100 anos), em dois sectores do rio Leça.	93
Figura 39 - Diferenças observadas entre a cartografia e os dados de campo, no sector da rua da Pinguela, em Santa Cruz do Bispo.	95
Figura 40 – Pormenor do sector da rua da Pinguela na área de estudo de Santa Cruz do Bispo.	96
Figura 41 - Exemplo de correções efetuadas no MDT de Base e fluxo de trabalho da correção do modelo.	98
Figura 42 - Exemplo de pontes incorporadas no modelo hidráulico.	99
Figura 43 – Resultados finais obtidos para o sector da Rua das Carvalhas, exemplo de uma das pontes.	100
Figura 44 – Resultados finais para a área de estudo de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de <i>Giandotti</i>	101
Figura 45 – Área de estudo de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de <i>Giandotti</i>	102
Figura 46 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da rua da Pinguela.	103
Figura 47 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector do Monte de S. Brás.	103
Figura 48 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da prisão de Santa Cruz do Bispo.	104
Figura 49 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da Ponte do Carro.	104
Figura 50 - Ponte do Carro, altura e velocidade da água. Simulação de uma cheia centenária, com base no MDT alterado.	105
Figura 51 - Áreas de acumulação de sedimentos e erosão nas margens do rio Leça, visíveis após a cheia centenária de março de 2001.	111
Figura 52 - Ponte mais recente no sector da rua das Carvalhas (15/08/2012) – Exemplo de áreas de deposição e erosão.	112
Figura 53- Carta de zonas inundáveis para uma área de risco - exemplo para o sector da rua da Pinguela.	113
Figura 54- Delimitação de zonas de risco, através de períodos de retorno com a aplicação no Ordenamento do Território.	116

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Tipo de evento, datas, número de óbitos, número de pessoas afetadas e dano por tipo de evento.	33
Tabela 2 - Sumário de ocorrência de cheias em Portugal.....	34
Tabela 3 - Classificação geral do dano de cheia	34
Tabela 4 - Algumas fórmulas empíricas utilizadas no cálculo de caudais de ponta de cheia.....	40
Tabela 5 - Algumas fórmulas mais utilizadas para o cálculo do tempo de concentração.	44
Tabela 6 – Algumas fórmulas cinemáticas mais utilizadas para o cálculo do caudal de ponta de cheia.	45
Tabela 7 – Fórmula de distribuição de probabilidade de <i>Gumbel</i>	46
Tabela 8 - Parâmetros regionais da Fórmula de Loureiro.	47
Tabela 9 - Valores de Z, conforme a zona e valores de C consoante o período de retorno, para a fórmula estatística de Loureiro.	47
Tabela 10 - Parâmetros hidráulicos e sua descrição, fórmulas e bibliografia.	49
Tabela 11- Elementos geométricos, tipo de implementação e obrigatoriedade.	52
Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do método convencional comparativamente ao método Hidrológico-Hidráulico.	54
Tabela 13 - Dados de Base, para Construção dos Modelos Digitais de Terreno.	55
Tabela 14 - Valores de rugosidade de <i>Manning</i> utilizados.	67
Tabela 15 - Caudais de ponta de cheia para a bacia hidrográfica do rio Leça.	69
Tabela 16 -Caudais utilizados para o cálculo dos perímetros de inundação nos sectores modelados.....	69
Tabela 17 - Dados geométricos do canal e das secções transversais.....	71
Tabela 18 – Fórmulas resolvidas pelo <i>software</i> para determinar a altura da coluna de água.....	72
Tabela 19 - Resultados obtidos.....	74
Tabela 20 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores adotados da fórmula cinemática de <i>Giandotti</i> , para o sector de Leça do Balio.....	77
Tabela 21 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores calculados da fórmula estatística de Loureiro, para o sector de Leça do Balio.....	77
Tabela 22 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores adotados da fórmula cinemática de <i>Giandotti</i> , para o sector de Santa Cruz do Bispo.	82
Tabela 23 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores calculados da fórmula estatística de Loureiro, para o sector de Santa Cruz do Bispo.	82
Tabela 24 - Exemplo da parte tabular de uma ficha de inventário, realizado em Leça do Balio, mais concretamente no sector da ponte de Ronfes.	86
Tabela 25 - Erro médio quadrado e número de pontos de controlo utilizados para a georreferenciação dos resultados obtidos em trabalhos anteriores.....	93

Tabela 26 – Área calculada e variação da área em percentagem para os resultados preliminares obtidos neste trabalho comparativamente a trabalhos anteriores.	94
Tabela 27 – Diferenças registadas, para diferentes periodos de retorno, na área afectada pela cheia, assim como a altura da coluna de água para as duas áreas de estudo.	106
Tabela 28 – Diferenças observadas, entre os resultados iniciais e finais, na área afetada e altura da coluna de água, para três períodos de retorno, para as duas áreas de estudo.....	106
Tabela 29 - Percentagem de área ocupada, no sector da Rua da Pinguela, por cheias com recorrência de 10, 50 e 100 anos.	115

1. INTRODUÇÃO

As cheias são eventos naturais e de difícil previsão, principalmente no caso das cheias rápidas (*flash floods*), assumindo diversos impactos a nível social, económico e humano (perdas humanas). No entanto, as cheias progressivas são uma exceção a essa regra, em virtude de poderem ser previstas (Marafuz 2011). Este facto possibilita, em parte, atuar sobre a sua ocorrência e tentar mitigar os seus efeitos, quer através de restrições à edificação (promovendo uma correta ocupação do solo), quer através de obras hidráulicas (regulação de caudal, regularização do leito e consolidação das margens com muros, diques, entre outras ações).

Em Portugal, existe um abrangente quadro legislativo, visando que *para cada região hidrográfica ou unidade de gestão que venha a ser definida, será avaliado o risco de inundação e as respetivas medidas suplementares para a sua mitigação* (Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro). O Decreto-Lei n.º 93/90, revisto pelo Decreto-Lei n.º 166/2008 impõe que na Reserva Ecológica Nacional, criada ao abrigo do Decreto-Lei n.º 321/83, de 5 de Julho, sejam incluídas áreas em risco passíveis de serem afetadas por cheias, sendo esta uma medida preventiva, dado que estas áreas estão incluídas na REN, nomeadamente, prevendo que sejam constituídas áreas livres de edificações, as quais funcionarão como uma restrição na utilidade pública. O Decreto-Lei n.º 364/98 de 21 de Novembro veio obrigar os municípios a elaborar cartas de zonas inundáveis devendo, para tal, ter registos de cheias que atingiram os aglomerados urbanos, no mínimo, desde o ano de 1967, para posteriormente delimitarem perímetros de inundação e *definirem restrições à edificação*.

O Decreto-Lei n.º 54/2005 de 24 de Novembro faz também referência a áreas ameaçadas por cheias, assim como às suas zonas adjacentes, sendo que o artigo n.º. 24, mais concretamente a alínea 2 refere que uma zona é considerada adjacente caso *corresponda à linha alcançada pela maior cheia, com período de retorno de 100 anos, ou à maior linha conhecida (...)*. O artigo n.º 26 do Decreto-Lei referido menciona que *nas zonas adjacentes pode o diploma que procede à classificação definir áreas de ocupação edificada proibida e ou áreas de ocupação condicionada (...)*. A alínea 6 do artigo 24 ainda implica que *as cotas dos pisos inferiores dos edifícios construídos em áreas referidas (...) devem ser sempre superiores às cotas previstas para a cheia com período de retorno de 100 anos*.

Por outro lado, o Decreto-Lei n.º 115-2010 de 22 de Outubro, prevê que *os procedimentos de elaboração ou revisão dos planos municipais de ordenamento do território (...) cumpram o disposto no quadro legal atualmente em vigor, para efeitos da delimitação das zonas inundáveis, das zonas ameaçadas pelas cheias e zonas ameaçadas pelo mar.*

A União Europeia também criou um instrumento que visa desenvolver *um quadro de ação comunitária para a proteção de águas de superfície interiores, de águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas (...)*, - a Diretiva-Quadro Água (DQA) de 22 de Dezembro de 2000 - que propõe um correto aproveitamento dos recursos hídricos assim como a sua salvaguarda e proteção e também a mitigação dos efeitos de inundações e secas.

Tendo em consideração o referido anteriormente e tendo em conta que anualmente milhares de pessoas são afetadas de alguma forma pelos seus efeitos, pode-se afirmar que o estudo das cheias e a delimitação dos seus perímetros de inundação é de extrema importância, para assim ser possível a salvaguarda dos bens e vidas das populações.

Os Sistemas de Informação Geográfica (*SIG*), juntamente com metodologias de trabalho adequadas, podem ser uma mais-valia neste campo na medida em que permitem a gestão de informação de forma eficaz, assim como o cálculo complexo de variáveis e a implementação de forma relativamente simples de metodologias corretas para a delimitação de perímetros de inundação. O processo célere de criação e manipulação de informação possibilita a conceção de cartografia fundamental, que pode ser usada no ordenamento do território, dando uma visão única e atempada sobre o fenómeno e a sua extensão, permitindo uma melhoria significativa na qualidade de serviços prestados à comunidade.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a geração de cartografia detalhada, recorrendo a modelos hidráulicos semiautomáticos de cálculo, relativa à delimitação de perímetros de inundação em dois segmentos distintos do Rio Leça – concelho de Matosinhos, considerando três períodos de retorno, 10, 50 e 100 anos.

Com este trabalho pretendeu-se, por um lado, desenvolver o conhecimento técnico e de campo na compreensão da modelação de cheias e por outro consolidar os conceitos e processos hidráulicos inerentes ao tema proposto, culminando com a modelação de cheias para as duas áreas de estudo.

Para a execução da nossa proposta foi necessário dominar o *software HEC-RAS*, assim como, as duas vertentes em que este apresenta, *i.e.*, a criação de um ficheiro geométrico detalhado e o cálculo dos valores de caudais de ponta de cheia.

Relativamente aos caudais de ponta de cheia, pensou-se fazer uma comparação entre a fórmula de Loureiro, muito usada em Portugal Continental e adotar os valores de caudais estabelecidos no trabalho de Velhas (1991), calculados com base na fórmula de *Giandotti*. Com isto, pretendeu-se verificar qual das fórmulas é a mais indicada para o cálculo de caudais de ponta de cheia na bacia hidrográfica do rio Leça. De forma a validar a aptidão de cada uma das fórmulas, os resultados serão confrontados com os registos observados no terreno, nomeadamente através da comparação de valores da altura da coluna de água e extensões dos perímetros de inundação confirmados pelas marcas de cheia e informações fornecidas pela população ribeirinha e pelos bombeiros locais, registos fotográficos de episódios de cheia e notícias de jornais locais.

Pretendendo-se verificar o modo como os dados do MDT de base influenciam os resultados obtidos, utilizou-se os dados em “bruto” para o cálculo dos perímetros de inundação e alturas da coluna de água. De seguida, depois de incluir os elementos que se consideram pertinentes nomeadamente muros, edifícios, etc., com base em medições efetuadas através de trabalho de campo, assim como a correção das curvas de nível, serão gerados novos resultados comparando-os com os anteriores.

Por fim, espera-se dar um contributo para o ordenamento do território, através da construção de uma carta de zonas inundáveis para uma área de risco. O contributo será enquadrado no atual quadro legislativo, apresentando a referida carta e outros elementos de terreno que se consideram importantes.

1.2 Registos históricos de cheias no rio Leça

O estudo de eventos passados, relativamente às cheias, permite ter uma melhor noção da distribuição espacial das mesmas, assim como da sua recorrência.

A figura 1 mostra as datas de algumas cheias progressivas registadas no rio Leça, sendo a sua maioria correspondente ao sector mais terminal da bacia hidrográfica. A figura foi construída com base em registos históricos dos jornais a que conseguimos aceder, nomeadamente o Jornal de Notícias, Jornal de Matosinhos e o Comércio do Porto e também numa dissertação de mestrado que cataloga eventos Hidro-Geomorfológicos, assinalando alguns eventos na área de estudo (Quaresma 2008).

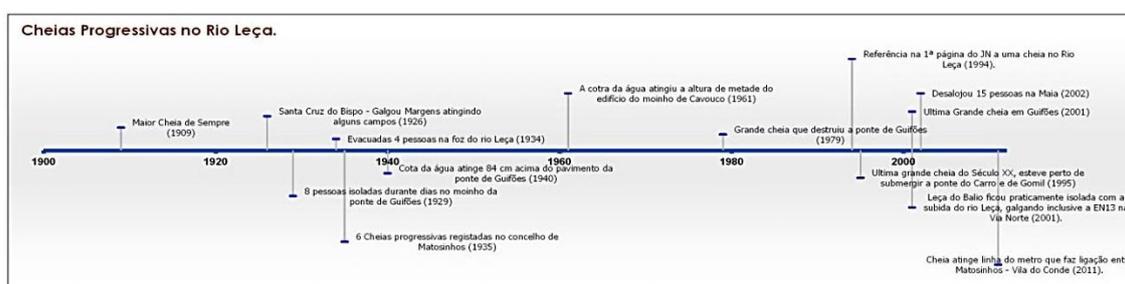


Figura 1 - Cheias registadas no rio Leça².

Pelos dados da figura verifica-se que embora se registem cheias apenas para 13 anos, existe um total de 19 ocorrências. O sector terminal da bacia hidrográfica foi sempre o mais afetado, nomeadamente a área da foz. No entanto, com a construção e ampliação do Porto de Leixões as ocorrências na foz foram mitigadas e em várias situações anuladas, para o que muito deve ter contribuído o aprofundamento do estuário. A título de exemplo pode ser observada a figura 2 que demonstra o sector terminal da bacia hidrográfica do rio Leça.

O mapa patente na figura 2A, datado de 1896 representa, grosso modo, a área estuarina do rio Leça. Foram marcados alguns pontos no mapa de base que ilustram os pontos aproximados das fotografias 1 a 6 que o acompanham. Assinalou-se também as antigas pontes em que se fazia a travessia de Leça da Palmeira para Matosinhos, nas quais está representado a altura da água, sendo visível nas fotografias 2 e 3 a Ponte dos 19 Arcos praticamente submersa, podendo a mesma ser observado na fotografia 1. Embora não existam registos históricos mais detalhados, pensa-se que as fotografias

² Fontes – Jornal de Notícias, Jornal de Matosinhos, Comércio do Porto e Quaresma (2008).

correspondam à década de 1930, altura em que as três pontes foram demolidas devido a construção da doca 1 do Porto de Leixões^{3,4}.

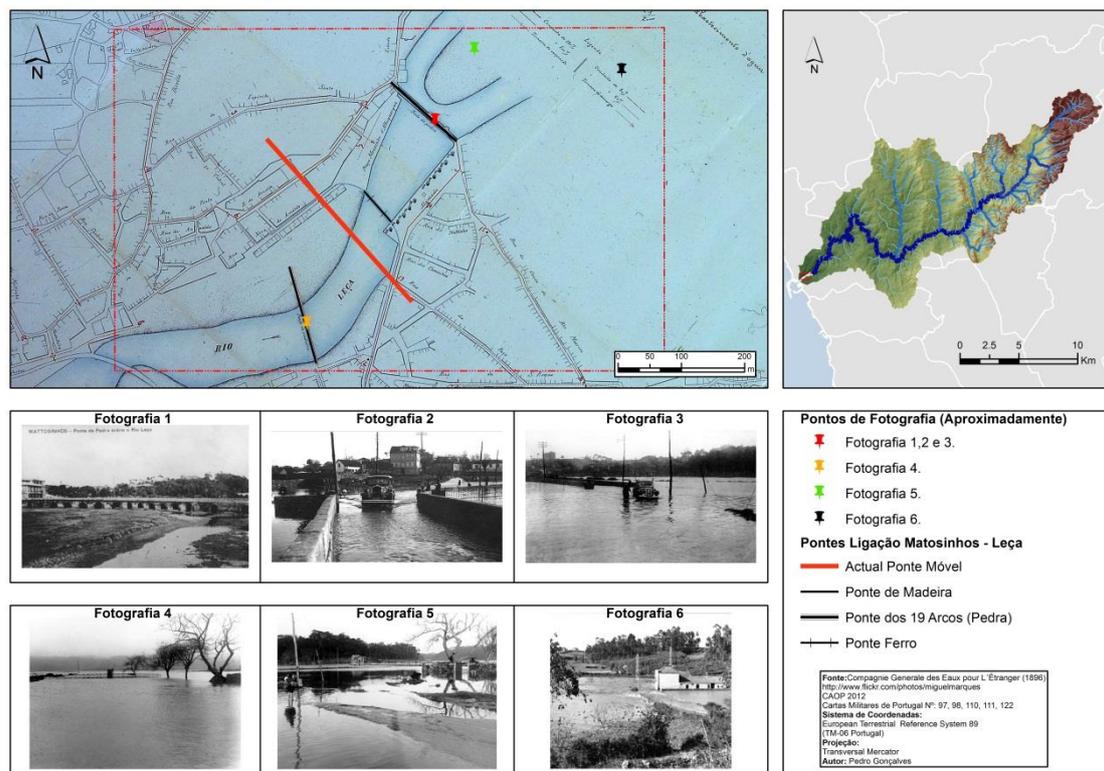


Figura 2 - Cheias no sector terminal da bacia hidrográfica do rio Leça, na situação anterior à construção e aprofundamento do estuário do Leça.

As alterações verificadas na área da foz do rio são particularmente marcantes, como se pode observar na figura 3 que apresenta a comparação entre uma ortofotomapas de 2006 e uma fotografia aérea de 1955. Assim, são visíveis grandes diferenças decorrentes da artificialização do estuário do rio Leça. As áreas representadas pelas fotografias 4,5 e 6, da figura 2, que representavam um vale largo e muito aplanado, estão atualmente submersas. Este conjunto marcante de alterações eliminou o grave problema de cheias que se fazia sentir até a data de expansão do porto.

Por outro lado, verifica-se que a partir da década de 40, começam a ser notificadas ocorrências em sectores mais a montante da foz, nomeadamente Guifões, Leça do Balio e Santa Cruz do Bispo, havendo algumas notícias marcantes como a subida dos níveis da água até metade do moinho de Cavouco (1961), a destruição de uma ponte em Guifões (1979), e o galgamento das águas do rio Leça na EN13 em Leça do Balio (2001).

³ <https://www.apdl.pt/gca/index.php?id=195> (16-08-2012)

⁴ <http://www.resenhaavozdeleca.blogspot.pt/> (16-08-2012)

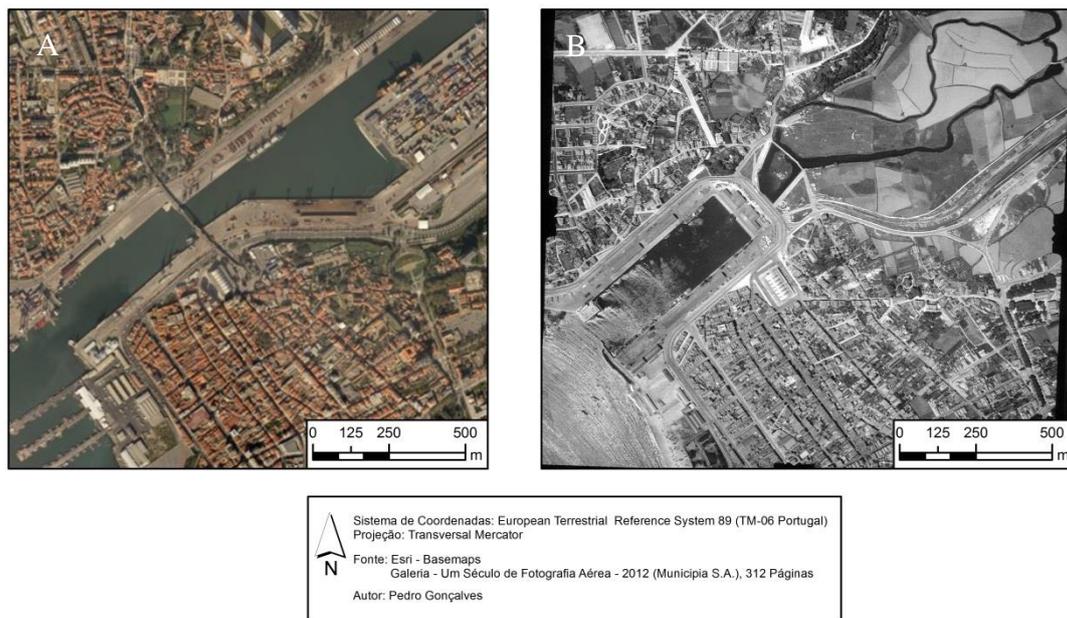


Figura 3 - Foz do rio Leça, perspetiva Porto de Leixões. Figura A - Actualidade, Figura B – 1955.

1.3 Área de estudo

A escolha da bacia hidrográfica do rio Leça como ponto de partida para o presente trabalho não decorreu de forma arbitrária, e foram tidos em consideração alguns fatores, a saber: a existência de registos sobre a ocorrência de cheias, a proximidade da área para se efetuar trabalhos de campo e a cartografia disponível, particularmente no que diz respeito á altimetria, essencial para uma modelação mais fiável, como se verá no capítulo 2.

A bacia hidrográfica do rio Leça (fig. 4), situada no norte do país, mais concretamente entre as bacias do Ave (a Norte) e Douro (a Sul), é uma pequena bacia hidrográfica com aproximadamente 189,5 Km², corresponde a parte dos concelhos de Gondomar, Maia, Matosinhos, Paços de Ferreira, Porto, Santo Tirso, Trofa, Valongo e Vila do Conde. Esta bacia tem uma forma alongada e uma orientação predominantemente Nordeste/Sudoeste. A altitude na bacia varia entre os 0 e os 532 m, o que perfaz um valor médio de 144 m.

O relevo onde se insere a bacia compreende *três unidades geomorfológicas principais* (Soares, Araújo et al. 2012): *a plataforma litoral, abrangendo uma faixa aplanada que se estende desde a linha de costa até às primeiras elevações no interior* (Araújo 1991) ; *o vale do rio Leça que corresponde a uma área complexa*

*A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça:
Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos*

caracterizada por setores relativamente encaixados, sectores baixos aplanados e várias depressões ao longo do seu percurso; e o designado “relevo intermédio” a montante, que engloba essencialmente um conjunto de colinas como a Serra da Agrela e o Monte Córdova (Soares, Araújo et al. 2012).

O rio Leça (fig. 4,5) tem a sua nascente no Monte Córdova a aproximadamente 502 metros de altitude e perfaz cerca de 44.6 Km desde a sua nascente até a foz no Porto de Leixões (Matosinhos). O seu sector terminal sofreu grandes modificações com a construção do Porto de Leixões, que se expandiu e alterou a sua foz. Também grandes pressões antrópicas, nomeadamente a edificação e industrialização que se fez sentir desde o início do século XX, levou a que grandes partes das suas margens fossem ocupadas, levando a uma crescente contaminação das águas do rio.

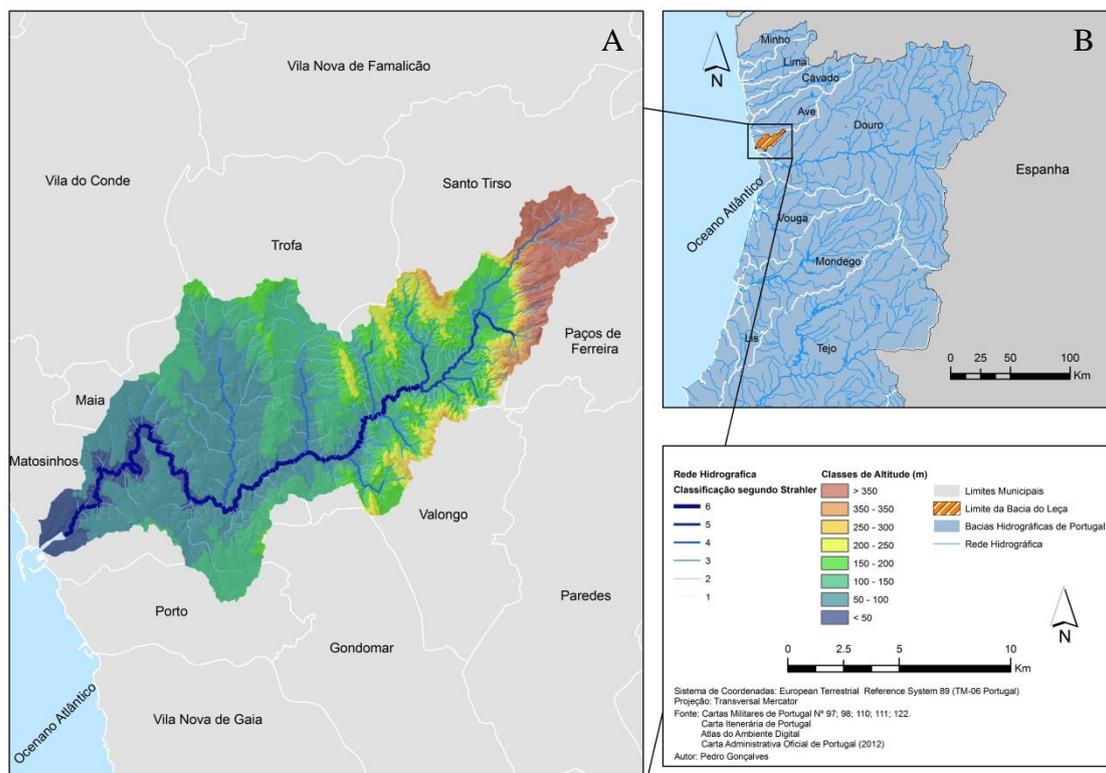


Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do rio Leça (B), hipsometria e rede hidrográfica (A).

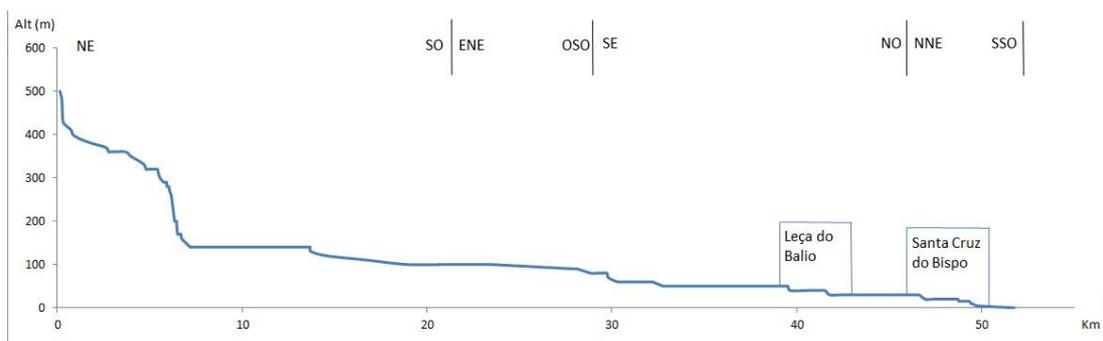


Figura 5 – Perfil longitudinal do rio Leça e áreas de estudo modeladas.

Introdução

Nesta bacia hidrográfica, foram escolhidas duas áreas de estudo, para as quais se efetuou a modelação hidráulica com base no *software* HEC-RAS. Foi escolhido o município de Matosinhos (limitado na fig. 6, a sul, pela bacia hidrográfica do rio Leça), dado o histórico de ocorrências que foi possível recolher, assim como a existência de cartografia de grande escala e com equidistância de curvas de nível de 1m, disponibilizada pelo município.

O facto de se verificarem algumas ocorrências em setores do concelho localizados a montante da foz, assim como as consequências que estes acarretam, não só para infraestruturas mas também para as populações que moram nas margens do rio, levou a que fossem escolhidos dois sectores: o primeiro designado por Santa Cruz do Bispo que engloba parte das freguesias de Santa Cruz do Bispo, Custóias e Guifões, o qual perfaz um segmento do rio Leça com aproximadamente 4.4 Km de extensão e o segundo, que engloba parte da freguesia de Leça do Balio e abrange um segmento do rio com aproximadamente 3.9 Km de extensão.

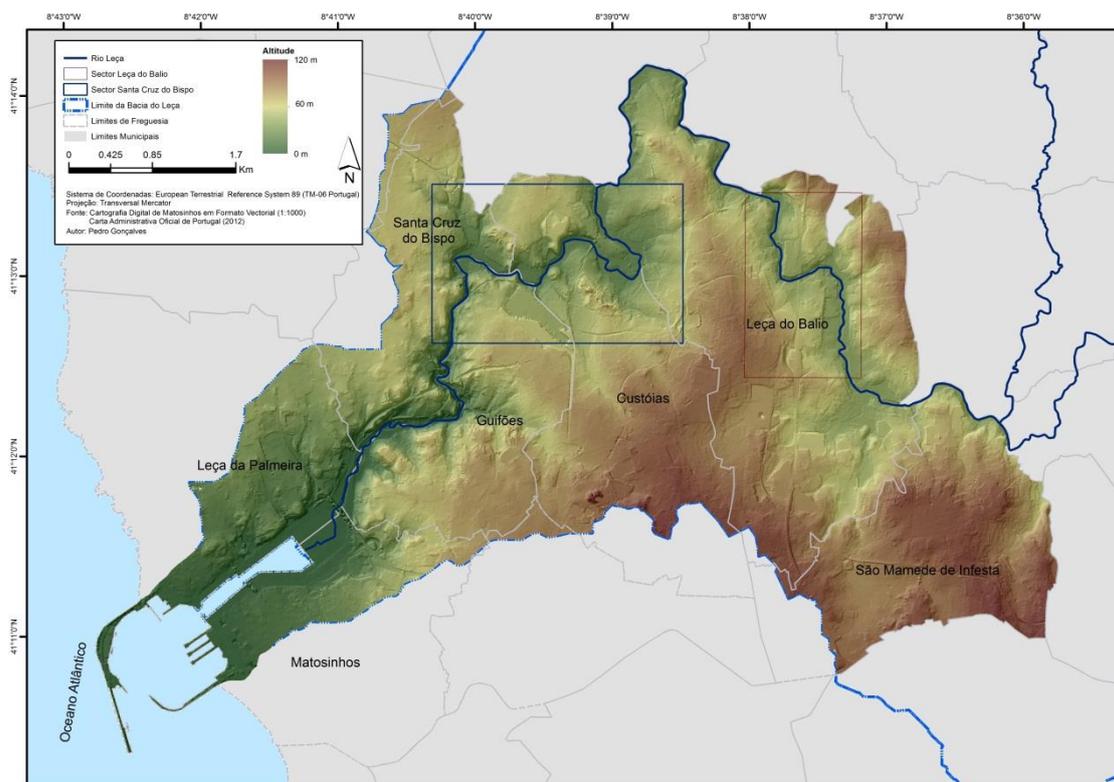


Figura 6 – Localização das áreas de estudo abordadas neste trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho.

O presente trabalho, está dividido em quatro capítulos fundamentais, referentes à temática proposta. A figura 7 expõe de modo sintético o fluxo de trabalho da presente dissertação.

O primeiro capítulo centra-se nos conceitos introdutórios à temática, numa apresentação geral das áreas de estudo, assim como uma perspetiva histórica sobre a ocorrência de eventos de cheia na bacia hidrográfica.

O segundo capítulo, dedicado à metodologia, retrata os procedimentos e metodologias adotadas na delimitação dos perímetros de inundação para os dois sectores escolhidos. Numa primeira fase, apresenta-se uma introdução teórica, onde são expostas as metodologias utilizadas para obtenção de perímetros de inundação, sendo explorada uma metodologia que embora não tenha sido utilizada se baseia no mesmo princípio hidráulico aplicado pelo *software* utilizado para a modelação apresentado neste trabalho, efetuando-se comparações entre os dois métodos e indicando-se os pontos fortes e pontos fracos registados entre eles. Neste capítulo será ainda explorado o *software* HEC-RAS, assim como a sua extensão, descrevendo as variáveis que compõem o modelo, assim como regras para uma correta vectorização dos elementos geométricos.

O terceiro capítulo é referente aos resultados obtidos. Neste ponto, serão identificados todos os dados que foram utilizados, assim como os primeiros resultados. Estes foram sujeitos a uma validação e consequente calibração dos dados com base nos factos observados no terreno, nas respostas aos inquéritos realizados à população residente nas áreas atingidas, nas marcas de cheia que foi possível apurar e nas medições efetuadas durante o trabalho de campo. Com base nos dados de campo recolhidos, foram realizadas alterações à cartografia de base utilizada, incorporando os novos elementos nos ficheiros geométricos, calibrando melhor o modelo digital de terreno e gerando novos resultados. Estes foram comparados com os anteriores para demonstrar a importância que a cartografia de base tem nos resultados a obter, assim como, para verificar a influência que os ficheiros de geometria detêm sobre o modelo hidráulico.

Por fim, o capítulo quatro é dedicado às conclusões, analisando os resultados obtidos e as diferenças entre estes. Esta análise invariavelmente conduz aos problemas observados pela utilização da metodologia proposta e as possíveis maneiras de correção.

Convém referir que com este trabalho adquiriu-se novos elementos que foram utilizados para a construção da carta de zonas inundáveis para áreas de risco. Nesta serão incluídos os elementos provenientes da modelação efetuada (perímetros para os diferentes períodos de retorno), elementos expostos (habitações, pontes, estradas, infraestruturas, etc.), muros de sustentação e proteção e ainda o uso do solo dominante no sector.

Espera-se com a criação da cartografia referida de verificar, num sector, de que forma a conjugação destes elementos potencia ou mitiga o risco de inundação.

Delimitação de perímetros de inundação no vale do rio Leça - Matosinhos

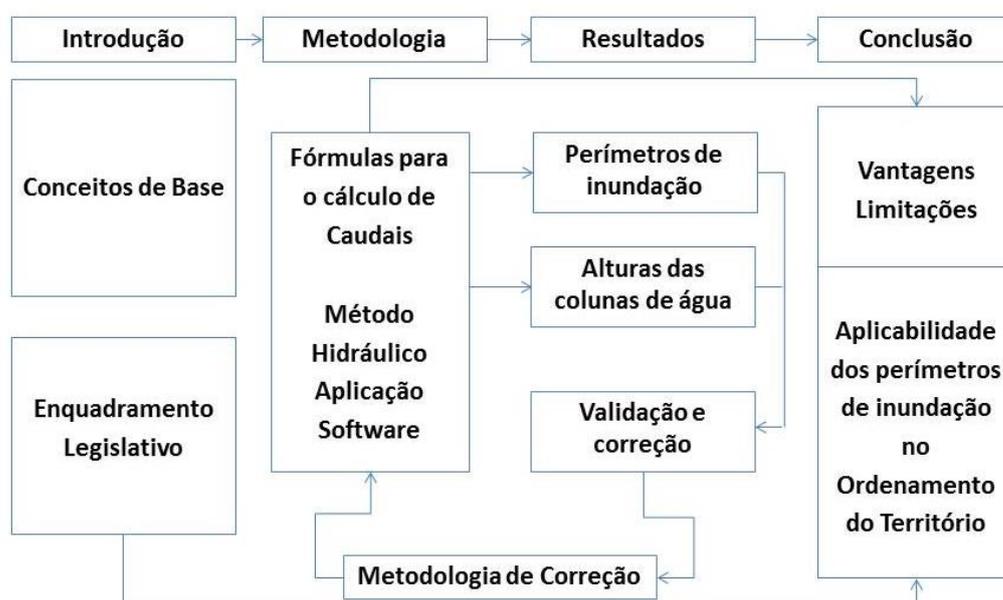


Figura 7 - Fluxo de Trabalho.

1.5 Conceitos de base sobre cheias

Uma cheia é um fenómeno hidrológico extremo, de frequência variável, que consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito ordinário, originando a inundação de terrenos ribeirinhos (Ramos, Castro et al. 2007), definindo-se de forma diferente do conceito de inundação, que consiste num evento igualmente hidrológico, de frequência variável, natural ou induzido pela ação humana, que compreende a submersão de uma área usualmente emersa. Todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas a cheias. Contudo, existem inundações que não são devidas aos rios, como por exemplo, as que são devidas a

galgamentos oceânicos da linha de costa, às inundações urbanas devido à conjugação de chuvas intensas, à impermeabilização das superfícies construídas e a sistemas de água residuais e pluviais inadequados (Ramos 2005).

Existindo diversos tipos de cheias, em Portugal é comum considerar três tipos principais de cheias: as cheias denominadas rápidas, as cheias progressivas e as inundações urbanas (Costa 1986, Ramos and Reis 2001).

As cheias rápidas, ou *flash floods*, são o tipo de ocorrência que é potencialmente mais destrutivo dado o seu carácter imprevisível (Borga, Anagnostou et al. 2011). Este tipo de cheia, de carácter repentino, é caracterizado por precipitações intensas, em períodos de tempo relativamente curtos. Estas afetam bacias hidrográficas com uma dimensão reduzida⁵, podendo ser provocadas por *chuvadas fortes e concentradas, devido a depressões convectivas* (Ramos and Reis 2001).

As cheias progressivas, por outro lado, são derivadas de períodos chuvosos longos que provocam a subida das águas do rio, de forma gradual, tendo potencial para se estender por grandes áreas, dependendo do tamanho da bacia hidrográfica e da morfologia da área. Este tipo de cheia está *relacionado com a permanência da circulação zonal de Oeste, provocadas pela passagem sucessiva de depressões subpolares e sistemas frontais associados* (Ramos and Reis 2001). A precipitação abundante durante longos períodos de tempo provoca a saturação dos solos e a perda, por parte destes, da capacidade de armazenamento de água, originando um agravamento deste tipo de cheia. Convém ainda referir que este tipo de cheia é menos gravosa (Ramos and Reis 2001) do que uma cheia rápida, na medida em que o de caudal aumenta de forma progressiva (Louro and Lourenço 2005), não constituindo desta forma, um risco imediato para a população, enquanto nas cheias rápidas, o caudal aumenta de forma repentina, o que se pode revelar extremamente perigoso para a população.

Associados a determinada cheia, surgem conceitos como caudal e período de retorno, sendo necessário clarificá-los. O caudal pode ser definido como o volume de água, usualmente expresso em m³/s, que passa por determinada secção de um curso de água, tendo toda a bacia hidrográfica (a montante do ponto de medição) como contribuinte (Lencastre and Franco 1992). O período de retorno, por outro lado, é um parâmetro estatístico, usualmente expresso em anos, que corresponde à probabilidade de

⁵ Alguns autores referem que podem ser consideradas pequenas bacias hidrográficas, aquelas que tenham de área até 130 Km² (Chow, V. 1962).

determinado fenómeno ser igualado ou excedido (Rodrigues, Brandão et al. 2003, Ramos, Castro et al. 2007).

A figura 8 demonstra de forma relativamente simples, o anteriormente referido, correspondendo o leito maior de inundação a um período de retorno elevado, enquanto o leito ordinário corresponde usualmente a períodos de retorno mais baixos. O leito menor corresponde ao canal fluvial em época estival. O caudal está sempre associado ao período de retorno, na medida em que quanto maior for o período de retorno associado, maior será o caudal considerado.



Figura 8 – Leitões que se podem definir na planície aluvial.

Relativamente à causa de ocorrências de determinada cheia, não existe apenas uma causa associada mas sim um conjunto de fatores preponderantes para a sua ocorrência. Com efeito as cheias estão relacionadas com o ciclo hidrológico, mais concretamente com a precipitação (em diferentes estados e duração) que cai dentro de determinada assim como as águas subterrâneas (Asgharpour and Ajdari 2011).

A figura 9 representa o ciclo hidrológico, um ciclo contínuo de transferência de água na hidrosfera. Esta figura demonstra os cinco principais processos que constituem o ciclo hidrológico nomeadamente a evaporação, condensação, precipitação, infiltração e escoamento superficial.

O ciclo hidrológico, como referido, é ininterrupto e pode ser explicado começando com a evaporação, que consiste na transformação da água do estado líquido para o estado gasoso, originando o vapor de água que ascende em altitude movimentando-se pelo globo através da ação das correntes atmosféricas, podendo o seu percurso ser relativamente pequeno como ser transportado centenas ou milhares de quilómetros. A sua ascensão em altitude origina a condensação do vapor de água em nuvens originando pequenas gotículas de água ou cristais de gelo, precipitando-se, originando assim a precipitação, que pode ser de dois tipos: sólida, no caso de neve ou gelo ou líquida, no caso da chuva.



Figura 9 – Ciclo da água⁶.

A maior parte da precipitação cai sobre os oceanos que cobrem a maior parte da superfície terrestre, mas a precipitação que atinge o solo, pode originar quatro processos distintos, podendo esta ser armazenada como gelo nas montanhas, originar escoamento superficial, infiltrar-se no solo ou evaporar novamente.

O tempo de armazenamento do gelo nas cadeias montanhosas depende principalmente da temperatura, podendo o gelo fundir na primavera, originando escoamento superficial.

Parte da água que atinge o solo infiltra-se, alimentando os níveis freáticos, alojando-se em camadas permeáveis ou entre camadas impermeáveis de rocha através de sistemas de falhas, existindo alguns fatores que influenciam a taxa de infiltração da água como por exemplo:

- Humidade do solo - quanto mais próximo o solo estiver do seu ponto de saturação menor irá ser a quantidade de água que poderá ser infiltrada (Chow 1964, Allaby and Garratt 2003);
- A granulometria e tipo de solo – ditam a velocidade da infiltração, na medida em que o solo é constituído por partículas de variados tamanhos e composição, existindo mais espaços, por exemplo, entre grãos de areia do

⁶ Extraído de <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>

que entre argilas, condicionando assim o potencial de infiltração da água assim como a velocidade desta no processo (Allaby and Garratt 2003);

- A ocupação do solo – a artificialização das superfícies, exercida por pressões antrópicas, impossibilita a infiltração das águas pluviais, contribuindo para o aumento do escoamento superficial, contribuindo desta maneira para o aumento do risco de cheia (Konrad 2003);
- O declive das vertentes - fator que também determina de forma significativa a quantidade de água que potencialmente chega a alimentar os cursos de água (Sunkar and Tonbul 2011), dado que quanto maior for o declive de determinada vertente menor será o tempo de concentração das águas em determinado ponto, acontecendo também o inverso na medida em que declives suaves ($0^\circ - 2^\circ$) promovem, em condições ideais, a infiltração das águas e a absorção destas pela vegetação (Gavin and Xue 2008);

A escorrência superficial direta, correspondendo à água que flui até às altitudes mais baixas alimentando lagos, rios e oceanos, existindo em períodos estivais a alimentação dos rios por parte de águas subterrâneas (Davie 2012), como se verifica na figura 10 A⁷.

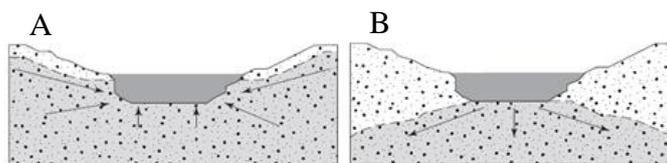


Figura 10 - Interceção entre o rio e as águas subterrâneas. A – Águas subterrâneas contribuem para a alimentação do canal; B – A água do canal infiltra contribuindo para a alimentação das águas subterrâneas.

No decurso deste processo, ocorrem em paralelos

outros processo como a transpiração e evapotranspiração, onde a água presente nos organismos e plantas retorna a atmosfera (Davie 2012), assim como evaporação, iniciando novamente um ciclo contínuo, em equilíbrio constante, onde todos os processos ocorrem em simultâneo contribuindo para um balanço hidrológico na terra, apenas interrompido em raras exceções como eras glaciares.

Bichançã (2006), refere que a *precipitação útil é a diferença entre a quantidade de água precipitada e as perdas para o escoamento superficial por interceção, retenção e infiltração.*

O escoamento superficial surge quando a capacidade de interceção, retenção e infiltração do solo é ultrapassada, originando que a água se esco superficialmente ao longo das encostas da bacia, convergindo para pequenas linhas de água que, por sua

⁷ Extraído de Davie 2012.

vez, se vão unindo e formando linhas de água cada vez maiores. O conjunto resultante constitui a rede de drenagem da bacia hidrográfica (Bichançã 2006).

Alguns autores (Chow, Maidment et al. 1988) referem que o ciclo hidrológico é apenas uma parte dos fatores condicionantes no escoamento, nomeadamente os fatores climáticos, onde também se encontram inseridos fatores como o vento, temperatura, etc., existindo ainda os fatores do tipo fisiográficos como as características fisiográficas da bacia hidrográfica as características dos cursos de água (Bichançã 2006).

As características físicas da bacia hidrográfica assim como a precipitação são fatores que exercem influência direta no escoamento superficial, assim como a capacidade do escoamento em alimentar a rede hidrográfica existente, podendo contribuir para a ocorrência de cheias em determinada bacia hidrográfica. Existem fatores físicos, geométricos e relacionados com a rede hidrográfica que são importantes para o estudo de uma cheia na medida em que condicionam a circulação da água, infiltração e padrões de drenagem.

A geometria da bacia está diretamente relacionada com as características fisiográficas da bacia hidrográfica podendo ser enumerados alguns fatores que se relacionam com este parâmetro:

- A forma da bacia hidrográfica na medida em que *influencia o escoamento pelo efeito que exerce sobre a intensidade dos fluxos e sobre o tempo médio de transporte da água desde o ponto de impacto até ao de saída* (Soares 2002). Nas bacias de forma mais circular, os afluentes tendem a fluir próximo ao centro da bacia, aumentando a descarga e escoamento, por outro lado nas bacias mais alongadas, os afluentes tendem a ser mais espaçados e pequenos, confluindo em intervalos mais espaçados ao longo do rio principal, contribuindo para um menor aumento de vazão comparativamente às bacias circulares (Soares 2002);
- O tamanho da bacia dado que quanto maior for a bacia, maior será a quantidade de água possível de ser transportada, dado o aumento da área que contribui para a alimentação dos cursos de água;
- O declive como referido anteriormente é outro importante fator dado que quanto maior este for, teoricamente maior velocidade a água atingirá, impossibilitando a concentração das águas;

As características físicas da bacia hidrográfica também exercem uma grande influência no escoamento superficial na medida em que a cobertura do solo assim como

a sua artificialização, como referido anteriormente, condicionam a infiltração da água no solo.

O último parâmetro relacionado com as características fisiográficas é a rede hidrográfica. O rio principal (Shreve 1966) como no caso do tamanho da bacia hidrográfica, é outro indicador pois este está diretamente relacionado com a quantidade de água que este pode possivelmente transportar. Assim, rios maiores apresentam em média maiores caudais que rios mais pequenos. A rede hidrográfica pode apresentar diversos padrões, que são determinantes na análise de uma rede hidrográfica assim como na litologia e sistemas de falhas existente. Através da análise dos padrões existentes pode-se inferir o grupo litológico assim como a existência de falhas nos diversos pontos da bacia hidrográfica.

O padrão de drenagem retangular, está associado a falhas e diáclases nas rocha, que forma “canais” onde a água consegue fluir livremente, por outro lado, o padrão paralelo, observável na figura 11A, está associado a *vertentes com declividade acentuada ou onde existem controlos estruturais que motivam a ocorrência de espaçamento regular, quase paralelo* (Christofolletti 1978).

O padrão dentítrico (fig. 11B) é característico de *planícies de inundaçãõ, constituído de canais que se bifurcam e confluem de maneira aleatória* (Christofolletti 1978).

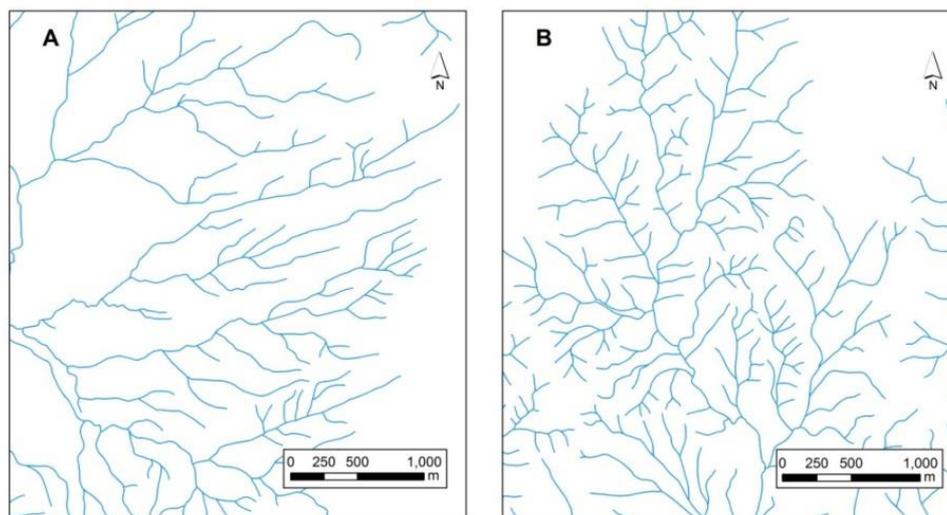


Figura 11 – A - Padrão de drenagem dominantemente paralelo; B – Padrão de drenagem dentítrico.

O estudo do comportamento de uma bacia hidrográfica relativamente a um evento de precipitação é essencial pois este conhecimento permite definir uma relação entre o episódio de precipitação e a resposta da bacia, condicionada por fatores como a duração e intensidade da precipitação, infiltração, características fisiográficas da bacia

hidrográfica, etc., (Lencastre and Franco 1992). Neste sentido surge o hidrograma, que corresponde a um gráfico que descreve, para uma dada secção de um rio ou para um determinado ponto de um sistema de drenagem, a variação do caudal com o tempo.

Efetivamente, o hidrograma é uma expressão integral das características fisiográficas e climáticas que governam as relações entre a precipitação e o escoamento para uma determinada bacia hidrográfica (Lopes S/D).

O hidrograma (fig.12⁸) representa a evolução do caudal de um rio, numa dada bacia hidrográfica, relativamente à duração e intensidade da precipitação. Este assume um papel essencial na análise das cheias, na medida em que este fornece a leitura de parâmetros importantes, designadamente o tempo de resposta ou *lag time*, que pode ser definido como a diferença de tempo em que ocorre o episódio de precipitação e em que ocorre o pico de caudal em determinada secção da bacia hidrográfica.

O hidrograma usualmente representa três unidades, o caudal, na figura 12 expresso em *cumecs*, correspondendo esta unidade a metros cúbicos por segundo, a precipitação, expressa em milímetros e o tempo durante o qual o evento ocorre, correspondendo este ao momento do início da precipitação, a subida gradual do caudal (*rising limb*), até ao momento que se regista o pico de caudal (*peak discharge*), e a descida gradual do caudal que passa na secção da bacia hidrográfica considerada (*falling limb*).

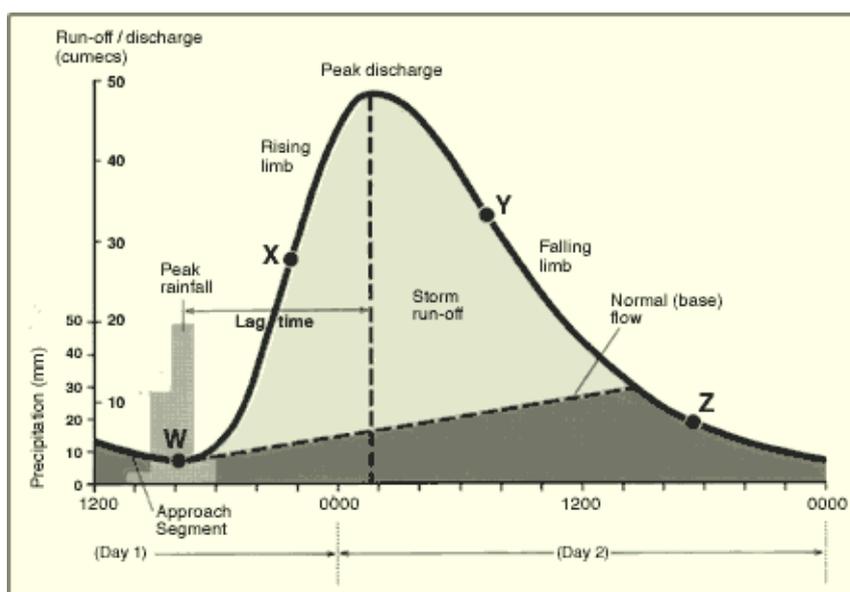


Figura 12 - Hidrograma.

⁸<http://www.coolgeography.co.uk/GCSE/AQA/Water%20on%20the%20Land/Hydrographs/Hydrographs.htm>

A curva ascendente do caudal (*rising limb*) transmite a velocidade com que a água atinge o canal, representando o nível de subida da água no canal, verificando-se o oposto na curva descendente (*falling limb*). Quanto mais vertical ou acentuada for a curva ascendente, maior a probabilidade da ocorrência de determinada cheia.

O hidrograma não representa apenas o escoamento superficial direto das águas da chuva (*storm run-off*), podendo ser verificado que também é tido em consideração a precipitação infiltrada e/ou escoamento subterrâneo (*base flow*) que também contribuem para a descarga nas linhas de água, de maneira muito menos significativa, mas de forma constante, que a água proveniente do escoamento superficial direto (Lencastre and Franco 1992, Lopes S/D).

Os perímetros de inundação são outro aspeto importante no estudo das cheias. A definição de perímetros de inundação, para diferentes períodos de retorno, como observável pela figura 13⁹, possibilita o conhecimento das áreas potencialmente

afetadas assim como uma ideia da altura de água implícita a cada um dos períodos de retorno considerados. Estes tipos de estudos são considerados no ordenamento do território, como

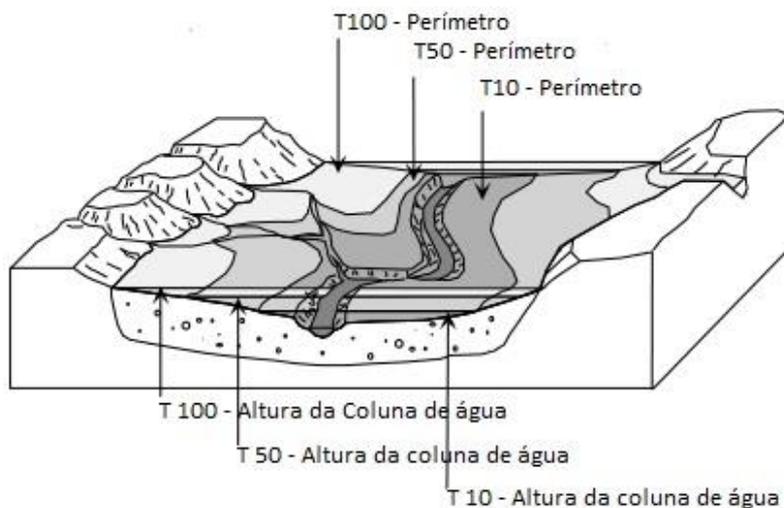


Figura 13 - Perímetros de inundação para diferentes períodos de retorno, assim como a altura da coluna de água para cada período considerado.

anteriormente, e impostos Decretos-Lei que obrigam a sua aplicação nos Planos Municipais de Ordenamento do Território (PMOT).

⁹Adaptado de - http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/floodhaz.htm (16/09/2012)

1.6 Efeitos das cheias

As cheias são, de entre todos os fenómenos naturais, os que têm uma maior dispersão espacial, tal como é visível na figura 14, existindo apenas um continente que não se encontra representado na figura, a Antártida.

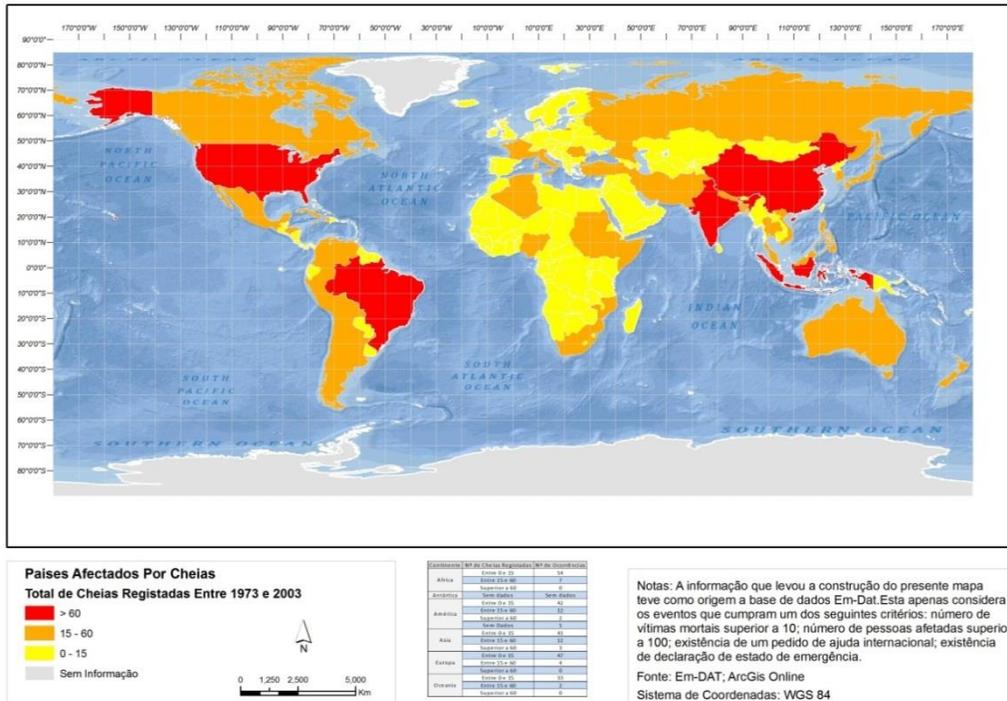


Figura 14 - Distribuição espacial e número de ocorrências por país (1974 a 2003).

Para a construção do mapa de cheias a nível global foi consultada uma base de dados global denominada *Emergency Events Database* (EM-DAT), a qual contém informações variadas e mais de 17000 registos de eventos naturais e tecnológicos que ocorreram desde o ano de 1900 até a atualidade, sendo gerida pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, na Universidade Católica de Louvain (Bélgica).

Espera-se que esta base de dados seja relativamente completa, mas, no entanto, é necessário referir que a informação coletada advém de relatórios governamentais, organizações internacionais e agências de notícias. Assim, a qualidade e exatidão da informação está muito dependente de fontes externas (S.Jonkman and J.Vrijling 2008) e apenas são considerados os eventos que cumpram um dos seguintes critérios: número de vítimas mortais superior a 10, número de pessoas afetadas superior a 100, existência de um pedido de ajuda internacional ou existência de declaração de estado de emergência.

O EM-DAT apresenta alguma informação relevante no estudo destes eventos. Na figura 15 observa-se, de forma bastante linear, o aumento do número de desastres naturais reportados (com base nos critérios previamente referidos) a partir da década de 70. Analisando esta figura, salienta-se que de todos os desastres naturais, os que apresentam maior número de registos/eventos são as cheias, não existindo neste gráfico distinção entre os diferentes tipos de cheia.

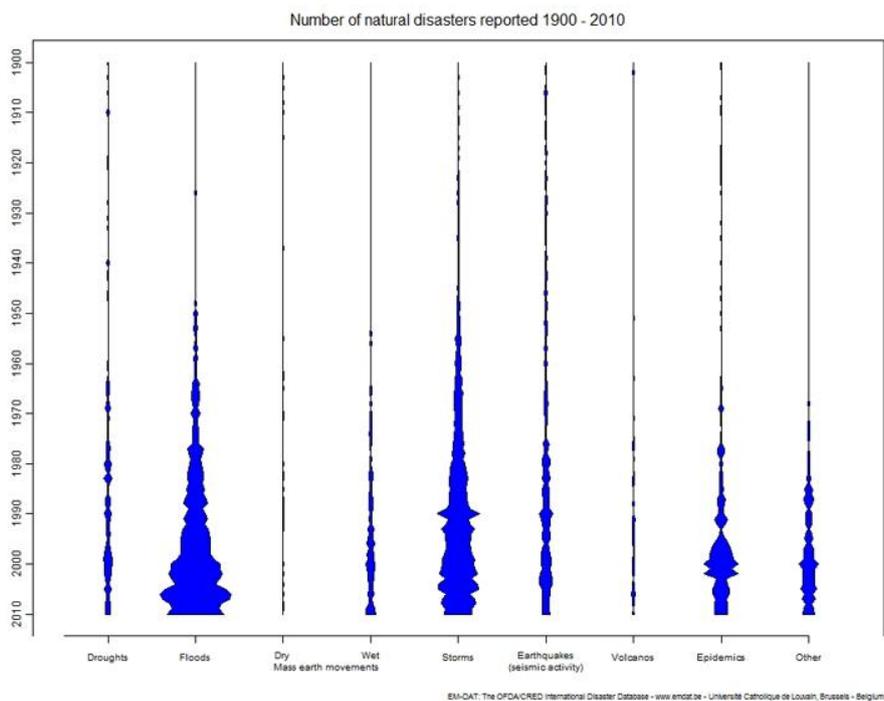


Figura 15 - Número de desastres naturais reportados entre 1900 e 2010.

A figura 16, por outro lado mostra estes eventos classificados pelo tipo, verificando-se que as cheias do tipo geral, ou do tipo fluvial são as mais frequentes, a partir da década de 70. Também se pode observar que o decréscimo das cheias não especificadas a partir década de 90 e que, sensivelmente por volta deste período temporal começa a existir maior distinção entre as cheias do tipo gerais ou fluviais e as cheias rápidas, explicado possivelmente pela afinação dos critérios de recolha ou

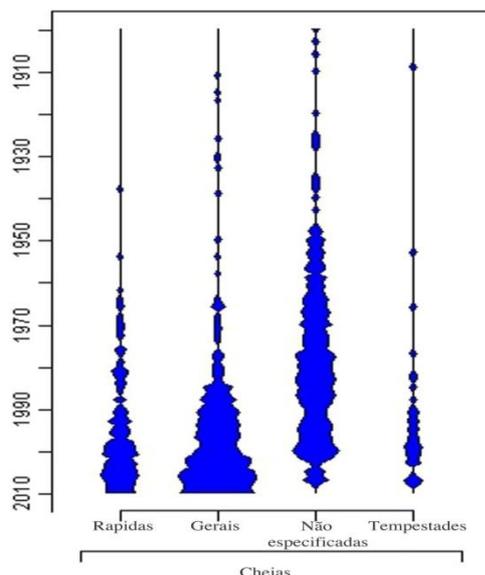


Figura 16 - Número de cheias reportadas (por tipo) entre 1900 – 2010.

classificação deste tipo de eventos.

Desastre	Data	Óbitos	Desastre	Data	Afetados	Desastre	Data	Dano (\$)
Temperaturas Extremas	08/2003	2696	Fogos	01/2003	150.000	Fogos	01/2003	1.730.000
Cheias	26/11/1967	482	Cheias	02/1979	25.000	Fogos	15/05/2005	1.650.000
Cheias	20/02/2010	43	Cheias	01/1979	20.220	Cheias	20/02/2010	1.350.000
Temperaturas Extremas	07/2006	41	Cheias	18/11/1983	2.000	Secas	09/2004	1.338.136
Cheias	29/12/1981	30	Cheias	22/12/1996	2.000	Tempestades	27/02/2010	270.000
Tempestade	30/10/1997	29	Cheias	26/11/1967	1.100	Cheias	18/11/1983	95.000
Cheias	01/1979	19	Cheias	08/01/1996	1.050	Secas	04/1983	95.000
Cheias	18/11/1983	19	Cheias	29/12/1981	900	Fogos	09/09/1985	95.000
Fogos	15/06/1986	15	Cheias	20/02/2010	618	Cheias	01/1979	30.000
Fogos	15/05/2005	15	Cheias	22/10/2006	240	Tempestades	30/10/1997	25.000

Tabela 1 – Tipo de evento, datas, número de óbitos, número de pessoas afetadas e dano por tipo de evento.

A tabela 1, elaborada a partir dos dados disponíveis no EM-DAT¹⁰, mostra os dez eventos mais destrutivos em Portugal, tendo em consideração o nº de óbitos, nº de pessoas afetadas e danos (em dólares). Assim, regista-se a existência de cinco registos de cheias (num total de dez eventos) que provocaram 593 óbitos. Relativamente ao número de pessoas afetadas, este fenómeno surge como um dos principais (nove de dez eventos) afetando 53.128 pessoas.

Por outro lado, a tabela 2 adaptada a partir de dados disponíveis no EM-DAT é apenas referente às cheias, sendo necessário salientar que esta é a informação disponível (e sumariada), nessa base de dados para Portugal. Analisando a informação, verifica-se que existem duas tipologias principais, as cheias fluviais e as cheias rápidas e ainda uma terceira que não contém informação sobre a tipologia do evento, estando também representados como anteriormente o número de pessoas afetadas, o dano médio dos eventos em dólares e ainda o número de óbitos decorrentes de cada um dos tipos de cheia.

¹⁰ <http://www.emdat.be/result-country-profile> (30/03/2012).

Evento	Tipologia de Evento	Nº de Eventos	Óbitos	Total Afetados	Dano (000 US\$)
Cheias	Não especificadas	5	534	49220	130100
	Cheias Rápidas	1	10	1050	13000
	Cheias Fluviais	7	52	3264	1350000

Tabela 2 - Sumário de ocorrência de cheias em Portugal¹¹.

Relativamente às consequências, a bibliografia disponível sobre esta matéria é muito vasta, existindo diversos autores que fazem referência a esta temática. Na perspetiva do dano proveniente das cheias é importante referir que as consequências das cheias podem ser tangíveis ou intangíveis e ainda diretas e indiretas (S.Jonkman and J.Vrijling 2008), tal como se pode observar na tabela 3. Os autores utilizam o termo tangível para todo o dano que pode ser quantificado monetariamente e intangível para todo o dano que não pode ser quantificado, como por exemplo, a perda de vidas. Relativamente ao tipo de dano, este agrupa-se em duas tipologias distintas: o dano direto que corresponde por exemplo aos estragos resultantes a habitações e infraestruturas e indireto que corresponde a alterações a padrões pré-existentes, servindo como exemplo perda do poder de compra que compromete o comércio local e regional.

Tipo	Tangíveis	Intangíveis
Direto	Residências	Óbitos
	Estruturas	Feridos
	Veículos	Animais
	Agricultura	Utilitários e comunicações
	Infraestruturas e outros edifícios públicos	Perdas históricas e culturais
	Interrupção de negócios	Perdas ambientais
	Evacuação e operações de salvamento	
	Reconstrução de defesas contra cheias	
	Custos de Limpeza	
	Dano a companhias fora da área da cheia	Inquietação social
Indireto	Substituição da produção fora das zonas afetadas	Danos ao governo
	Habitação temporária para os evacuados	

Tabela 3 - Classificação geral do dano de cheia ¹².

¹¹ Fonte EM-DAT – 30/03/2012

¹² Adaptado de S.N Jonkman, J.K. Vrijling – Loss of life due to Floods 2008

A tabela 3 sumariza de forma completa e relativamente simples as consequências possíveis que podem observar-se depois da ocorrência de uma cheia. Esta tabela, também agrupa os efeitos sem ter em consideração a intensidade das consequências, sendo importante realçar que cheias em bacias hidrográficas de diferentes tamanhos também condicionam o dano obtido.

Pode-se afirmar que as cheias, numa primeira fase, têm consequências muito negativas na economia, dado o grau de destruição que estes eventos podem causar. No entanto, no decorrer de uma cheia, não se pode afirmar que esta apenas tem consequências diretas, mas ter em consideração todas as outras consequências que não são visíveis imediatamente, mas que se manifestam após a sua ocorrência (Ashley and Ashley 2008). Um exemplo disso é a salinização dos solos agrícolas (no caso da água conter sal) que pode levar à destruição das culturas e à impossibilidade de cultivo durante um certo período de tempo. Outro exemplo apresentado na tabela 3 é o dano ou destruição de residências (efeito direto), o que provoca, na fase imediata, o desalojamento dos habitantes e danos materiais, culminando na necessidade de articulação do socorro para o alojamento das pessoas afetadas (efeito indireto).

A economia local também será afetada *à posteriori*, dada a perda de produção de bens e serviços pela interrupção de atividade que pode afetar uma região. Como exemplo pode-se referir o Rio Amarelo, na China, que é frequentemente afetado por grandes cheias, assinalando-se a pior de sempre em 1887 (Gunn 2008), a qual vitimou 900.000 pessoas e dada a sua extensão - aproximadamente 5.000 Km², causou a interrupção de comércio e serviços entre as áreas não afetadas e áreas afetadas.

Convém ainda referir o custo das ações da proteção civil, incluindo o alojamento e tratamento de vítimas, o dano potencial a fontes de alimento e de água potável, a possível intransitabilidade de estradas e ainda a desobstrução de edifícios e reconstrução, caso seja necessário.

2. METODOLOGIA

2.1. Reflexão metodológica prévia

As cheias como eventos com dispersão praticamente mundial, afetando todos os anos milhares de pessoas e provocando avultados prejuízos materiais, são um fenómeno bastante estudado. Tendo este aspeto em consideração, existem várias abordagens com objetivos distintos, podendo ser modelados perímetros de inundação, proceder a definição de zonas de risco ou averiguar os locais onde a probabilidade da ocorrência de inundações é maior. Neste sentido, são usadas diversas metodologias como por exemplo, as análises multicritério (Meyer, Scheuer et al. 2008). No entanto, as análises multicritério ou combinatórias estão sujeitas a uma grande incerteza e subjetividade relacionada com a experiência e conhecimento do operador (Fernández and Lutz 2010). Para conferir um grau menor de subjetividade começaram a ser implementados métodos como o processo hierárquico analítico, ou *AHP (Analytical Hierarchy Process)*, que basicamente combinam a experiência do operador com a lógica da matemática. Este método foi usado com relativo sucesso ao longo dos últimos anos para o estudo de riscos naturais (Rashed and Weeks 2002), sendo uma técnica ainda pouco utilizada no contexto das inundações e cheias (Meyer, Scheuer et al. 2008). Neste sentido, o grau de importância ou ponderação atribuído a cada fator, considerado pelo operador como relevante na análise em questão, exerce uma grande influência no resultado final devolvido pelo *software*.

A abordagem multicritério (de índole espacial) envolve a utilização de vários temas de informação, combinando-os e atribuindo ponderações para a criação de cartografia temática. Este tipo de análise é, segundo alguns autores, a melhor maneira de incorporar fatores e consequências consideradas relevantes sem que estes se meçam numa escala monetária (Meyer, Scheuer et al. 2008). As ponderações efetuadas neste tipo de análises tendem a ser calculadas de forma semiautomática com base em regras matemáticas e lógicas. Alguns exemplos são o *AHP*, *Outranking*, *MAUT (Multi Attribute Utility Theory)*, etc.

Com efeito existem diversos trabalhos com base nas análises multicritério, como um estudo efetuado na província de Tucumán, na Argentina. Neste trabalho os autores (Fernández and Lutz 2010), para a criação de cartografia da perigosidade de cheias rápidas seguem uma análise multicritério envolvendo vários fatores, tais como: os

declives, distância aos canais de escoamento, altitude, nível hidrostático e uso do solo, ponderando os fatores com base no método *AHP*. Outro trabalho que merece referência recai sobre parte do rio *Mudle*, na Alemanha, mais concretamente perto da cidade de *Grimma*. Os autores (Meyer, Scheuer et al. 2008), compararam os diversos métodos de ponderação existentes, adotando o *MAUT*, para ponderar os diversos fatores escolhidos. Estes avaliam o risco ambiental, risco económico, risco social para uma área afetada previamente delimitada, correspondendo à situação de uma cheia para o rio *Mudle*, com um período de retorno de 200 anos. Os autores utilizaram o *software FloodCalc* para o cálculo dos resultados, permitindo este, combinar a profundidade da coluna de água, o número de habitantes, o valor de estruturas, bens, etc. Com base nestes fatores, o *software* efetua uma série de cálculos, onde o resultado final é um mapa de risco com base na e dos fatores de entrada (Scheuer, Haase et al. 2010).

Ainda deve ser referido o método hidráulico para a delimitação de perímetros de inundação, bastante usado e difundido mundialmente. Este, pode ser aplicado de forma semiautomática, com recurso a *software* próprio para a modelação ou de forma mais convencional¹³.

A obtenção de perímetros de inundação, independentemente do método utilizado pode ser dividida em três fases distintas. A primeira, relaciona-se com a aquisição rigorosa de dados altimétricos da superfície a modelar, a segunda, com todos os cálculos necessários para a obtenção de caudais e uma terceira, em função dos dados anteriores e de cálculos matemáticos, em que se delimita cartograficamente os perímetros de inundação e a altura da coluna de água. Relativamente à primeira fase, atualmente existem diversos equipamentos que podem ser utilizados para a aquisição altimétrica, sendo a sua utilização apenas dependente do rigor pretendido. No mercado existem três técnicas e aparelhos que permitem a aquisição destes dados, sendo grande a diferença entre os preços cobrados e o tempo de trabalho despendido no levantamento. As soluções mais convencionais passam pela utilização de teodolitos e estações totais ou mesmo o levantamento altimétrico com base em pontos *GPS*. Este método pode ser considerado muito moroso, existindo uma relação direta entre o tempo despendido e o tamanho da área em questão, assim como o rigor pretendido. No entanto é necessário

¹³ Entenda-se por convencional, o processo de aquisição de dados topográficos com recurso a teodolito/estação total/GPS e ainda o tratamento da informação, assim como a aplicação de fórmulas com vista à obtenção da cota máxima de inundação para cada perfil transversal, sendo assim possível fazer a sua representação cartográfica, através da adição da altura da coluna de água obtida e da cota a que se encontra o talvegue.

referir que o levantamento altimétrico com base neste tipo de equipamento (estações totais e teodolitos) permite a construção de perfis transversais mais rigorosos que a cartografia pré-existente, dado que neste cenário, o rigor é determinado pelo operador e pelas suas necessidades.

O *GPS* pode ser utilizado também para aquisição altimétrica, sendo necessário esclarecer alguns parâmetros importantes neste aspeto. A precisão de um aparelho de *GPS* pode variar entre os *100 metros a poucos milímetros* (Monico 2000), sendo que tal varia do aparelho em si, sendo aconselhável a utilização de *GPS* de alta precisão para aquisição de dados pois este possibilita, através de redes (nacionais) previamente construídas, o tratamento dos dados através da correção diferencial, o que minimiza o erro obtido, tanto vertical como horizontal, podendo a margem de erro estar entre os 10 centímetros e poucos milímetros. Tendo em consideração esse aspeto, podem ser geradas malhas de pontos que podem ser incorporadas em MDT previamente existentes, o que permite também a construção de perfis transversais detalhados necessários para o cálculo e representação dos perímetros de inundação.

No entanto, estão disponíveis outras técnicas para aquisição altimétrica, nomeadamente o *LIDAR (Light Detection And Ranging)*, podendo a aquisição ser aérea ou terrestre. No caso deste método, os custos associados são ainda bastante altos, mas no entanto, a informação pode ser obtida e processada rapidamente. A grande vantagem deste método, considerando o *LIDAR* aéreo, é a derivação de informação base (pontos cotados) para MDT com um grande detalhe e precisão (Lemmens 2009). A informação que é derivada não é apenas relativa ao terreno, abrangendo também tudo o que se encontra à superfície. Desta forma, como podem ser gerados MDS (modelos digitais de superfície) para o terreno, esses dados são de extrema importância para o estudo e modelação de cheias. A aquisição altimétrica de todos os elementos que estão à superfície da terra pode ser utilizada para calibração de modelos de cheia, conferindo mais detalhe e realismo à simulação. Os dados podem, inclusivamente ser utilizados para a aquisição ou classificação de parâmetros específicos como coeficientes de rugosidade o que permite uma melhor afinação de modelos semiautomáticos (Straatsma and Baptist 2008).

A segunda fase, necessária para se obter perímetros de inundação está relacionada com o cálculo dos caudais a serem utilizados, procedimento necessário para saber a quantidade de água (m^3/s), que passa em determinada secção considerada. Este pode ser calculado utilizando diversas fórmulas que podem ser agrupadas em grandes

grupos: as fórmulas empíricas, as fórmulas cinemáticas, as fórmulas estatísticas e ainda modelos matemáticos. A grande diferença entre as fórmulas utilizadas são os parâmetros necessários para o seu cálculo. Com efeito, as primeiras fórmulas a serem utilizadas para o cálculo de caudais de ponta de cheia foram as fórmulas empíricas.

Este tipo de fórmulas foram os *primeiros métodos para avaliação de cheias máximas*. Estas baseavam-se na experiência e apenas consideravam a área da bacia hidrográfica (Costa and Lança 2011). Deve ser referido que muitos países utilizavam as suas próprias fórmulas, sendo uma das mais utilizadas e difundida a fórmula de *Iskowski* (Martins 2000). Esta surge como uma das fórmulas mais adotadas porque considera, além de outros fatores, a precipitação que cai em determinada bacia hidrográfica (Martins 1999).

Nome	Fórmula	Descrição de variáveis	Aplicabilidade
Pagliario	$Q_p = A_b \left(\frac{2900}{90 + A_b} \right)$	Q_p – Caudal de ponta de cheia; A_b – Área da Bacia Hidrográfica em Km ² ;	Bacias Hidrográficas com áreas inferiores a 1000 km ² .
Whistler	$Q_p = A_b \left(\frac{1539}{259 + A_b} \right) + 0,054$	Q_p – Caudal de ponta de cheia; A_b – Área da Bacia Hidrográfica em Km ² ;	Bacias hidrográficas entre 1000 e 1200 km ² .
Iskowski	$Q_p = K_{Is} \cdot m_I \cdot \bar{P} \cdot A_b$	Q_p – Caudal de ponta de cheia; A_b – Área da Bacia Hidrográfica em Km ² ; K_{Is} – Parâmetro variável, dependente da categoria dos solos, da cobertura vegetal e do relevo; m_I – Parâmetro variável com a área da bacia hidrográfica; P - Precipitação média anual (mm);	Bacias Hidrográficas até 1000 Km ² . Em Portugal esta fórmula devolve valores de caudal inferiores aos esperados.
Forty	$Q_p = A_b \left(b \frac{500}{A + 125} + c \right)$	Q_p – Caudal de ponta de cheia; A_b – Área da Bacia Hidrográfica em Km ² ; b, c – Constantes que têm valores de 2,35 e 0,5 respetivamente para uma precipitação máxima diária de 200mm, e os valores de 3,25 e 1,00 para uma precipitação máxima entre 200 e 400mm.	Bacias hidrográficas com área inferior a 1000 km ²

Tabela 4 - Algumas fórmulas empíricas utilizadas no cálculo de caudais de ponta de cheia¹⁴.

Considerando a tabela 4, onde são apresentadas algumas das fórmulas empíricas mais importantes no cálculo dos caudais de ponta de cheia, pode-se verificar quais os requerimentos necessários para o seu cálculo, sendo desta forma possível verificar que a

¹⁴ Adaptado de Martins, F. (1999)

fórmula de *Forty* e *Iskowski*, consideram a precipitação na bacia, embora apenas a última considere a precipitação média anual e a primeira, uma aproximação ao valor. É também importante referir que uma das diferenças entre as fórmulas é a sua aplicabilidade, sendo o tamanho da bacia hidrográfica um fator importante a considerar. Por outro lado, e ainda considerando a aplicabilidade, é necessário referir que a fórmula de *Iskowsky*, como *foi concebida com base em dados de cheias máximas de 289 rios da Europa Central, assim como, para bacias hidrográficas muito variadas, com regimes de chuvas regular e onde a uma mesma precipitação média anual corresponde menor número de precipitações intensas de curta e média duração* (Martins 1999). Segundo Martins (1999), a aplicação desta fórmula aos rios portugueses devolve valores de caudal abaixo do observável na realidade.

Tendo em consideração o anteriormente referido, podem ser encontradas algumas limitações nas fórmulas empíricas, dado que estas apresentam de forma muito simplificada a realidade em estudo, sendo o seu uso pertinente apenas em situações que não seja possível a aquisição de dados.

Por outro lado, foram desenvolvidos outro tipo de fórmulas, mais complexas e que implicam a utilização de mais parâmetros. As fórmulas cinemáticas, para o cálculo de caudais de ponta de cheia, utilizam parâmetros mais ajustados à realidade embora estas constituam, na mesma, uma simplificação da realidade. Este tipo de fórmulas pressupõe a noção e utilização *das características do movimento da água na bacia hidrográfica, traduzidas normalmente através do tempo de concentração e de chuvada crítica* (Martins 1999).

Não será pois possível passar a apresentação de algumas das diversas fórmulas existentes sem primeiro clarificar o conceito do tempo de concentração e fatores que se encontram associados a este parâmetro. O tempo de concentração pode ser definido como o *tempo gasto pela água, desde o início da bacia hidrográfica até a secção em estudo* (Costa and Lança 2011), por outras palavras pode ser considerado como *o tempo necessário para que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia atinja a secção considerada* (Martins 2000). O tempo de concentração é influenciado por alguns fatores naturais como a *forma da bacia, o declive médio da bacia, tipo de cobertura vegetal, comprimento e declividade do curso de água principal e afluentes, distância horizontal entre o ponto mais afastado da bacia e a sua saída, condições do solo em que a bacia se encontra no início da ocorrência de precipitação e ainda o coeficiente de rugosidade do canal de escoamento* (Costa and Lança 2011).

A forma da bacia, como foi referido, interfere diretamente no tempo de concentração, sendo que numa bacia mais arredondada, a velocidade das águas tende a ser menor, dado que os afluentes se encontram em secções mais próximas, por outro lado, bacias longitudinais tendem a apresentar valores de tempos de concentração mais elevados, dado que a distância média dos segmentos relativamente ao rio principal aumenta contribuindo assim, em teoria, a distância que a água precisa de percorrer até à secção considerada.

O declive médio da bacia, também é um dos fatores importantes no estudo do tempo de concentração, na medida em que uma bacia com um declive médio mais elevado, o tempo de concentração tende a ser menor, dado que a velocidade da água com o aumento do declive tende a aumentar, logo, com bacias hidrográficas mais planas o declive (apenas considerando este facto), tende a ser menor, promovendo assim uma maior concentração das águas.

O tipo e quantidade de cobertura vegetal, é outro fator essencial que influencia de forma significativa o tempo de concentração, dado que a vegetação ajuda na absorção de água, assim como uma maior desagregação do solo, através das raízes de plantas e árvores, que possibilita a infiltração da água. Desta forma, pode-se considerar que uma bacia hidrográfica com grande percentagem de área com coberto vegetal, tem teoricamente um tempo de concentração maior que outra com uma elevada percentagem de área artificializada, sendo ainda considerável o tipo de coberto vegetal existente que condiciona a quantidade de água absorvida, a quantidade de água que se infiltra e ainda a frequência com que a água chega ao solo, no caso da existência de árvores.

O comprimento, forma e declive do rio principal e afluentes, são dos fatores mais importantes a considerar, na medida em que o declive dita a velocidade com que a água tende a atingir o canal ou segmento considerado assim como a velocidade que esta atinge, em direção a jusante.

As condições do solo aquando do início do episódio de precipitação definem a quantidade e a que taxa a água é absorvida pelo solo, sendo que um solo previamente húmido devido a um episódio de precipitação anterior tende a absorver menos água que um solo mais seco (Allaby and Garratt 2003).

Por fim, o coeficiente de rugosidade, ou o coeficiente de rugosidade de *Manning* (Lyra, Cecílio et al. 2010), é a base para o cálculo da velocidade da água em canais abertos e/ou condutas de transporte de materiais em estado líquido, através da aplicação da equação de *Manning Strickler*. O valor deste coeficiente varia consoante o tipo de

material presente no solo e leito do rio. Os valores mais elevados correspondem a superfícies impermeabilizadas onde a velocidade da água tende a aumentar.

Como no caso das fórmulas empíricas, existem diversas fórmulas para o cálculo deste parâmetro, salientando-se algumas das fórmulas mais utilizadas em Portugal segundo alguns autores (Martins 2000, Martins, Pinheiro et al. 2003, Costa and Lança 2011), sendo estas apresentadas na tabela 5, assim como a sua aplicabilidade. Esta tabela sintetiza algumas fórmulas como a de *Kirpich* (Kirpich 1940), *Giandotti* (Giandotti 1953), *Ven Te Chow* (Chow 1962), *Schaake* (Schaake, Geiger et al. 1967), *Teméz* (Temez 1978), *Soil Conservation Service* (McCuen 1982) e *David* (David 1976).

Nome	Fórmula	Descrição de variáveis	Aplicabilidade
Fórmula de Kirpich	$TC = 0,0663 \frac{L^{0,77}}{i^{0,385}}$ $TC = 0,0663 \frac{L^{1,155}}{\Delta h^{0,385}}$	<p><i>TC</i> – Tempo de Concentração;</p> <p><i>L</i> – Comprimento do rio em Km;</p> <p><i>i</i> – Declive médio da bacia hidrográfica;</p> <p>Δh – Diferença de cotas entre as extremidades da linha de água principal (Km)</p>	Utilização recomendada para bacias hidrográficas rurais com canal bem definido e com declives compreendidos entre os 3 e 10%.
Fórmula de Giandotti	$TC = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,80 \cdot \sqrt{H}}$	<p><i>TC</i> – Tempo de Concentração (h);</p> <p><i>A</i> – Área da Bacia em Km²;</p> <p><i>L</i> – Comprimento do rio principal em Km;</p> <p><i>H</i> - altura média da bacia em m, medida a partir da altitude da secção considerada.</p>	Para a fórmula de Giandotti é aconselhável a aplicação a grandes bacias hidrográficas, dado que quando aplicada a pequenas bacias os valores de TC, tendem a ser sobrestimados.
Fórmula de Ven Te Chow	$TC = 0,8773 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0,64}$	<p><i>TC</i> – Tempo de Concentração;</p> <p><i>L</i> – Comprimento do rio principal em Km;</p> <p><i>i</i> – Declive do rio principal em m/km.</p> <p>α – Percentagem de áreas impermeáveis na bacia hidrográfica.</p>	Utilizado com sucesso para pequenas bacias hidrográficas, para dimensionar estruturas de drenagem e de obras rodoviárias.
Fórmula de Schaake	$TC = \frac{0,503L^{0,24}}{i^{0,16} \alpha^{0,26}}$	<p><i>TC</i> – Tempo de Concentração (Min);</p> <p><i>i</i> – Declive médio da bacia hidrográfica;</p> <p><i>L</i> – Comprimento do rio principal em Km;</p>	A equação proposta deve ser utilizada para bacias urbanas.
Fórmula de Temez	$TC = 0,3 \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76}$	<p><i>TC</i> – Tempo de Concentração (h);</p> <p><i>L</i> – Comprimento do rio principal em Km;</p> <p><i>i</i> – Declive médio da bacia hidrográfica(%).</p>	Bacias hidrográficas naturais com área até 3000 Km ² .

<p>Fórmula do Soil Conservation Service</p>	$TC = 1,67t_l$ $t_l = \frac{L^{0,8}(S_{mr} + 1)^{0,7}}{734,43 i^{0,5}}$ $S_{mr} = \left(\frac{25400}{CN}\right) - 254$	<p>t_l – Tempo de atraso (h); L – Comprimento do rio principal em Km; S_{mr} – Capacidade máxima de retenção; i – Declive médio da bacia hidrográfica(%). CN – Curve Number</p>	<p>A fórmula mais utilizada nos Estados Unidos, utilizada frequentemente para bacias hidrográficas rurais até 8 Km². No caso de bacias mistas a equação tende a sobrestimar o tempo de atraso.</p>
<p>Fórmula de David</p>	$TC = 0,000324 \frac{L^{1,15}}{\Delta h^{0,38}}$	<p>TC – Tempo de Concentração; L – Comprimento do rio principal em Km; Δh – Diferença de cotas entre as extremidades da linha de água principal (Km)</p>	<p>Utilizada para calcular o tempo de concentração para bacias hidrográficas até 25 Km².</p>

Tabela 5 - Algumas fórmulas mais utilizadas para o cálculo do tempo de concentração¹⁵.

Clarificado o conceito de tempo de concentração e apresentadas algumas das fórmulas mais utilizadas para o cálculo deste parâmetro, deve ser referido que estas fórmulas podem ser utilizadas para calcular o tempo de concentração em sub-bacias, assim como para bacias hidrográficas mais complexas e de maiores dimensões.

As fórmulas cinemáticas (tabela 6), como referido são mais utilizadas que as fórmulas empíricas, dado que entram em consideração com outros parâmetros que tornam os resultados mais fiáveis. Segundo Martins (2000), as fórmulas mais utilizadas em Portugal para o estudo das cheias são: a fórmula Racional, de *Giandotti* (Giandotti 1953), de David (David 1976), de *Temez* (Temez 1978) e de *Mockus*. No entanto, existem muitas outras fórmulas disponíveis para aplicação, sendo a sua utilização muito dependente dos dados disponíveis.

A fórmula de *Giandotti* já foi utilizada por Velhas (1991), para o cálculo dos caudais de ponta de cheia e respetiva construção de perímetros de inundação em setores restritos da bacia hidrográfica do rio Leça. A autora refere que de entre as fórmulas disponíveis, se adotou a de *Giandotti* por dois motivos: primeiro, a sua generalização em Portugal, estando consagrado pelo Regulamento de Pequenas Barragens e segundo, pela facilidade na sua utilização (Velhas 1991). A autora faz referência que comparando a fórmula de *Giandotti* com a fórmula estatística de Loureiro (será referida de seguida), as diferenças observadas são muito elevadas, tendo a fórmula de Loureiro resultado em valores de caudais demasiado elevados, quase o dobro dos valores de caudais verificados com a aplicação da fórmula de *Giandotti*.

¹⁵ Adaptado de Martins (2000), Costa e Lança (2011) e Martins, Pinheiro et. al. (2003).

*A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça:
Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos*

Nome	Fórmula	Descrição de variáveis	Aplicabilidade														
Racional	$Q_p = C.I.A$	<p>Q_p – Caudal de Ponta de Cheia;</p> <p>C – Coeficiente dado em Tabela, relativo ao tipo e ocupação do solo observados;</p> <p>I – Intensidade média da precipitação, para um determinado tempo de retorno com duração igual ao tempo de concentração da bacia. Em mm/h transforma-se em m/s.</p> <p>A – Área da Bacia em m²</p>	<p>Os valores do parâmetro C são estabelecidos por observação no local, sendo o valor deste parâmetro estático para todas as intensidades e duração das chuva.</p> <p>A utilização desta fórmula é recomendada para bacias hidrográficas com área inferior a 25Km².</p>														
Giandotti	$Q_p = \frac{\lambda A h_{max}}{T_c}$	<p>λ – Parâmetro em função da área – Dado em tabela;</p> <p>A – Área da bacia hidrográfica em Km²;</p> <p>h_{max} – Altura da precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração e um período de retorno, valores em mm;</p> <p>T_c – Tempo de Concentração (h);</p>	<p>A fórmula de Giandotti é um método de aquisição de caudais de ponta de cheia, muito generalizado em Portugal,</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Até 300</td> <td>0.346</td> </tr> <tr> <td>300 - 500</td> <td>0.277</td> </tr> <tr> <td>500-1000</td> <td>0.197</td> </tr> <tr> <td>1000-8000</td> <td>0.100</td> </tr> <tr> <td>8000-20000</td> <td>0.076</td> </tr> <tr> <td>20000-70000</td> <td>0.55</td> </tr> </tbody> </table>	A	λ	Até 300	0.346	300 - 500	0.277	500-1000	0.197	1000-8000	0.100	8000-20000	0.076	20000-70000	0.55
A	λ																
Até 300	0.346																
300 - 500	0.277																
500-1000	0.197																
1000-8000	0.100																
8000-20000	0.076																
20000-70000	0.55																
David	$Q_p = \frac{P_u A}{480,5 \left(0,6T_c + \frac{t_p}{2} \right)}$	<p>P_u – Precipitação útil;</p> <p>A – Área da bacia hidrográfica em ha;</p> <p>T_c – Tempo de concentração em h.;</p> <p>T_p – Precipitação útil (mm);</p>	<p>Para Bacias Hidrográfica com área inferior a 25Km²</p>														
Temez	$Q_p = \frac{C I A}{3}$ $C = \frac{(P_d - P_0)(P_d + 23P_0)}{(P_d + 11P_0)^2}$ $P_0 = \frac{5080}{CN} - 50,8$	<p>C – Coeficiente de escoamento da fórmula de Temez;</p> <p>I – Intensidade média de precipitação (mm/h);</p> <p>P_d – Precipitação máxima diária (mm);</p> <p>P_0 – Parâmetro relativo às perdas iniciais da chuva antes de se iniciar o escoamento superficial (mm);</p> <p>CN – Curve Number.</p>	<p>Temez elaborou esta fórmula e recomenda a sua utilização em bacias hidrográficas com menos de 75Km².</p> <p>Coeficiente de escoamento de Temez deve ser aplicado em pequenas bacias hidrográficas naturais.</p> <p>Os valores mais frequentes de perdas iniciais de chuva (P_0) variam entre 24 e 35mm.</p>														

Tabela 6 – Algumas fórmulas cinemáticas mais utilizadas para o cálculo do caudal de ponta de cheia¹⁶.

¹⁶ Adaptado de Martins (2000), Costa e Lança (2011) e Martins, Pinheiro et. al. (2003).

As fórmulas estatísticas são outro tipo de método que permite efetuar o cálculo de caudais de ponta de cheia numa determinada secção de um curso de água em função de um período de retorno, com base em registos de cheias anteriores (Martins 2000).

Uma das fórmulas estatísticas mais estudadas e aplicadas em Portugal é o modelo estatístico de Loureiro (Loureiro 1984, Martins 2000, Marafuz 2011). Este método foi elaborado com base em estudos para Portugal continental, desenvolvidos por F. Loureiro, onde foram delimitadas zonas e foram correlacionados os caudais de ponta de cheia, sendo estes analisados segundo a distribuição de *Gumbel*, com a área da bacia.

A distribuição de *Gumbel* (tabela 7), também conhecida como distribuição de eventos extremos é reconhecida como por vários autores como a função de distribuição que melhor se adapta a distribuição dos valores das precipitações extremas (Brandão, Rodrigues et al. 2001, Santos 2009).

Nome	Fórmula	Descrição de variáveis
Gumbel	$x = \bar{p} - 0,78 \cdot \left[\ln \left(\ln \left(\frac{T+1}{T} \right) \right) + 0,577 \right]$	P – Precipitação ponderada; T – Tempo de retorno.

Tabela 7 – Fórmula de distribuição de probabilidade de *Gumbel*¹⁷.

A aplicação da fórmula de Loureiro é muito utilizada em Portugal (continental), dado que é uma fórmula que permite a obtenção de caudais de ponta de cheia, de forma relativamente fácil e para áreas onde não é possível obter registos hidrometeorológicos (Maia, Mendes et al. 2010). Alguns autores referenciam que *no âmbito da regionalização de caudais de ponta de cheia em Portugal Continental*, F. Loureiro apresenta um trabalho pioneiro, *que resultou numa utilização frequente do método por ele criado*, embora seja também feita referência ao *formalismo simplificado* inerente ao mesmo. O estudo foi desenvolvido tendo por base 55 estações hidrométricas, mais concretamente os caudais máximos instantâneos anuais, que resultaram na fórmula $Q_p = C \cdot A^Z$, sendo Q_p o caudal de ponta de cheia, expresso em m³/s, para um período de retorno considerado, A corresponde a área da bacia hidrográfica em Km² e C e Z, correspondendo a parâmetros dados pela tabela 9, sendo a região expressa pela tabela 8.

¹⁷ Adaptado de Santos (2009).

*A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça:
Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos*

Localização Geral	Definição de Zonas
A Norte da Bacia do Tejo	<p>N₁-Bacias superiores do Cávado, Tâmega e Tua;</p> <p>N₂-Bacia do Lima, Bacia Intermédia do Cávado, Bacia Superior do Ave, Bacias inferiores do Tâmega e do Tua e Bacia superior do Sabor;</p> <p>N₃-Bacia inferior do Cávado, Ave, Douro, Vouga e Mondego;</p> <p>N₄-Bacia inferior do Sabor, Margem esquerda da Bacia do Douro a montante da confluência com o Rio Paiva, Bacias superiores do Vouga e Mondego.</p>
Bacia do Tejo	<p>T₁- Bacias superiores do Zêzere e bacias do Ponsul, Ocreza, Aravil e Erges (Válidos só para uma precipitação média anual inferior a 1400 mm);</p> <p>T₂- Bacias inferiores do Zêzere e bacias do Nabão, Alviela, Maior, Alenquer, Grande da Pipa, Tranção; bacias inferiores do Soraia e Candeeiros, serra de Montejunto e o litoral e na bacia do rio Lis, os valores deverão ser tomados com reserva;</p> <p>T₃- Bacia superior do Soraia, bacias da ribeira de Nisa e dos rios Sever e Caia.</p>
A Sul da Bacia do Tejo	<p>S₁- Ribeiras do Algarve, Baixo Guadiana e Alto Mira (válidos onde a precipitação média anual está compreendida entre os 500 mm e os 1000 mm);</p> <p>S₂- Alto Sado, bacias superiores do Xarrama, Degebe e Baixo Mira;</p> <p>S₃-Baixo Sado;</p> <p>S₄- Bacia do Guadiana, entre as zonas S1 e S2;</p>

Tabela 8 - Parâmetros regionais da Fórmula de Loureiro¹⁸.

Zona	Valor de Z	Valores de C						
		Período de retorno (anos)						
		5	10	25	50	100	500	1000
N₁	0,807	2,85	3,72	4,53	5,27	6,10	7,6	8,57
N₂	0,694	5,44	6,97	8,58	9,67	11,0	13,9	15,6
N₃	0,510	24,93	30,5	39,1	43,5	49,5	57,1	64,8
N₄	0,489	11,7	16,8	19,2	22,3	26,2	33,1	39,5
T₁	0,375	31,3	40,1	50,2	58,1	55,9	80,5	94,4
T₂	0,466	19,2	26,3	34,7	42,2	48,3	66,2	72,3
T₃	0,761	3,66	4,49	5,58	6,02	8,45	9,60	11,0
S₁	0,784	3,45	4,40	5,40	6,24	7,09	8,97	9,88
S₂	0,738	3,39	4,28	5,54	6,44	7,40	9,50	10,7
S₃	0,816	1,66	2,09	2,58	2,98	3,37	4,27	4,75
S₄	0,745	2,30	3,06	3,68	4,12	4,94	6,23	7,27

Tabela 9 - Valores de Z, conforme a zona e valores de C consoante o período de retorno, para a fórmula estatística de Loureiro¹⁹.

¹⁸ Extraído de Martins (2000).

¹⁹ Extraído de Martins (2000).

Tendo sido referidos duas das três etapas para a delimitação de perímetros de inundação, é necessário referir a última etapa, a delimitação cartográfica dos perímetros de inundação assim como a altura da coluna de água.

Considerando os métodos convencionais e semiautomáticos, tentar-se-á explicar de forma sintética, cada um deles e apresentar uma comparação, assim como, um quadro síntese onde sejam visíveis vantagens e desvantagens da utilização de cada um dos métodos.

Considerando o método convencional, e tendo em consideração que já se obteve o caudal de ponta de cheia, existe a necessidade de criar perfis ou secções transversais. Para este efeito, pode ser utilizado cartografia pré-existente ou efetuar medições no campo através de um levantamento topográfico, sendo importante salientar que é necessário saber a *altura da água a partir do talvegue e obter informações sobre o tipo de revestimento do leito menor, com o intuito de determinar o coeficiente de rugosidade do canal* (Marafuz 2011). As medições realizadas permitem obter dados essenciais para o cálculo de *parâmetros hidráulicos que indicarão a superfície livre de escoamento* (Velhas 1991, Santos 2009, Marafuz 2011).

O caudal pode ser definido como uma *função entre a largura, profundidade e da velocidade e, uma vez esta última depende de características hidráulicas como o raio hidráulico, a inclinação do leito e o coeficiente de rugosidade da superfície* (Lencastre and Franco 1992) ,sendo que a conjugação destes parâmetros determinará a velocidade que a água passa por cada uma das secções consideradas.

A tabela 10 sintetiza os parâmetros hidráulicos mais utilizados, assim como a aplicação de algumas fórmulas para o seu cálculo.

Marafuz (2011), refere a importância de conhecer o declive da superfície livre da água, sendo que esta utilizou o *software* Autocad, para traçar circunferências no canal. A autora dividiu cada circunferência *em dez partes iguais, tendo sido determinado para cada fração da margem direita e esquerda, o ângulo de inclinação da superfície. O procedimento passou pela escolha da cota mais próxima de uma das frações, à qual se subtraiu a cota do talvegue ou da secção anterior. De seguida multiplicou-se este valor pela equidistância entre as frações e o resultado obtido foi dividido pela distância entre o início da fração e a cota mais próxima.*

Parâmetro Hidráulico	Descrição	Fórmula	Bibliografia
Raio Hidráulico	Calculado pelo quociente entre a secção molhada que corresponde à secção ocupada pelo escoamento e o perímetro molhado.	$R_h = \frac{A}{P_m}$ <p>R_h – Raio Hidráulico A – Área da secção transversal de fluxo P_m – Perímetro molhado.</p>	Marafuz (2011) (Costa and Lança 2001) Lencastre e Franco (1992)
Inclinação da superfície livre da água	Calculado pela subtração do talvegue da secção a jusante pela secção a montante, dividindo-se o resultado pela distancia entre as duas secções consideradas.	$ISLA = \frac{(T_j - T_m)}{D}$ <p>$ISLA$ – Inclinação da superfície livre da água; T_j – Cota talvegue a Jusante T_m – Cota talvegue a Montante D – Distância entre talvegues</p>	Marafuz (2011)
Coefficiente de rugosidade	Estes valores são fornecidos em tabela, sendo necessário fazer uma correspondência (em muitos casos aproximada) aos valores observados no campo.	Não aplicável	(Brunner 2008) (Marafuz 2011) (Sande, Jong et al. 2003)

Tabela 10 - Parâmetros hidráulicos e sua descrição, fórmulas e bibliografia²⁰.

Para se determinar a superfície livre de escoamento, para os caudais máximos estimados, deve ser utilizada a fórmula de *Manning-Strickler*, dada pela seguinte expressão: $Q = Ks.S.R^{2/3}.I^{1/2}$ ²¹, correspondendo o parâmetro Ks ao coeficiente de rugosidade de *Manning*, S a área da seção molhada, R o raio hidráulico, e I o declive entre secções consideradas.

A utilização da ferramenta *Solver* disponível no *software MS Excell*, é recomendado, dado que este permite a obtenção das alturas das águas para as várias secções.

Por fim, para a representação da altura da água nos perfis transversais criados, basta somar a cota do talvegue com a altura da água de cada secção (valores obtidos

²⁰ Adaptado de Marafuz (2011).

²¹ http://www.sd-w.com/civil/mannings_formula.html

com a utilização da ferramenta *Solver*), permitindo a representação quer nos perfis transversais quer através do *software* Autocad quer em ambiente SIG.

A existência de métodos hidráulicos semiautomáticos permite uma maior eficiência na criação e gestão de modelos de cheia. Estes, podem ser articulados com modelos hidrológicos permitindo desta forma uma maior eficácia de previsão dos modelos. Ao contrário dos modelos convencionais, os modelos hidráulicos semiautomáticos, podem ser facilmente aplicados a uma bacia hidrográfica, não estando dependente da sua dimensão.

Relativamente ao *software* para a modelação hidráulica, o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers – River Analysis System*) apresenta-se como um *software* amplamente usado pela comunidade científica (Meyer, Scheuer et al. 2008). Este programa, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center*, para o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e financiado pelo Governo Federal dos Estados Unidos, permite de forma expedita a criação de modelos de cheia/inundação.

O programa foi desenvolvido como a “nova geração de *software*” para a modelação unidimensional hidráulica, permitindo a integração com outros *softwares*, nomeadamente HEC-HMS, que permite a criação e manutenção de um modelo hidrológico para determinada bacia hidrográfica, HEC-RESIM, que permite a simulação em sistemas de reservatórios ou barragens, HEC-FDA e HEC-FIA, que possibilita uma avaliação de dano causado por determinada cheia e ainda monitorização em tempo real de rios para apoio a barragens através do *software* CWMS (Warner, Brunner et al. 2009).

Este *software* além de possibilitar a modelação da cheia com base em fluxo constante (*Steady Flow*) e fluxo instável ou turbulento (*Unsteady Flow*), onde é considerado o fator tempo, calculado com base num hidrograma, quando o *software* efetua os cálculos, permite ainda efetuar outras simulações como análises à qualidade da água, transporte de sedimentos (Warner, Brunner et al. 2009) ou ainda a simulação de rotura de uma barragem (Cramptom 2007).

Este programa executa *cálculos hidráulicos unidimensionais para redes de canais fluviais naturais ou artificiais, em regime variado e permanente* (Santos 2009), resultando um tema em formato vetorial com o limite da cheia e um tema *raster* com o limite da cheia e altura da coluna de água. Como referido, este *software* é utilizado praticamente em todo o mundo, salientando-se que a sua prática é generalizada nos Estados Unidos, onde foi desenvolvido, onde é inclusivamente utilizado não só por

organismos públicos, assim como para a realização de seguros contra cheias/inundações (FEMA 2001). Outros países que utilizam este *software* são: o Canadá (Hicks and Peacock 2005), a Turquia (Sunkar and Tonbul 2011), Itália (Pistocchi and Mazzoli 2002), Timor (Calçada, Portela et al. 2003) e mesmo em Portugal, onde existem alguns estudos já com a aplicação deste método, quer em secções da bacia hidrográfica do rio Arunca (Santos 2009), quer noutros locais nomeadamente, nos trabalhos de projeto de pontes (Lança, Martins et al. 2005).

O *software* HEC-RAS, permite a integração com modelos hidrológicos, nomeadamente o programa HEC-HMS, também criado pelo *Hydrologic Engineering Centers*, e a sua extensão para o programa ArcGis (® ESRI), HEC-GeoHMS, permite a criação de inputs necessários, nomeadamente ao nível da delimitação de bacias hidrográficas e conectividade entre sub-bacias que mais tarde são importadas no programa HEC-HMS. Juntamente com valores de precipitação, permite o cálculo de valores de caudal, escoamento, etc., podendo os mesmos ser utilizados no *software* HEC-RAS. Por outro lado, existe uma extensão para o programa ArcGis, HEC-GeoRAS, que permite a criação de ficheiros de geometria necessários para que o utilizador não tenha que inserir toda a informação manualmente, processo moroso e trabalhoso dado que o programa precisa de muita informação de base para que se obtenham resultados de qualidade.

Relativamente às etapas de trabalho, deve ser referido que, como no método apresentado anteriormente, este conta com três etapas fundamentais, sendo a primeira a aquisição e tratamento de ficheiros de geometria e geração de MDT, o cálculo dos caudais de ponta de cheia a serem utilizados e o tratamento dos dados com vista a representação gráfica dos resultados.

Num primeiro ponto, convém fazer referência aos dados geométricos e também à qualidade do MDT, que é fulcral, dado que quanto maior for a resolução altimétrica deste melhores serão os resultados obtidos. Alguns autores referem que o MDT deve ser construído com informação de base no mínimo à escala 1:10.000 ou uma equidistância de 5 metros entre as curvas de nível, pois se for utilizada cartografia a escalas menores, os resultados obtidos são muito generalizados perdendo o rigor que se pretende atingir com este tipo de cartografia (Calçada, Portela et al. 2003, Santos 2009).

Os ficheiros geométricos criados no HEC-GeoRAS (Ackerman 2011), necessários para o cálculo e definição da extensão da cheia são os que se referenciam na tabela 11.

A tabela 11 sintetiza alguns dos ficheiros de geometria necessários para o programa *HEC-RAS* produzir os resultados pretendidos. Estes podem ser obrigatórios ou não. A sua utilização depende por um lado da sua existência, e por outro do objetivo do operador. Convém fazer referência que quanto mais informação de base o programa tiver disponível melhor serão os resultados apresentados, isto é, se forem incorporados elementos no modelo como pontes, edifícios, muros, diques ou outros elementos geométricos existentes na área a modelar, eles irão exercer a sua influência no modelo, resultando daí um modelo mais aproximado à realidade.

Tipo de elemento		Geometria	Obrigatoriedade
Português	Inglês		
Centro geométrico do canal	River	Linha	Sim
Margens	Banks	Linha	Não
Direção do fluxo da água	Flowpaths	Linha	Não
Perfis transversais	XSCutlines	Linha	Sim
Uso do Solo	LandUse	Polígono	Não
Pontes	Bridges	Linha	Não
Áreas sem movimento de água	IneffAreas	Polígono	Não
Obstruções	BlockedObs	Polígono	Não
Diques	Levee	Polígono	Não
Muros	InlineStructures	Linha	Não
Estruturas laterais	LateralStructures	Linha	Não
Áreas de armazenamento de água	StorageAreas	Polígono	Não

Tabela 11- Elementos geométricos, tipo de implementação e obrigatoriedade²².

A segunda etapa refere-se à escolha do modo de simulação propriamente dito. Existem dois modos de fazer a simulação, podendo esta ser do tipo “*Steady*” ou “*Unsteady*”. A escolha do tipo de simulação a realizar depende do objetivo que se pretende alcançar, sendo os dados de entrada necessários muito diferentes para cada uma das simulações.

O modo de simulação *Steady Flow*, como referido anteriormente permite a modelação em modo de fluxo constante, ou seja o operador escolhe as condições de descarga e o modelo propaga as mesmas condições por todas as secções consideradas, existindo um fluxo constante de água a passar por todas as secções. Este método é muito utilizado para o estudo das cheias progressivas dado que com muita facilidade

²² Adaptado de Ackerman (2011)

podem ser estimados caudais de ponta de cheia, com base em diferentes fórmulas e períodos de retorno, não sendo necessário utilizar hidrogramas de cheias (Santos 2009).

A simulação do tipo *Unsteady Flow*, ou fluxo turbulento, é o oposto da primeira simulação. Este modelo necessita de muita informação para ser corretamente utilizado, nomeadamente ao nível do hidrograma de cheia, profundidade normal do rio, etc.. O utilizador neste modo introduz o hidrograma de cheia no limite a montante e uma classificação de descarga a jusante, o modelo calcula então a descarga entre secções.

Sendo modelos completamente distintos, a simulação constante ou *Steady* é classificada como cinemática, porque o valor de descarga é o mesmo para todas as secções consideradas, não havendo um ajuste em função do tempo, no modelo turbulento ou *Unsteady* existe esse ajuste, e o modelo calcula de forma dinâmica²³ a descarga, consoante as classificações dadas pelo operador (Brunner 2008).

Tendo sido escolhido o modo de simulação, e apenas no caso do *Steady Flow*, o operador pode introduzir valores de caudal para diferentes períodos de retorno, assim como o declive do leito (Santos 2009).

Tendo sido os parâmetros preenchidos, é necessário correr a simulação e importar os resultados no ArcMap para fazer o restante tratamento. A nível de resultados, o HEC-RAS exporta vários ficheiros, entre os quais um RIT (rede irregular de triângulos), com as alturas da água para cada perfil transversal traçado. Este irá ser convertido em formato matricial e subtraído automaticamente ao MDT da área em estudo para se ficar com as cotas das alturas da água, sendo a informação armazenada num ficheiro *raster* onde cada um dos pixéis tem uma informação de cota. Além desse ficheiro, ainda se obtém um limite vetorial da extensão da cheia e todos os ficheiros geométricos que foram importados para o HEC-RAS.

Tendo sido expostos os dados de entrada em ambos os métodos, as operações matemáticas que são necessárias (no caso do método convencional) e as simulações (possíveis de ser aplicadas no modelo hidráulico), construiu-se a tabela 12, que apresenta uma comparação direta, ao nível de vantagens e desvantagens, entre o método convencional e hidráulico.

Embora os dois métodos apresentados sejam robustos e permitam a representação do perímetro de inundação, optou-se por no presente trabalho utilizar o método hidráulico para a modelação de dois segmentos do rio Leça. A sua escolha

²³ http://saltonseasdsu.edu/legacy_tales_steady_unsteady_hec_ras.html

dependeu da quantidade e qualidade de dados disponíveis e também porque este é um método que pode ser aplicado de forma rápida e eficiente.

	Método Convencional	Método Hidráulico
Vantagens	<p>Modelação rigorosa em troços específicos do rio, i.e. áreas mais afetadas;</p> <p>A utilização das fórmulas para simulação não está dependente do <i>software</i>, podendo o operador escolher a fórmula mais indicada para a bacia em estudo.</p> <p>O perímetro de inundação pode ser obtido através das cotas de altura da água e morfologia do terreno.</p>	<p>Permite a criação de modelos de bacia hidrográfica, sendo possível incorporar dados de precipitação real;</p> <p>Permite criar modelos dinâmicos ou cinemáticos;</p> <p>Modelação automática;</p> <p>Os resultados devolvem extensão da cheia, altura da coluna de água, informação da velocidade de água;</p> <p>Possibilidade de criar ficheiros de geometria e de caudal de forma expedita;</p> <p>Processo relativamente rápido.</p>
Desvantagens	<p>Aquisição e tratamento de dados moroso, nomeadamente através da aquisição de dados altimétricos, sendo o tempo despendido em campo proporcional ao tamanho da área em análise;</p> <p>Para algumas fórmulas cinemáticas devem ser utilizados valores de precipitação contínuos (30 anos);</p> <p>Preparação e tratamento dos dados de campo em gabinete moroso.</p>	<p>Necessita de informação de base detalhada, nomeadamente o MDT, sendo que no mínimo a informação deve estar a escala 1:10.000. Por outro lado o software apresenta limitações na inclusão de obstáculos e muros, sendo que neste último só se pode inserir 1 por margem do segmento modelado, neste sentido é necessário incorporar o máximo de elementos possíveis no MDT;</p> <p>Limitação, em Portugal, nos dados udométricos e meteorológicos disponíveis, o que compromete a integração com o software HEC-HMS.</p> <p>Limitado a duas simulações disponíveis em regime contínuo de escoamento ou em regime turbulento.</p>
Dados de Base	<p>Dados udométricos;</p> <p>Ortofotomapas;</p>	<p>Cartografia altimétrica rigorosa;</p> <p>Planimetria;</p> <p>Dados Pluviométricos e udométricos (para integração com modelos hidrológicos).</p> <p>Ortofotomapas.</p>

Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do método convencional comparativamente ao método Hidrológico-Hidráulico²⁴.

²⁴ Adaptado de Marafuz (2012).

2.2. Metodologia HEC-RAS

2.2.1. Pré-Processamento dos dados

O primeiro passo consistiu na recolha de informação que iria ser trabalhada, nomeadamente os ficheiros geométricos que foram utilizados como base para a construção dos modelos digitais de terreno. Com efeito, foram criados dois modelos digitais de terreno, dado que se trabalharam duas escalas diferentes: A primeira ao nível da bacia hidrográfica e a segunda mais local, onde se utilizou cartografia de base muito detalhada.

A tabela 13 sintetiza a informação utilizada, sendo que antes de serem utilizados os dados para a construção dos modelos digitais de terreno, estes tiveram que ser convertidos para formato vetorial e corrigidos alguns erros, nomeadamente espaçamentos nas curvas de nível, e no caso da cartografia municipal de Matosinhos, alguma informação teve que ser eliminada como o caso da grelha exterior e legenda das cartas.

O processo de construção do MDT de Matosinhos foi moroso, dado o elevado número de cartas que compõe o município, optando por construir um modelo de extração para agilizar o processo.

MDT	Dados de base	Equidistância das curvas de nível	Dados utilizados	Resolução espacial do MDT
Bacia Hidrográfica do Rio Leça	Cartas militares de Portugal, Folhas: 97; 98; 110; 111; 122.	10 Metros	Curvas de Nível Pontos Cotados Rede Hidrográfica	10 Metros
Concelho de Matosinhos	Cartografia Municipal de Matosinhos (207 cartas)	1 Metros	Curvas de nível Pontos Cotados Rede Hidrográfica Rede Viária Edificado	1 Metros

Tabela 13 - Dados de Base, para Construção dos Modelos Digitais de Terreno.

A figura 17 representa parte do modelo utilizado na extração da informação vetorial da Cartografia Municipal de Matosinhos, que contou com aproximadamente 180 processos.

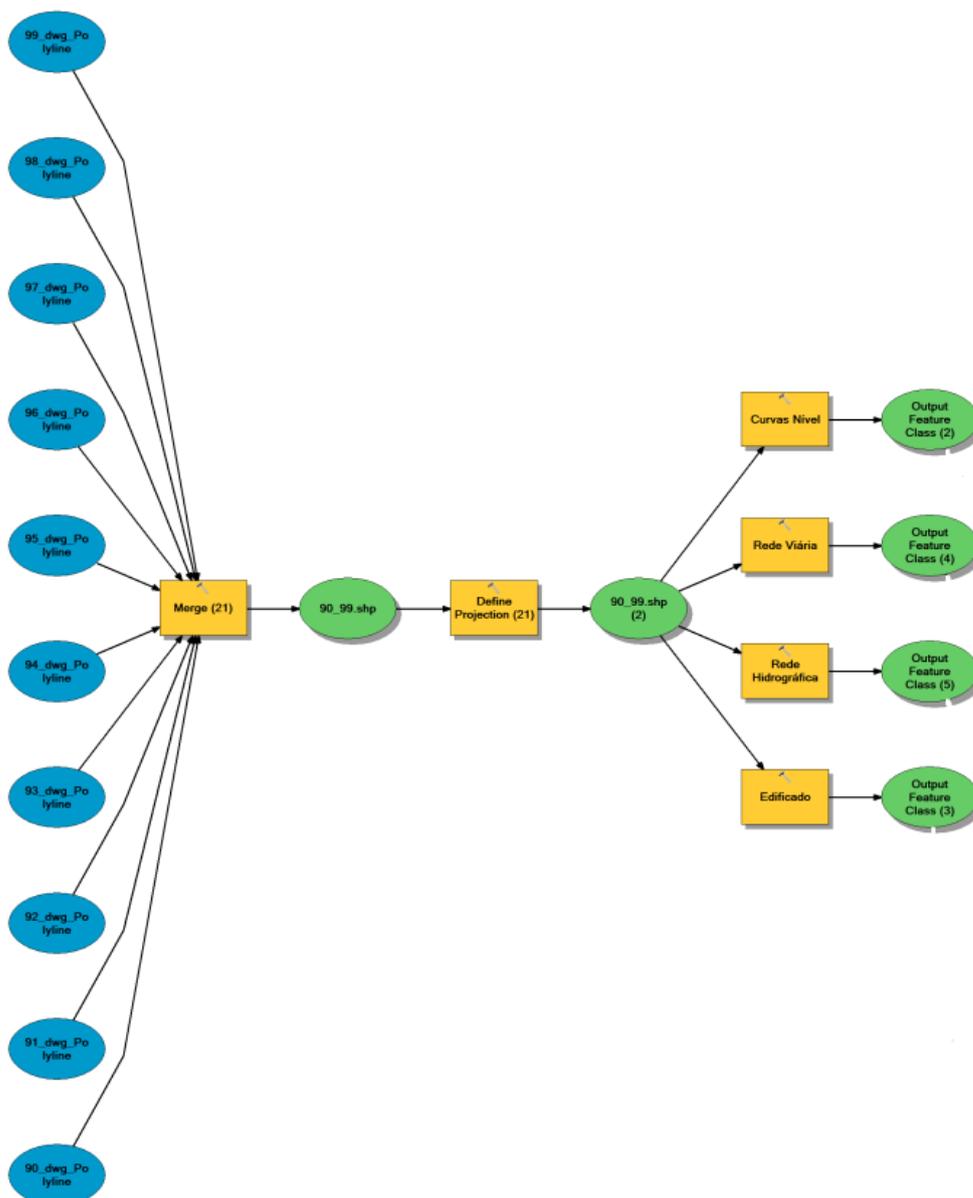


Figura 17 - Parte do Modelo Utilizado para Extração da Informação Linear da Cartografia Municipal de Matosinhos.

Este apenas contempla uma parte do processo, ou seja a extração da informação linear. Não foi possível, devido ao tamanho dos ficheiros, criar um ficheiro único com toda a informação para depois se executarem as seleções, uma vez que se limitou a agregação da informação a 10 cartas, as quais foram unidas, definida a projeção, neste caso *Datum 73 IPCC*, e separadas por temas de informação. Foi efetuado uma junção dos elementos de cada tema de, englobando nesse ficheiro toda a informação relativa a dado tema no concelho de Matosinhos, sendo assim possível criar o MDT²⁵.

²⁵ Depois de se ter preparado a informação, e agrupado por temas, as curvas de nível foram verificadas, removendo-se valores incorretos de cota através de edição.

2.2.2. Delimitação da bacia hidrográfica

A construção da bacia hidrográfica do rio Leça foi realizada utilizando um processo semiautomático, com recurso a uma extensão do ArcMap, denominada Hec-GeoHMS. Esta extensão permite criar dados de base, modelos de bacia hidrográfica que contêm informação hidrológica assim como elementos de conectividade entre bacias, modelos meteorológicos, etc., que servem de base ao processamento hidrológico no HEC-HMS.

Esta extensão possibilita ao operador apenas através do modelo digital de terreno, delimitar uma bacia hidrográfica rapidamente, sendo possível aperfeiçoar o modelo com recurso à rede hidrográfica.

A figura 18 resume os procedimentos efetuados para a construção da bacia hidrográfica. O primeiro passo consistiu em incorporar a rede hidrográfica existente no modelo digital de terreno. Para realizar esta operação utilizou-se a ferramenta *Dem Reconditioning*, que permite adicionar a rede hidrográfica no MDT, afundando as células por onde a rede hidrográfica flui, sendo que foi utilizado o valor de um metro nesta operação. Com o MDT alterado, utilizaram-se uma série de ferramentas que visam a criação da rede hidrográfica e delimitação da bacia:

- *Fill Sinks* – Esta ferramenta remove grandes depressões existentes no MDT, elevando as células deprimidas para a cota aproximada das células vizinhas;
- *Flow Direction* – Define a direção da descida mais acentuada para cada célula do terreno;
- *Flow Accumulation* – Determina o número acumulado de células a montante de uma célula.
- *Stream Definition* – Utiliza o tema *Flow Accumulation* e cria um tema de rede hidrográfica com base em limiares (em termos de número de células) impostos pelo operador;
- *Stream Segmentation* – Cria um tema *raster* onde são divididos os segmentos onde existe uma confluência com um novo segmento;
- *Catchment Grid Delineation* – Esta ferramenta cria sub-bacias para cada segmento, com base na segmentação anterior.

- *Drainage Line Processing* – Converte o tema *Stream Segmentation* para um tema vetorial, com informação de conectividade entre os segmentos;
- *Catchement Polygon Processing* – Faz a conversão para um modelo vetorial das sub-bacias criadas com a ferramenta *Catchement Grid Delineation*
- *Watershed Agregation* – Utiliza os temas vetoriais das sub-bacias hidrográficas e da rede hidrográfica e faz a união de todas as sub-bacias com os mesmos tributários;

O processo mencionado é praticamente automático, sendo apenas necessário ao operador escolher o *output* da ferramenta anterior para servir de *input* para a ferramenta seguinte, pelo que se torna bastante rápido e fácil de gerar a bacia. No final de todo o processo, houve a necessidade de fazer algumas correções na bacia hidrográfica gerada pelo programa, dado que a parte terminal da bacia hidrográfica não era gerada. Foi decidido utilizar a rede hidrográfica para modificar o MDT, dado que em todas as experiências que foram realizadas, a rede hidrográfica gerada pelo *software* não era aproximada da realidade, nomeadamente no sector terminal, onde o software criava mais segmentos do que aqueles que eram observáveis na realidade.

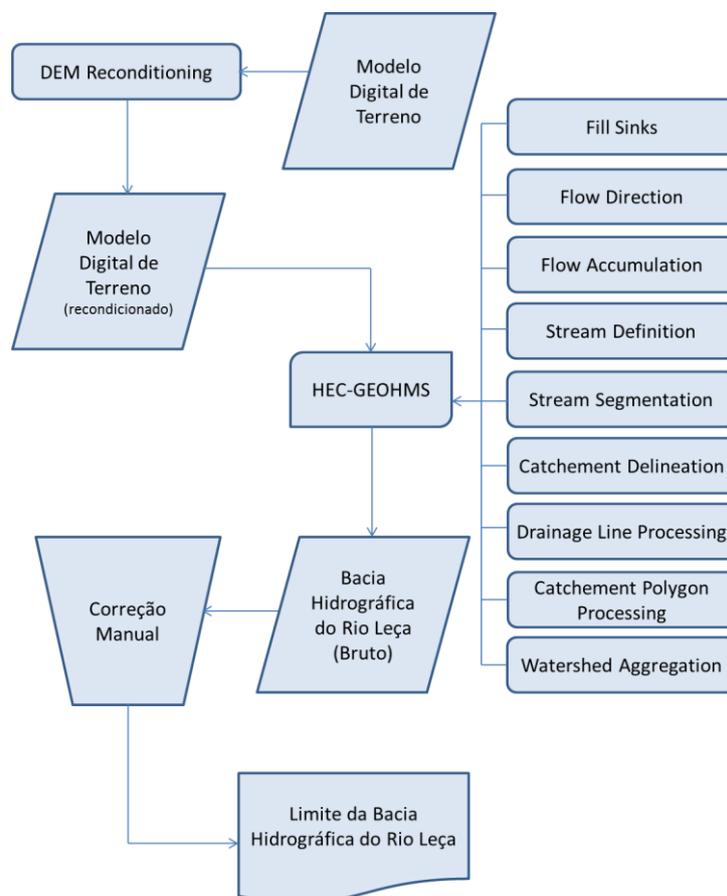


Figura 18 - Esquema Metodológico Seguido na delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Leça.

2.2.3 Modelo Hidráulico

Para serem atingidos os objetivos propostos, decidiu-se utilizar o *software* HEC-RAS, que presentemente se encontra na versão 4.1.0. Este, como referido, permite fazer análises unidimensionais de dois tipos, do tipo constante ou do tipo turbulento. Não dispondo da informação para trabalhar as análises do tipo inconstante ou turbulento, decidiu-se efetuar uma análise de fluxo constante para as duas áreas referidas anteriormente.

Estas análises consistem na modelação de dois setores do rio Leça, para cheias do tipo progressivo, para três períodos de retorno distintos. A figura 19 ilustra conceptualmente o processo de trabalho realizado, podendo este ser dividido em três fases distintas, nomeadamente a aquisição dos dados, o pré-tratamento e processamento dos dados e processamento dos dados e representação da informação.

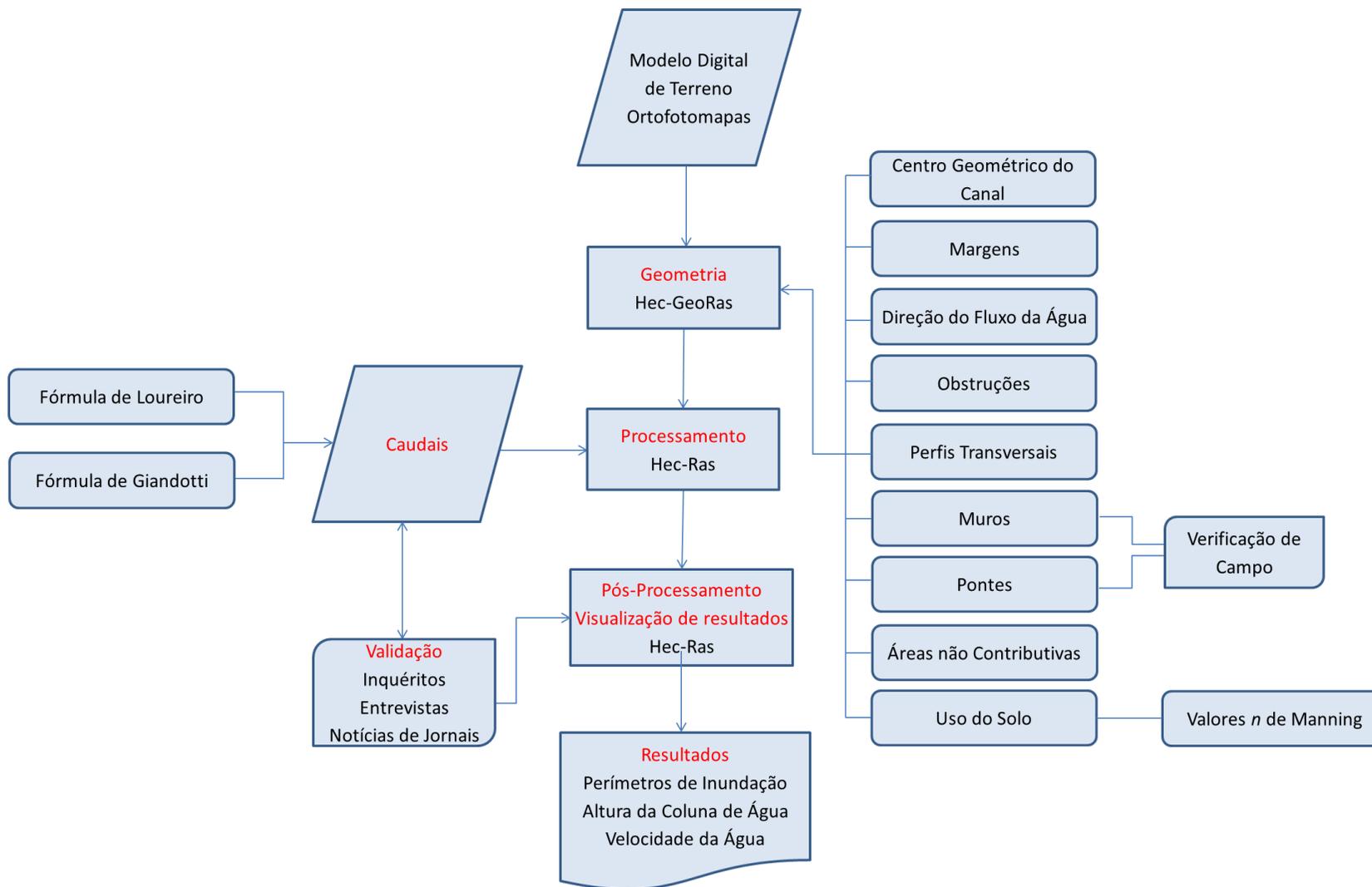


Figura 19 -Esquema Metodológico de Aplicação do Método Hidráulico.

2.4 Aquisição de dados

Para o correto funcionamento do *software*, assim como para serem gerados resultados fiáveis, foi necessário verificar que tipo de informações o *software* necessitava para funcionar corretamente e verificar a resolução espacial dos dados necessários para serem gerados os melhores resultados possíveis.

Através da leitura dos manuais do *software* (Warner, Brunner et al. 2009, Ackerman 2011), foi possível verificar que para as análises do tipo fluxo constante o *software* apenas necessitava de dois tipos de informação, nomeadamente informação do tipo geométrico e informação relativa aos valores de caudais a ser utilizados no processamento dos dados.

Como referido inicialmente, foram escolhidas duas áreas de estudo, ambas em Matosinhos. Inicialmente, pensou-se modelar apenas uma única área que começaria no sector de Leça do Balio e terminaria em Santa Cruz do Bispo, abrangendo parte do município da Maia.

Neste sentido, foram contactadas as duas câmaras municipais para averiguar se haveria disponibilidade em fornecer a cartografia que se sabia de antemão, ser extremamente detalhada (1:1000). As duas câmaras acederam ao pedido, disponibilizando a informação. A informação vetorial da Câmara Municipal de Matosinhos apresentava-se muito completa, enquanto a disponibilizada pela Câmara Municipal da Maia não tinha qualquer informação de cota nas curvas de nível. Dado que seria um processo extremamente moroso fazer a correção manual dos dados, decidiu-se apenas utilizar a cartografia de Matosinhos.

Por outro lado, foi necessário decidir quais as fórmulas que seriam utilizadas para a estimar os valores de caudal. Para este efeito, decidiu-se utilizar duas fórmulas distintas, a fórmula de Loureiro e a fórmula de *Giandotti*, a primeira dada a sua ampla utilização e aceitação em Portugal Continental e a segunda dado que foi utilizada num trabalho realizado sobre cheias progressivas na bacia hidrográfica do rio Leça (Velhas 1991), sendo os valores calculados nesse trabalho utilizados como referência. Acresce que o referido trabalho abrangeu a área que se decidiu modelar.

Foram adotados os valores estimados de caudal deste trabalho, dada a insuficiência de dados de precipitação nas estações nomeadamente ao nível de séries contínuas de 30 anos. Edite (1991) refere que *a densidade de estações meteorológicas e postos udométricos na bacia é manifestamente insuficiente, pelo que se consideraram*

algumas estações periféricas, permitindo o cálculo de valores ponderados para o conjunto da bacia. (...) O reduzido período de funcionamento de alguns postos, assim como a irregularidade de registos noutras, impuseram limitações à duração das séries a analisar (...). A utilização dos caudais estimados neste trabalho permitem ainda uma comparação direta entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos pela autora.

2.5 Tratamento e Pré-processamento dos dados.

Neste ponto serão discutidos duas etapas distintas. Inicialmente, será apresentado o processo desenvolvido para criar os ficheiros de geometria necessários ao correto funcionamento da modelação no *software*, assim como, uma explicação de cada uma das variáveis que compõe o ficheiro geométrico que será incorporado nos cálculos do *software* HEC-RAS, bem como a apresentação dos caudais utilizados para cada um dos sectores em estudo.

Para a vectorização de ficheiros geométricos, foi utilizado o *software* HEC-GeoRAS, sendo este uma extensão do *software* Arcmap. Este permite a integração com a vertente gráfica do Arcmap, tornando mais fácil e intuitiva a vectorização dos elementos necessários, tendo sido esta extensão desenvolvida unicamente com o objetivo de facilitar a criação e inserção de dados no HEC-RAS, assim como exportar e visualizar os resultados (Ackerman 2011).

O único dado de base necessário para começar a trabalhar o processo é um MDT, em formato vetorial²⁶, no entanto é também recomendável a utilização de ortofotomapas. A escala da cartografia de base é essencial para assegurar a fiabilidade dos resultados. Embora este facto não conste nos manuais do HEC-RAS, alguns trabalhos referem a importância deste aspeto, acrescentando que é necessária cartografia pelo menos à escala 1:10.000 (ou seja uma equidistância de 5 metros nas curvas de nível) para assegurar alguma fiabilidade dos resultados (Calçada, Portela et al. 2003, Cook and Merwade 2009, Santos 2009).

Inicialmente, é necessário utilizar o *software* HEC-GeoRAS para criar, vectorizar e definir os atributos dos elementos que irão ser incluídos no modelo, sendo criadas

²⁶ Também designado por TIN ou Triangulated Irregular Network

nove variáveis distintas, sendo estas organizadas numa *Geodatabase*, à medida que o *software* cria as novas *Layers*.

A primeira *layer* de informação criada corresponde ao centro geométrico do rio, ou como é descrito no *software*, o *river centerline* (figura 21 A). Esta linha define o centro geométrico do canal ou dos canais, sendo utilizada quer para identificar a existência de um segmento de rio, quer para organizar topologicamente os segmentos, sendo traçada com auxílio do MDT e de ortofotomapas.

Além de assinalar o eixo central do canal de escoamento, este elemento ainda contém informação topológica, onde se define o início e o fim de cada segmento. Este eixo permite ainda a possibilidade de conversão da linha para 3D, através da extração das cotas do MDT. No final da vectorização do elemento deve ser atribuído um nome e uma tipologia aos segmentos criados.

Algumas regras devem ser tidas em consideração quando se trabalha este elemento nomeadamente:

- O centro geométrico do canal deve ser sempre vectorizado de montante para jusante;
- Quando existe alguma confluência, e caso se queira modelar o afluente, deve ver vectorizado o canal principal até ao ponto de confluência, vectorizar o afluente até ao ponto de intersecção com o canal principal, tendo a certeza que o último vértice final do afluente corresponde ao último vértice do canal principal;
- Este tipo de elemento não pode intercalar outro do mesmo tipo.

Tendo sido criadas as linhas correspondentes à rede hidrográfica é necessário criar um novo tipo de elemento linear: as margens do rio, denominadas como *BankLines* pelo *software* (figura 21 B). Embora este elemento geométrico não seja obrigatório para a construção do modelo, estas são um elemento importante pois definem o leito menor. A vectorização deste elemento foi efetuada com auxílio apenas do modelo digital de terreno, dado que estas estavam bem demarcadas. Embora o manual do HEC-GeoRAS não defina um conjunto de regras essenciais para a vectorização deste elemento convém fazer referência aos seguintes aspetos:

- A vectorização das margens deve ser feita de montante para jusante, da esquerda para a direita;

- Os perfis transversais não podem cruzar mais que duas linhas de margem (direita e esquerda);
- As margens podem ser vetorizadas de forma contínua ou descontinuada;

A direção do fluxo de água é outro tipo de elemento linear, que embora não seja obrigatório define a direção do fluxo de água. Santos (2009) *refere que consistem em linhas que definem o centro de massa do escoamento fluvial que ocorre no leito maior, na margem esquerda e direita da linha de água. A sua definição não é isenta de alguma subjetividade, tendo-se optado por traçar estas linhas a meio das áreas de menor declive (declive inferior a 2%)*. Assim foi necessário desenhar 3 linhas, uma correspondente à margem direita, outra correspondente à esquerda e a terceira linha corresponde ao centro geométrico do canal traçado anteriormente. Caso não se opte por desenhar a direção do fluxo de água, deverá ser adicionado manualmente as distâncias entre os perfis transversais (Ackerman 2011).

Os perfis transversais ou como preconizados no *software cross-sectional cut lines* (figura 20 e 21), representam a morfologia do vale em corte transversal. As linhas do perfil transversal agregam quase todos os outros elementos, designadamente os valores de

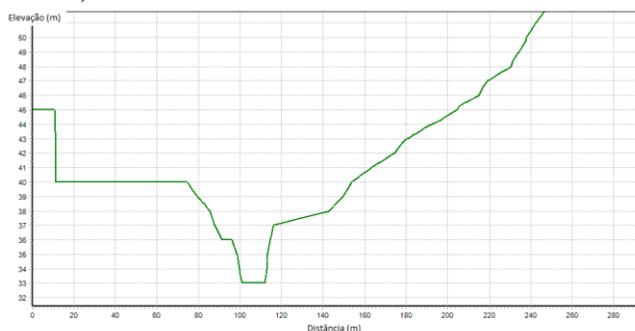


Figura 20 - Perfil transversal criado no *software Hec-GeoRas*.

rugosidade de *Manning* para o uso do solo, cotas de elevação retirados do MDT, extração dos pontos representativos das margens e nomes dos rios e afluentes, sendo um elemento essencial, pois é com base nas secções transversais traçadas que o *software* irá criar os perfis de relevo que irão ser tidos como base para gerar os perímetros de inundação, alturas da coluna de água e velocidade da água (Brunner 2008, Warner, Brunner et al. 2009, Ackerman 2011).

As secções transversais são muito importantes para uma correta representação do terreno, e o número de secções incluídas em determinado modelo, faz com que a área inundada varie, ou seja, quanto mais secções transversais forem incluídas em determinado modelo, melhor irá ser representado o terreno e maior será o rigor na definição da área abrangida pela inundação (Cook and Merwade 2009).

Este elemento geométrico pode ser vetorizado de forma automática ou manual. A forma automática não é recomendável dado que existe um conjunto específico de

regras que devem ser tidas em consideração e que o *software* ignora quando se automatiza a tarefa. A vectorização efetuada, neste trabalho foi feita de forma automática e manual. Foi pedido ao *software* que criasse uma rede de perfis transversais apenas com 15 metros de comprimento e com um espaçamento de 15 metros entre si. A informação foi exportada e apagada da *Geodatabase*, criando-se novamente o elemento utilizando a informação criada como apoio para a criação dos perfis transversais, tendo em consideração as seguintes regras:

- Os perfis transversais devem ser vetorizados da margem esquerda para margem a direita e no sentido de jusante;
- Os perfis transversais devem ser desenhados perpendicularmente à direção do fluxo;
- Não deve haver interseção entre perfis transversais;
- Os perfis transversais só podem interseccionar o rio, cada uma das margens e as linhas de direção de fluxo apenas uma vez;
- Este elemento não deve ser vetorizado em áreas sem dados (fora dos limites do MDT);
- Existindo infraestruturas (como edifícios ou pontes) é essencial que se implemente um perfil longitudinal, quer a montante, quer a jusante da estrutura para esta ser corretamente representada quando os perfis forem importados para o HEC-RAS.

Os próximos elementos a serem vetorizados são as pontes ou passagens hidráulicas, ou como descrito no *software bridge e culverts* (figura 21D).

A inclusão destes elementos é importante, na medida em que a sua adição proporciona um maior realismo ao modelo. Para uma correta vectorização deste elemento foram tidas em consideração as seguintes regras:

- A vectorização (como no caso dos perfis transversais) deve ser efetuada da esquerda para a direita em direção a jusante;
- Devem ser removidos no MDT os pontos cotados assinalados nas pontes;
- O vértice inicial e final da linha que define o tabuleiro da ponte deve estar sempre à cota do tabuleiro da ponte;
- É necessário definir alguns atributos neste elemento como o nome do rio ou tributário, margens e elevação (extraído automaticamente), assim como o nome do elemento, largura, etc.

- É necessário editar o elemento posteriormente no *software* HEC-RAS, para definir propriedades adicionais;

Outro elemento que convém incorporar no modelo hidráulico são as áreas sem movimentação de água ou como referidas no manual *ineffective flow áreas* (figura 21 E). Estas podem ser definidas como áreas onde a água tem velocidade zero. Este tipo de elemento é particularmente útil pois define áreas, que na eventualidade de serem atingidas por uma cheia, a água nesses locais terá uma velocidade próxima do zero. Por exemplo, considerando uma ponte, pode ser definido de antecipadamente, a jusante da ponte, uma área de velocidade zero, quando a água atinge determinada cota, sendo possível o operador introduzir um valor nesta variável que determina a cota em que a água estagna.

Este tipo de elemento é extraído para uma tabela com base nos perfis longitudinais, sendo que nem todas as áreas introduzidas podem ser utilizadas pelo *software*.

Decidiu-se utilizar como obstruções todos os edifícios que poderiam ser eventualmente afetados por uma cheia. Para tal, separou-se a informação relativa ao edificado e adicionaram-se os edifícios como obstruções ou como referido no programa *blockedobs* (figura 21 F).

Este elemento é particularmente útil pois permite *ao software identificar porções de terreno onde não pode existir escoamento* (Ackerman 2011). Os edifícios, além de serem incorporados diretamente no *software*, através da construção deste elemento, serão adicionados ao MDT, no capítulo referente aos resultados, pretendendo-se verificar as diferenças obtidas. Este elemento, do tipo poligonal, será exportado como tabela, que terá informações como a sua posição relativamente aos perfis transversais.

Por fim, utilizou-se a carta de ocupação do solo (COS) de 2007²⁷, importada para a *layer* relativa ao uso do solo ou como referido no *software landuse*. Este elemento, embora não seja obrigatório é essencial pois armazena o valor de rugosidade de *manning* (*n*). Estes valores são utilizados pelo *software* HEC-RAS para definir diferentes rugosidades, a diferentes usos do solo, o que interfere diretamente na velocidade de escoamento.

Embora se considere que a COS 2007 carece de detalhe para uma correta representação dos valores de rugosidade, esses dados foram utilizados como base, uma

²⁷ Utilizou-se o nível 2 da COS 2007 dado até a data não ter sido disponibilizada informação mais detalhada.

vez que a realização de um levantamento de campo mais pormenorizado do uso do solo, ultrapassava o âmbito deste trabalho

Estes valores, embora sejam inseridos como polígonos associados a um uso do solo, serão extraídos para uma tabela, onde constará também informação relativa a cada um dos perfis longitudinais que intersectam cada um dos diferentes usos de solo.

A tabela 14 representa os valores de rugosidade de *Manning* utilizados neste trabalho. Estes valores foram adaptados de várias fontes disponíveis (Chow 2009, Santos 2009, Brunner 2010), salientando-se que muitos dos valores foram adaptados das tabelas de referência. Embora os valores de rugosidade tenham três tipos de categoria, nomeadamente, baixo, médio e alto, que representam a presença de determinado elemento, foram adotados os valores médios para todos os tipos de uso. Determinou-se que o leito do rio deveria ter um tipo de valor diferente dos restantes usos do solo, dado que comporta outro tipo de informação. Foi escolhido para este parâmetro o valor de 0.045 que representa um canal limpo, com alguma sinuosidade, com existências de rápidos, com a presença de vegetação e pedras.

A escolha de valores representativos da realidade é essencial na medida em que estes exercem uma influência significativa no cálculo dos perímetros de inundação (Brunner 2008).

Código de Uso Solo	Nomenclatura	Valores de Rugosidade de Manning
1.1	Tecido urbano	0.050
1.2	Indústria, comércio e transportes	0.050
1.3	Áreas de extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	0.050
1.4	Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	0.030
2.1	Culturas temporárias	0.035
2.2	Culturas permanentes	0.040
2.3	Pastagens permanentes	0.030
2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	0.040
3.1	Florestas	0.060
3.2	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	0.025
3.3	Zonas descobertas e com pouca vegetação	0.020
N.A.	Canal	0.045

Tabela 14 - Valores de rugosidade de Manning utilizados²⁸.

²⁸ Adaptado de Santos (2009), Chow (2009) e Brunner (2010).

A figura 21 corresponde a um exemplo das *layers* que foram necessárias no decurso deste trabalho²⁹, servindo para ilustrar o processo para desenvolver o modelo hidráulico, correspondendo a ordem representada com a ordem com que foram criadas, vetorizadas e introduzidos os atributos necessários para um correto funcionamento do modelo.



Figura 21 - Variáveis que compõe o modelo hidráulico.

Como referido anteriormente, optou-se por utilizar os valores referenciados num outro trabalho desenvolvido sobre o rio Leça (Velhas 1991), por um lado, para efeitos comparativos com os perímetros obtidos pela autora e por outro devido à insuficiência de dados que esta bacia hidrográfica apresenta, nomeadamente nos registos contínuos de precipitação, não tendo sido encontrada um conjunto de estações com registos contínuos (30 anos) de dados de precipitação para se aplicar de forma capaz, a fórmula de *Giandotti*.

²⁹ Optou-se por não incluir todas as variáveis, para assim ser mais fácil a leitura da figura, assim como não traduzir os elementos e preservar a simbologia original.

O cálculo da fórmula estatística de Loureiro é fácil de ser quantificado. Inicialmente, verificou-se em que zona estava inserida a bacia hidrográfica, que correspondia a zona N3 definida por Loureiro, correspondente à bacia inferior do Cávado, Ave, Douro, Vouga e Mondego, tendo sido obtido desta maneira o valor de z . De seguida aplicou-se a fórmula $Q_p = C \cdot A^z$, sendo a área da bacia igual a 189.51 Km² e os valores de C e Z obtidos nas tabelas 8 e 9.

Os resultados, obtidos na tabela 15, correspondentes à totalidade da bacia hidrográfica do rio Leça. Na tabela 16 são apresentados os caudais utilizados na modelação. As duas tabelas apresentam os valores de caudal estimados para os três períodos de retorno propostos inicialmente, calculados com base nas fórmulas anteriormente referidas. Verifica-se que existem diferenças muito significativas nos caudais, o que irá ter um impacto significativo nos modelos que seguidamente serão apresentados.

Bacia Hidrográfica do Rio Leça – Área de alimentação 189.5 Km²		
Período de Retorno	Fórmula de Giandotti	Fórmula de Loureiro
10	248.2 (m ³ /s)	442.4 (m ³ /s)
50	315.5 (m ³ /s)	631.07 (m ³ /s)
100	345.0 (m ³ /s)	718.12 (m ³ /s)

Tabela 15 - Caudais de ponta de cheia para a bacia hidrográfica do rio Leça.

Sector de Leça do Balio e Santa Cruz do Bispo – Área de alimentação 148 Km²		
Período de Retorno	Fórmula de Giandotti	Fórmula de Loureiro
10	223.7 (m ³ /s)	390.1 (m ³ /s)
50	285.8 (m ³ /s)	556.3 (m ³ /s)
100	314.3 (m ³ /s)	633.1 (m ³ /s)

Tabela 16 -Caudais utilizados para o cálculo dos perímetros de inundação nos sectores modelados.

2.6 Processamento dos dados e representação da informação.

Nesta segunda parte, descrevem-se os procedimentos para a importação dos dados no *software* HEC-RAS, assim como as ações adicionais que foram tomadas para completar os dados de geometria que foram preparados anteriormente.

Com todos os dados prontos para serem utilizados, houve necessidade de fazer a exportação dos dados para a integração no HEC-RAS. Antes de os dados serem

importados é necessário identificar no *software* quais as camadas de informação que se pretende exportar através de um assistente que nos guia no processo de escolha. Tendo a informação sido selecionada, faz-se a exportação dos dados geométricos e tabulares, com todos os elementos que se trabalharam para o *software* HEC-RAS.

O ficheiro de exportação é do tipo XML, ou *extensible markup language*, onde todos os dados são guardados de forma hierárquica. Este ficheiro apenas representa a parte geométrica do projeto.

Tendo sido definido antecipadamente as unidades, do HEC-RAS, como métricas, criou-se um novo projeto e foi adicionado a este o ficheiro de geometria exportado anteriormente.

Foram modificados alguns dados, assim como complementados alguns elementos, nomeadamente o número de pontos que têm cada perfil transversal, dado que este apenas pode ter, no máximo, 500 pontos de elevação.

Considerando a figura 22 que representa esquematicamente uma ponte sobre o rio Leça, procedeu-se à inclusão de dados estruturais essenciais para a sua representação, como a altura do tabuleiro, os pilares e distância entre estes. A correta representação das pontes torna-se essencial para um aprimoramento dos cálculos efetuados pelo programa, dado que as pontes podem ser um obstáculo à livre circulação da água, dado que estas situações acarretam muitas vezes, a definição de áreas onde a velocidade da água é zero (Brunner 2008, Warner, Brunner et al. 2009).

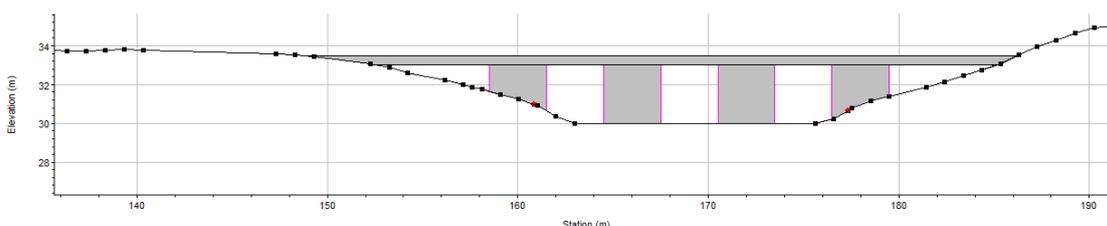


Figura 22 - Exemplo de uma ponte, modelada no HEC-RAS.

A figura 23 retrata o ficheiro de geometria referido, estando incluídos neste todos os elementos geométricos e relativos ao canal de escoamento. Existem algumas diferenças nomeadamente ao nível das margens, que são representadas como pontos e as obstruções que são representadas dentro dos perfis transversais.

A tabela 17 resume de forma simples os dados geométricos utilizados, nomeadamente as secções transversais criadas, comprimento dos segmentos modelados, distâncias médias entre as margens e a declividade do leito utilizada.

Dados Geométricos de entrada no modelo		
Sector	Santa Cruz do Bispo	Leça do Balio
Comprimento do segmento do rio	4.38Km	3.83Km
Distância média entre margens	18m	15m
Distância média entre os perfis transversais	16m	16m
Comprimento médio dos perfis transversais	496m	524m
Nº de perfis transversais	260	190
Declive médio do canal	1.6°	0.3°
Declive utilizado	0.36529 m/m	0.07832 m/m

Tabela 17 - Dados geométricos do canal e das secções transversais.

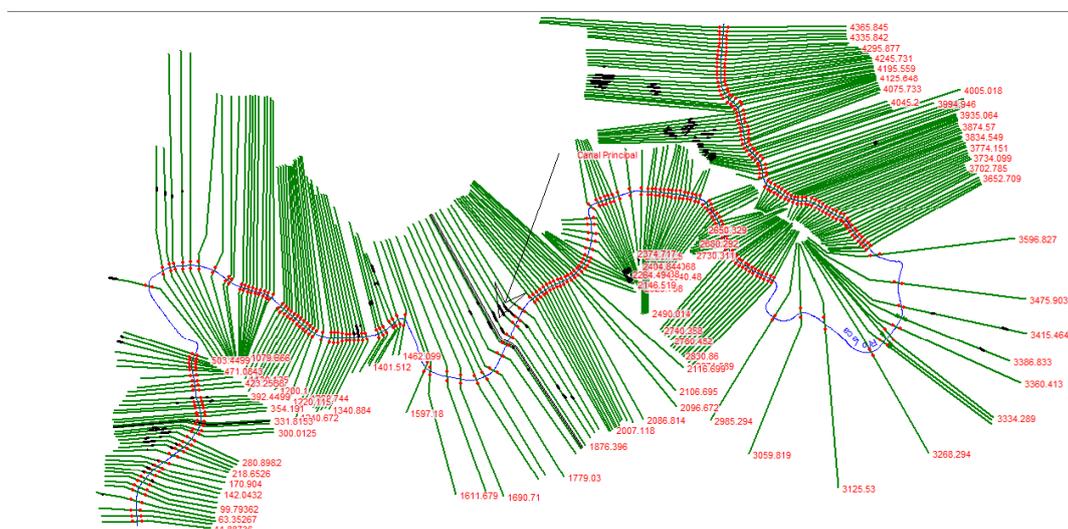


Figura 23 - Exemplo de um ficheiro de geometria utilizado na modelação hidráulica.

O procedimento anterior conclui todas as alterações efetuadas a nível geométrico, sendo o próximo passo, criar um ficheiro relativo ao escoamento, que entre outros dados terá os caudais de ponta de cheia que serão utilizados.

Na simulação, foi escolhido o modo de fluxo constante ou *steady flow*, dado que não se dispunham de todos os dados para efetuar a simulação em fluxo inconstante ou *unsteady flow*. Para se realizar a simulação, o *software* requer que sejam introduzidos alguns dados como o caudal ou caudais e ainda permite ao operador escolher como quer definir as condições de descarga. Estas podem ser de quatro tipos distintos, a primeira *known water surface*, o operador define a altura máxima da coluna de água para cada um dos caudais escolhidos. Na segunda, *critical depth*, o utilizador não necessita de introduzir nenhum dado, sendo o *software* a calcular a profundidade crítica e a utilizar esse valor como limiar para cada uma das secções transversais. A terceira opção, a que foi utilizada neste trabalho, *normal depth slope*, permite ao operador introduzir o

declive médio do canal ou canais modelados. A quarta opção permite, a escolha de valores de altitude e caudal específico para cada umas secções (Brunner 2008, Warner, Brunner et al. 2009).

O *software*, para apresentar os resultados, necessita de resolver uma série de equações, onde serão usados todos os dados criados até ao momento, sendo necessário, fazer referência às equações representadas na tabela 18. São estas que permitem ao *software*, através dos dados introduzidos pelo operador, quer geométricos, quer de escoamento, calcular a altura da água possível de ser obtida.

Nome	Fórmula	Descrição das variáveis
Equação de Energia	$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$	Z_1, Z_2 – Cotas do Canal de escoamento; Y_1, Y_2 – Profundidade da água nas secções transversais; a_1, a_2 – Coeficientes de velocidade ponderados; g – Aceleração gravitacional; h_e – Perdas de energia;
Perda de Carga (Energia)	$h_e = L \bar{S}_f + C \left \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right $	h_e – Perdas de energia; L – Caudal ponderado pela distância entre secções; \bar{S}_f – Ângulo de atrito entre duas secções transversais; C – Coeficiente de perda de expansão ou contração;
Distância Ponderada Entre Secções Transversais	$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$	$L_{lob}; L_{ch}; L_{rob}$ -Comprimento específico entre secções transversais na margem esquerda, canal de escoamento e margem direita respetivamente. $\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}$ – Média aritmética do escoamento entre secções transversais na margem esquerda, canal de escoamento e margem direita respetivamente.

Tabela 18 – Fórmulas resolvidas pelo *software* para determinar a altura da coluna de água³⁰.

³⁰ Adaptado de G. Brunner, 2010.

A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça: Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos

Tendo sido criado o ficheiro de geometria e escolhido e completado o modo de simulação pretendido com os dados de escoamento, foi possível executar o modelo. Em caso de anomalia nos dados, o HEC-RAS, interrompe o processo e alerta o operador para os eventuais erros geométricos que possam

eventualmente existir, fornecendo informação específica para que estes sejam identificados e corrigidos.

Considera-se importante referir que mesmo que o modelo seja executado normalmente, deve ser sempre consultada a janela de erros, como se demonstra na figura 24. Esta figura apresenta algumas das correções mais frequentemente sugeridas pelo programa, nomeadamente a inclusão de mais perfis transversais em determinadas zonas (Santos 2009).

Existem várias opções disponíveis quando se exportam os resultados para o ArcMap. A figura 24 apresenta essas opções, nomeadamente os resultados dos cálculos para os vários caudais, assim como, dados de velocidade da água, dados de tensão de cisalhamento e dados relativos ao fluxo de energia, estes dois últimos bastante utilizados no cálculo de transporte de sedimentos (Brunner 2008, Warner, Brunner et al. 2009).

Para os dados serem novamente importados para o ArcMap, são necessárias duas novas reconversões, a primeira de SDF, para XML e a segunda de XML para uma

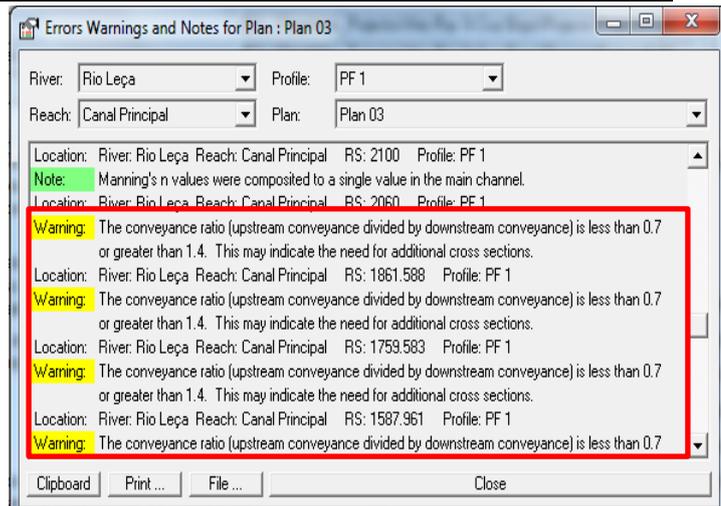


Figura 24 - Erros, avisos e notas gerados pelo Hec-Ras.

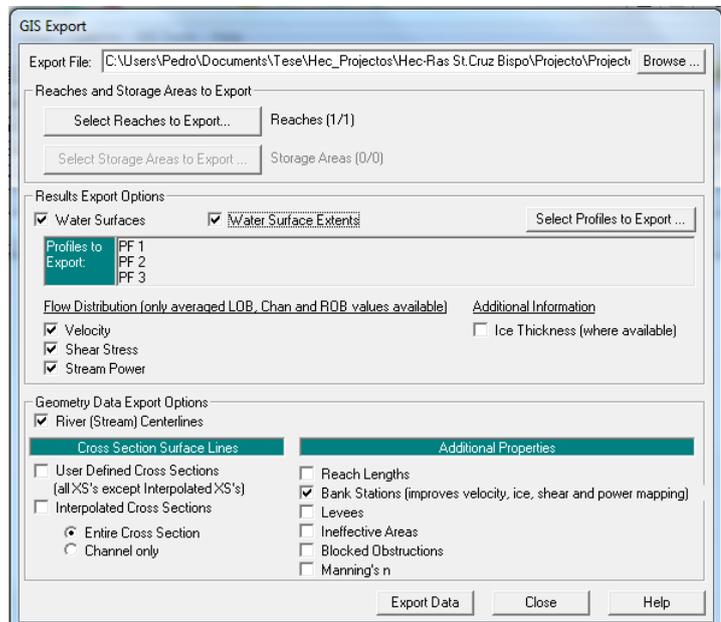


Figura 25 - Exportação de dados para ambiente SIG.

Geodatabase, para onde serão convertidos e armazenados os ficheiros trabalhados, podendo ser verificado na tabela 19 alguns dos resultados obtidos.

Resultados	Tipo de implementação
Limite da inundação;	Polígono
Margens;	Pontos
Perfis transversais;	Linha
Velocidade da água;	Ponto e Tabela
Centro geométrico do canal;	Linha
TIN representativo das cotas da água;	TIN

Tabela 19 - Resultados obtidos.

O HEC-RAS exporta inicialmente dois tipos de resultados: um limite vetorial com o perímetro de inundação e as alturas da água em formato TIN, que será convertido em *raster* e subtraído ao MDT em formato *raster* original com as cotas de terreno. Este processo devolve a diferença entre as alturas observadas e o relevo, criando um tema *raster* com as alturas da coluna de água. Podem ser obtidos também dados de velocidade da água para a extensão de determinado perímetro de inundação.

Devido à fraca qualidade de visualização dos dados, disponível no HEC-RAS, nomeadamente o módulo RAS-Mapper, o processo de avaliação da informação foi efetuado em ambiente SIG, permitindo cruzar os dados obtidos com outros temas, e ainda a classificação e correção dos dados obtidos

3. RESULTADOS

O terceiro capítulo é referente à análise dos resultados obtidos com o conjunto de procedimentos referidos anteriormente.

A figura 26 representa sinteticamente os procedimentos para a obtenção dos resultados finais propostos neste trabalho.

Inicialmente, foram analisados os resultados obtidos, confrontando-os com os dados observados no terreno, sendo identificados os principais problemas e otimizando um conjunto de soluções que idealmente permitam minimizar as distorções entre o modelo e a realidade. O conjunto de alterações propostas passa por alterações aos ficheiros de geometria, nomeadamente o MDT, de modo a ajustar a cartografia ao que é observado no campo, com a inclusão de novos elementos, como muros e edifícios, assim como efetuar uma correta aproximação as pontes, modelando as margens.

Com os novos elementos adicionados e corrigido a cartografia de base, foi novamente executado o modelo, para então se verificarem as diferenças, sem no entanto serem modificados os ficheiros geométricos e de escoamento que compunham o modelo inicial.

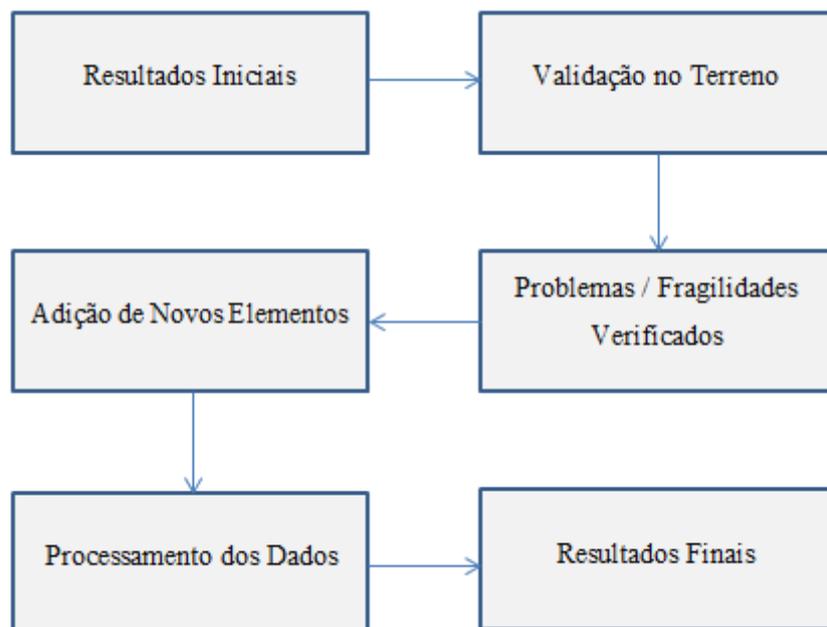


Figura 26 – Esquema metodológico seguido para a obtenção dos resultados.

3.1. Resultados Iniciais

Considerando-se os dois sectores anteriormente referidos, foram calculados os perímetros de inundação assim como as alturas da água. Esses resultados estão patentes nas figuras 27 e 28, para o sector de Leça do Balio, e figuras 29 e 30, para o sector de Santa Cruz. Embora se tenha efetuado o cálculo para os três períodos de retorno previamente referidos, apenas se decidiu representar a altura da coluna de água e os perímetros de inundação para uma cheia centenária.

Convém ser feita a referência que até a data do cálculo destes resultados iniciais, não foi efetuado nenhum trabalho de campo prévio nessas áreas de estudo, considerando-se a planimetria fornecida pela Câmara Municipal como rigorosa e final. As alterações verificadas entre a cartografia e os dados de terreno serão trabalhadas no subcapítulo seguinte.

Relativamente ao sector de Leça do Balio e considerando as figuras 27 e 28, verificam-se grandes diferenças, quer nos valores da altura da coluna de água, quer na área ocupada pela cheia. Estas grandes diferenças são explicadas pelos valores de caudal utilizados. As tabelas 20 e 21 resumem para cada um dos períodos de retorno considerados, a área potencialmente afetada, os edifícios potencialmente afetados e a altura provável da coluna de água.

Considerando a tabela 19, que corresponde aos valores obtidos com base na fórmula cinemática de *Giandotti*, as diferenças observadas ao nível da área potencialmente afetada são significativas, centrando-se nos 6.63%, comparando o T10 a T 50 e 2.91%, comparando T50 a T100. Por outro lado, a tabela 20, reflete os valores obtidos com base no cálculo da fórmula estatística de Loureiro. Este cálculo devolve diferenças ainda mais significativas relativamente à potencial área inundada, sendo a diferença, entre o T10 e T 50, um aumento de 16.12% de área inundada, e entre o T50 e T100, um aumento de 3.83%.

Comparando os valores obtidos, existe um aumento de aproximadamente 18% no valor de área inundada para o período de retorno de 10 anos, para o período de retorno de 50 anos, existe um aumento de 26.06 % e para a cheia centenária, um aumento de 26.72% na área inundável.

Relativamente aos edifícios, não foi tomada em consideração a sua tipologia, podendo estes abranger desde complexos industriais, residências, anexos, etc. É

observável nas tabelas, quantos edifícios potencialmente poderão ser afetados. Baseado nos valores adotados de *Giandotti*, para uma cheia com um período de retorno de 100 anos, 32 edifícios serão afetados, com uma área acumulada de aproximadamente de 32330 m², por outro lado, os cálculos tendo como base a fórmula estatística de Loureiro, para o mesmo período de retorno, demonstram que existe um aumento no número de edifícios potencialmente afetados, mais concretamente 48 edifícios, com uma área acumulada de 36229 m².

As alturas da coluna de água, também apresentam a mesma tendência verificada anteriormente. Comparando os resultados, observa-se claramente que o valor da altura máxima da água para o período de retorno de 100 anos, calculado com base nos valores de caudal de *Giandotti*, é inferior ao valor da fórmula estatística de Loureiro para o período de retorno de 10 anos. As diferenças entre os três períodos de retorno, adotados com a fórmula de *Giandotti*, são inferiores a 1 metro. Por outro lado, considerando a fórmula estatística de Loureiro existe uma diferença de aproximadamente 1,5 metros entre a altura máxima da coluna de água para o período de retorno de 10 e 100 anos.

Fórmula cinemática de Giandotti			
Período de Retorno	Área Afetada	Nº Edifícios afetados	Altura máxima da coluna de água³¹
T 10	294034 m ²	29	6.29 m
T 50	314943 m ²	30	6.86 m
T 100	324384 m ²	32	7.09 m

Tabela 20 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores adotados da fórmula cinemática de *Giandotti*, para o sector de Leça do Balio.

Formula estatística de Loureiro			
Período de Retorno	Área Afetada	Nº Edifícios afetados	Altura máxima da coluna de água
T 10	357256 m ²	38	7.78 m
T 50	425960 m ²	46	8.95 m
T 100	442951 m ²	48	9.40 m

Tabela 21 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores calculados da fórmula estatística de Loureiro, para o sector de Leça do Balio.

³¹ Altura medida com base no talvegue.

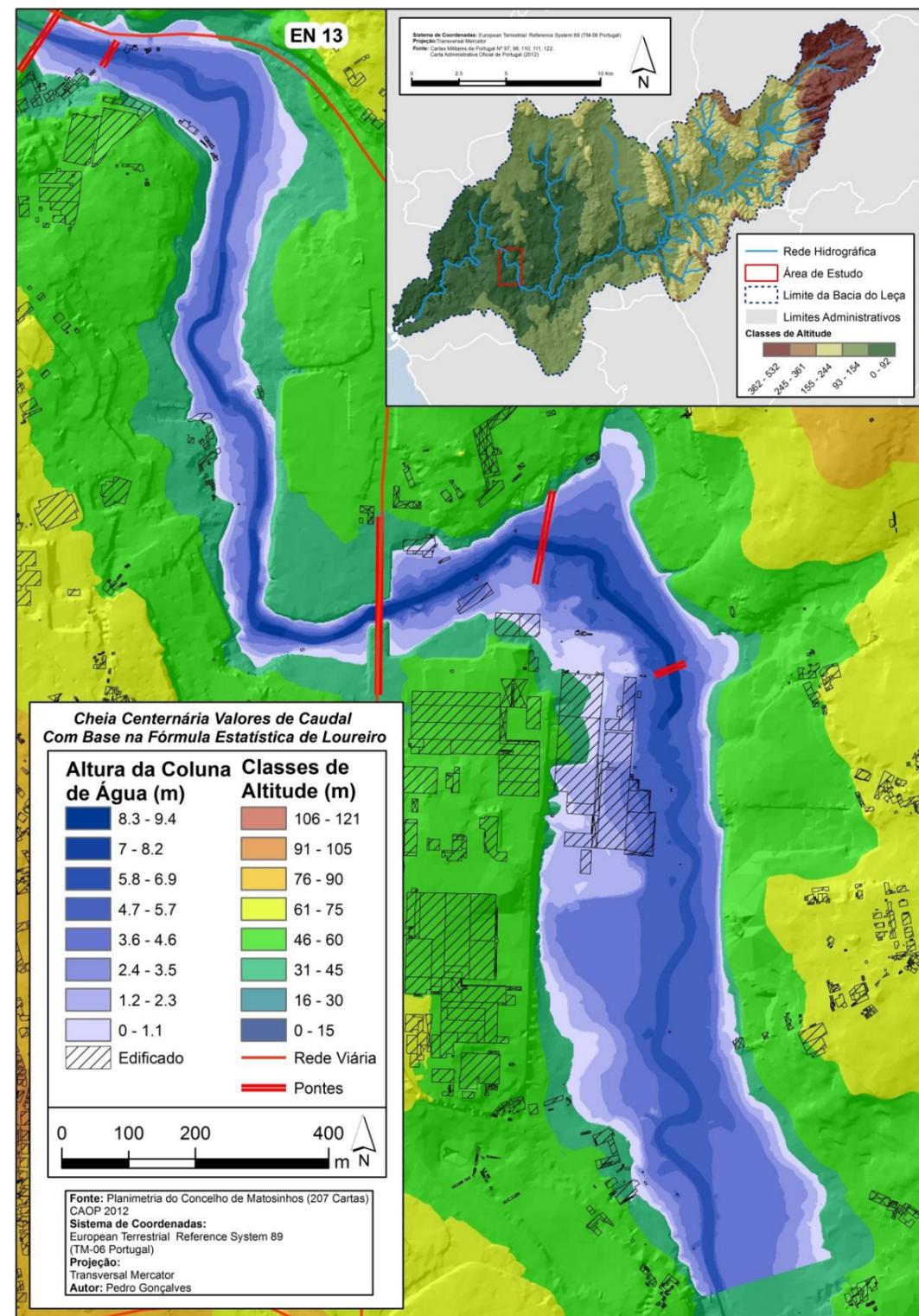
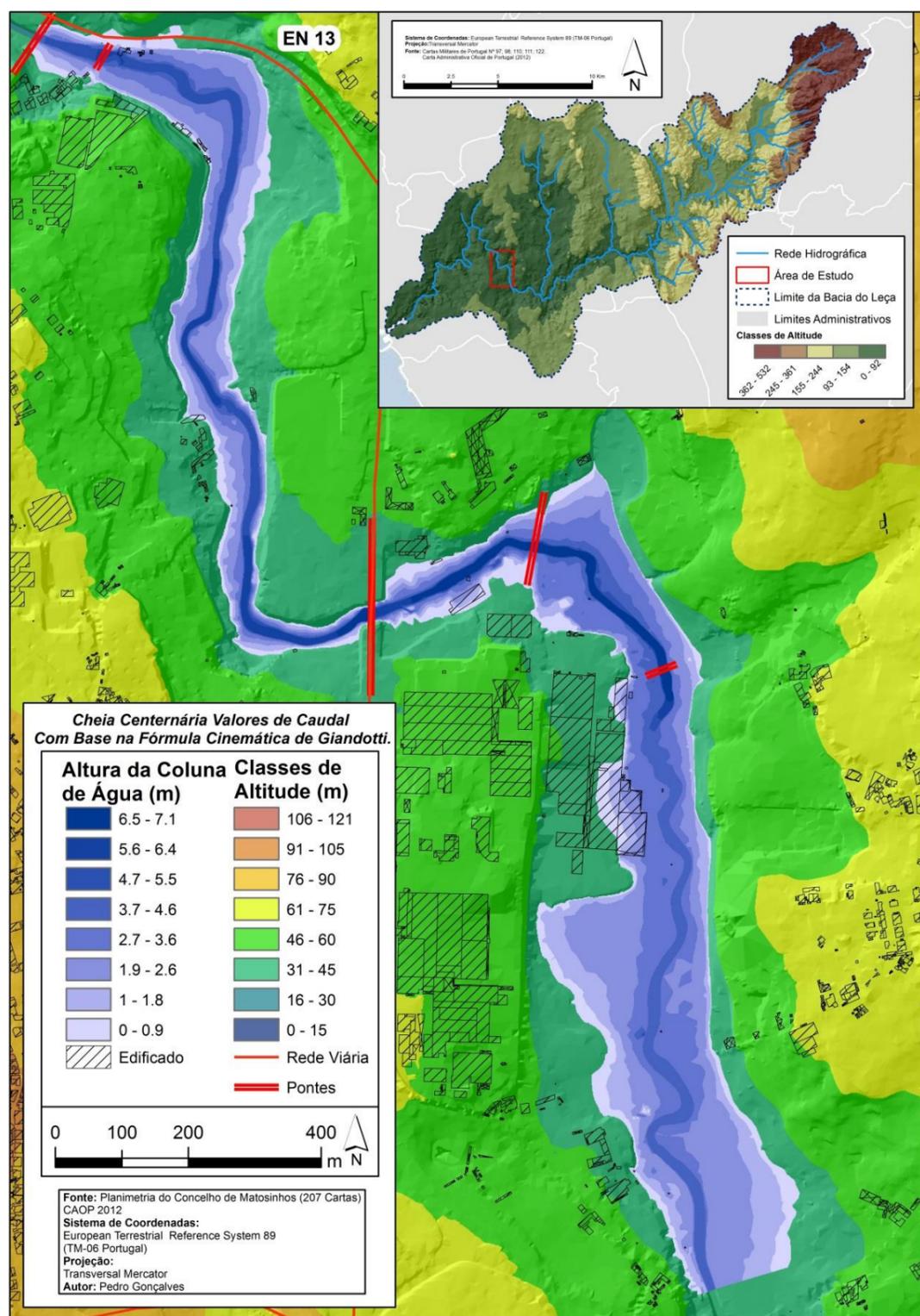


Figura 27 - Sector de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de Giandotti.

Figura 28 - Sector de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal calculados com base na fórmula estatística de Loureiro.

No caso do sector de Santa Cruz do Bispo, mantêm-se as mesmas diferenças observadas anteriormente. Considerando a tabela 22, onde se observa a área potencialmente afetada com base nos valores de caudal de *Giandotti*, verifica-se um aumento de aproximadamente 8% entre o T10 e T50, sendo a diferença entre T50 e T 100 de aproximadamente 2%. Por outro lado, com base nos dados calculados com a fórmula de Loureiro (tabela 23), a diferença percentual de área inundada, entre T10 e T 50, é de aproximadamente 11%, enquanto entre T 50 e T 100, a diferença ronda os 2%.

Relativamente a diferenças entre as fórmulas, para o período de retorno de 10 anos existe um incremento de 12.87%, para o período de retorno de 50 anos, a diferença é de cerca 17% e no caso da cheia centenária, a diferença ronda os 18.5%, existindo sempre um incremento de área inundável com os valores de caudal calculados com a fórmula de Loureiro.

A altura da coluna de água demonstra, de igual forma, diferenças significativas entre as duas fórmulas utilizadas, subindo aproximadamente 2 metros considerando o período de retorno de 100 anos.

Como no caso de Leça do Balio, observa-se neste sector, que a altura da coluna de água, com base na fórmula de *Giandotti*, não se altera de forma significativa. Esta varia entre 5.95 e 6.65 metros, não chegando a uma diferença de um metro entre o período de retorno de 10 e 100 anos. No caso dos dados de calculados com os caudais da forma de Loureiro, a diferença é mais acentuada, variando entre 7.26 e 8.68 metros, entre T 10 e T 100.

Como no caso do sector anterior, o número de edifícios potencialmente afetados é superior nos cálculos com base nos caudais de Loureiro. Para uma cheia com um período de retorno de 100 anos, serão afetados potencialmente 54 edifícios, com uma área acumulada de 6205m². O número de edifícios afetados, com base nos resultados calculados através dos valores adotados de *Giandotti*, é mais reduzido, nomeadamente 42 edifícios que perfazem uma área acumulada de 5501m².

Fórmula cinemática de Giandotti			
Recorrência	Área Afetada	Nº Edifícios afetados	Altura máxima da coluna de água
10 Anos	437809 m ²	39	5.95
50 Anos	465850 m ²	42	6.45
100 Anos	474501 m ²	42	6.65

Tabela 22 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores adotados da fórmula cinemática de *Giandotti*, para o sector de Santa Cruz do Bispo.

Formula estatística de Loureiro			
Recorrência	Área Afetada	Nº Edifícios afetados	Altura máxima da coluna de água
10 Anos	502495 m ²	47	7.26 m
50 Anos	562923 m ²	53	8.26 m
100 Anos	583166 m ²	54	8.68 m

Tabela 23 - Diferenças observadas, ao nível da área afetada, número de edifícios afetados e altura máxima da coluna de água com base nos cálculos efetuados com base nos valores calculados da fórmula estatística de Loureiro, para o sector de Santa Cruz do Bispo.

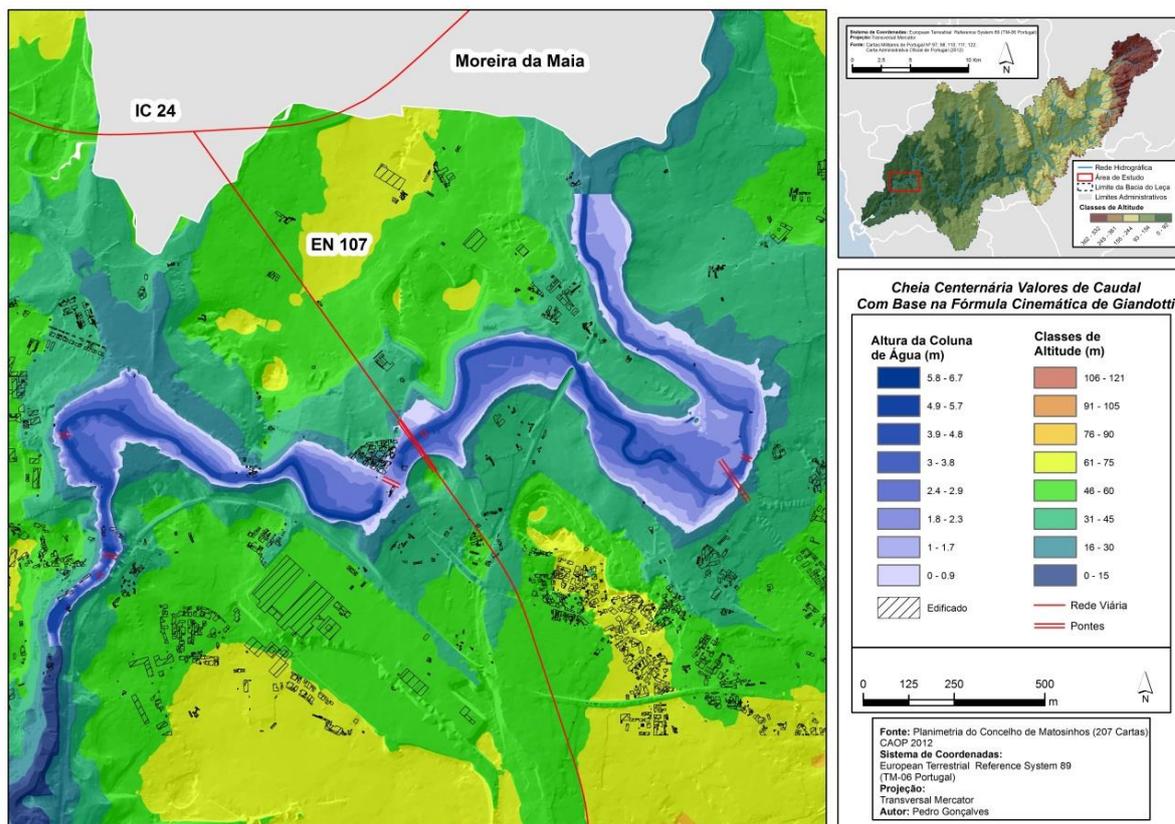


Figura 29- - Sector de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de *Giandotti*.

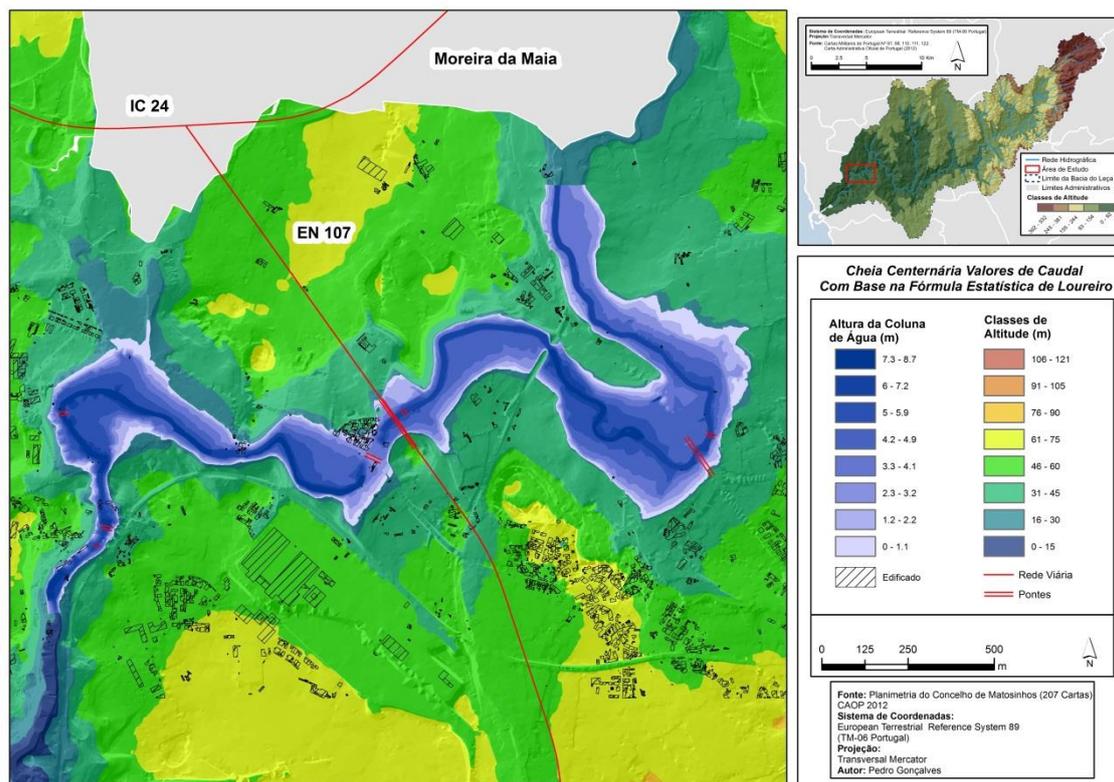


Figura 30 - Sector de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal calculados com base na fórmula estatística de Loureiro.

3.2. Validação

Tendo sido obtidos os perímetros de inundação para as duas áreas em estudo, foi necessário verificar o rigor dos resultados obtidos.

A validação dos resultados passou por duas fases distintas. A primeira baseou-se em entrevistas e conversas com os moradores das zonas afetadas, assim como com os Bombeiros Voluntários de Leça do Balio. Através destes registos e informações de campo foi possível identificar os sectores mais críticos, assinalados na figura 31 (correspondente ao sector de Santa Cruz do Bispo) e figura 32 (correspondente ao sector de Leça do Balio).

As conversas com os residentes das áreas modeladas foram de extrema importância, dado que estes, melhor que ninguém, conseguem transmitir a realidade vivida durante uma cheia, assim como, transmitir informação valiosa sobre a extensão, alturas, danos nos edifícios, obras de índole hidráulica para salvaguarda dos bens da população, etc. Por outro lado, os Bombeiros Voluntários de Leça do Balio, referiram que os sectores mais críticos nas duas áreas modeladas correspondem às secções

Resultados

terminais dos sectores, nomeadamente, os sectores denominados por Ponte do Carro (figura 31) e Ponte de Ronfes (figura 32).

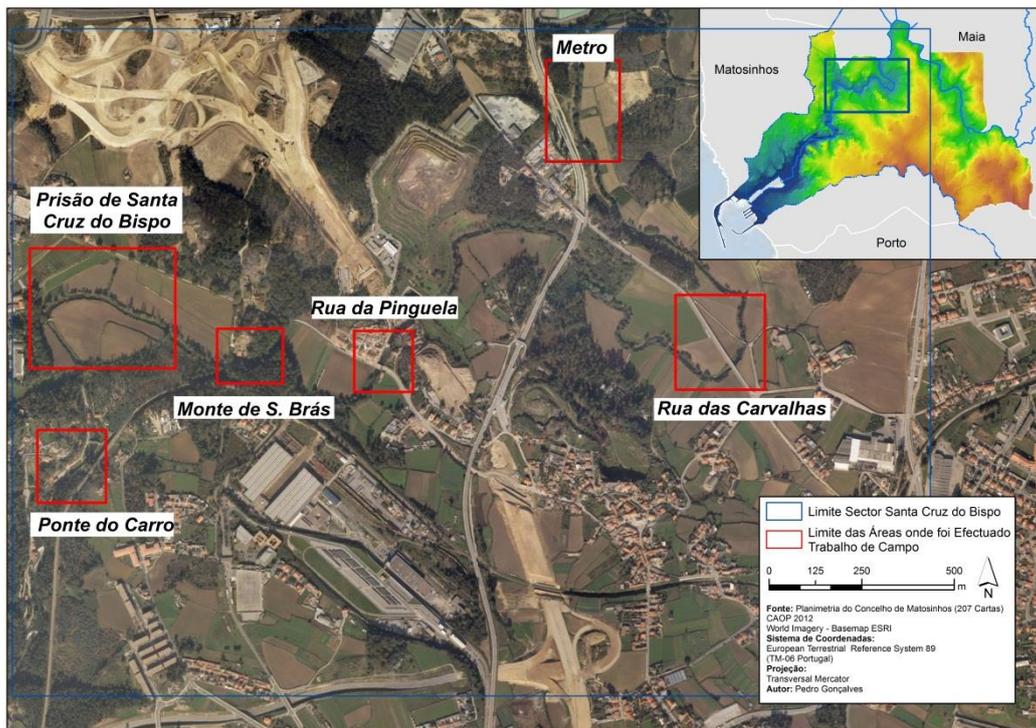


Figura 31 – Limite do sector – Santa Cruz do Bispo e localização dos locais onde se efetuou trabalho de campo/entrevistas aos moradores.

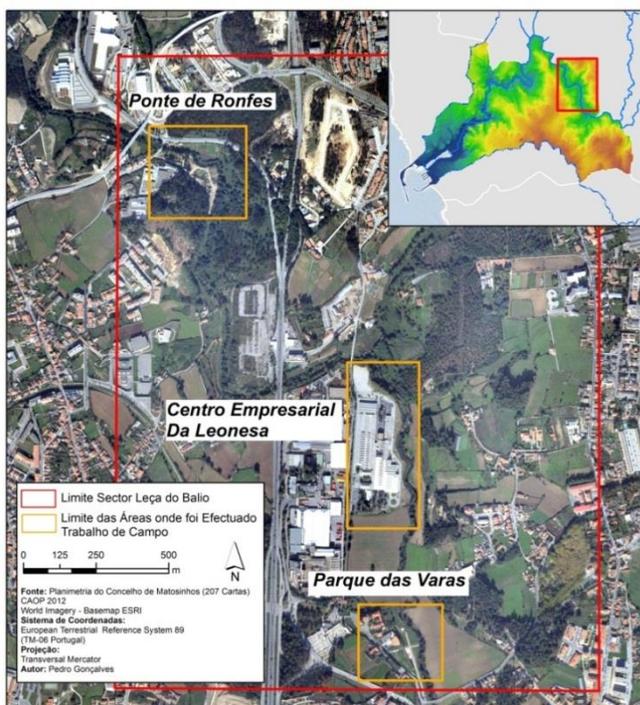


Figura 32 - Limite do sector – Leça do Balio e localização dos locais onde se efetuou trabalho de campo/entrevistas aos moradores.

Com base nos registos orais, fotografias cedidas pelos moradores, descrições e marcas de altura da água observadas nos locais, foram elaboradas fichas de inventário sobre os locais visitados, onde foram compilados vários indicadores como é possível verificar pela observação do exemplo da tabela 24.

*A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça:
Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos*

Área de Estudo - Leça do Balio

Sector - Ponte de Ronfes.

Identificação do Local



Localização



Fotografia do Local - 15/08/2013

Coordenadas Geográficas:

Latitude:	42° 13' 28.92" N	Longitude:	9° 37' 54.54 W
Município:	Matosinhos		
Freguesia:	Santa Cruz do Bispo		

Registos de Cheias Relacionadas com o Rio Leça

Jornais Registado cheia histórica no rio Leça em 2001, alagando parte da Estrada Nacional 13, Junto ao moinho (visível na fotografia do local)

População: Residentes referem que a maior cheia que têm memória ocorreu no ano de 2001, mais concretamente a 21 de Março. Este sector é afetado por cheias regularmente.

Bombeiros: Os Bombeiros Voluntários de Leça do Balio referiram que na sua zona de atuação existem duas zonas que são frequentemente atingidas por cheias, sendo este sector uma dessas zonas, sofrendo impactos significativos com a ocorrência de cheias.

Obstruções à Livre Circulação da Água

Edifícios:	1	Características: Antigo moinho e anexos de apoio com cerca de 208m ²
Pontes:	1	Características: Ponte de Ronfes, provavelmente da época medieval, dotada de três arcos e com aproximadamente 19 metros de comprimento total.

Características do Segmento do Rio no Sector

A linha de água está em estado natural, embora deva ser referido se observa no sector um açude para apoio ao moinho

A área envolvente compreende maioritariamente áreas agrícolas, no entanto existe alguma edificação, nomeadamente um moinho, que no momento se encontra desativado, uma ponte, e algumas residências. A Estrada Nacional 13 dista, aproximadamente, 25 metros do rio e descreve um traçado paralelo ao rio.

Causas Atribuídas pela População à Ocorrência de Cheias

A população indica que se registam cheias quando existem muitos dias seguidos de precipitação. Acrescentaram ainda que 2/3 dias seguidos de precipitação, mesmo que esta não seja muito intensa, já causa a subida do rio para os terrenos agrícolas, de forma gradual. Por outro lado, quando a precipitação é muito intensa, os populares esperam que a cheia ocorra num espaço de tempo entre 12 e 15 horas desde o início do episódio chuvoso.

Altura Máxima da Coluna de Água em 2001

Dados observados no Terreno:	≈ 6m	
Fórmula:	Giandotti	Loureiro
Dados registados no modelo Hidráulico:	5.7m	7m

Duração Média de Imersão

Neste sector e segundo os populares, a permanência da água nos terrenos agrícolas varia consoante o período de retorno da cheia em questão, podendo os terrenos estar submersos entre 1 a 4 horas, ou 8 a 10 horas como aconteceu na cheia de 2001.

Elementos Expostos

Habitacões	9	Descrição: 9 residências, 3 anexos.
Rede Viária	2	Descrição: Estrada Nacional 13 e Rua de Souza Prata
Ponte	1	Descrição: Muito danificada pela cheia de 2001.

Tabela 24 - Exemplo da parte tabular de uma ficha de inventário, realizado em Leça do Balio, mais concretamente no sector da ponte de Ronfes.

As fichas de inventário realizadas foram decompostas em duas partes distintas, a primeira, tabular, referente apenas a observações realizadas no local e uma segunda parte, gráfica, onde foram incluídas imagens ilustrativas da área de estudo.

A figura 33 ilustra a segunda parte da ficha criada para o sector da ponte de Ronfes. Neste sector, os moradores forneceram algumas fotografias da cheia registada em 21 de Março de 2001, segundo eles, a pior cheia que têm memória.

A construção da ficha de inventário foi essencial pois permitiu, por um lado a organização de dados de diversas fontes e por outro compilar apenas num único documento todos os dados observados no sector em estudo.

Leça do Balio, Sector — Ponte de Ronfes



Figura 33 - Parte gráfica da ficha de inventário aplicada em Leça do balio, mais concretamente no sector da ponte de Ronfes.

No decurso da construção das fichas de leitura, deu-se início à fase da validação dos resultados obtidos na primeira fase do trabalho.

A informação relativa à altura efetiva da coluna de água foi apenas obtida em dois pontos para cada um dos setores de estudo, nomeadamente no sector da Ponte do Carro e na Ponte de Ronfes. Para os restantes sectores não se conseguiu apurar com exatidão a altura da coluna de água para a cheia centenária, dado que as pessoas inquiridas ainda não residiam no sector, não existiam marcas visíveis ou não conseguiam com exatidão referir os locais atingidos.

Relativamente ao sector da ponte de Ronfes, os moradores e os bombeiros referem que este é um sector muito afetado por cheias, podendo o mesmo ser atestado pela figura 33B, 33D, 33G e 33I.

Através das imagens obtidas, de algumas marcas presentes no moinho representado pela imagem A (parte exterior do moinho) e E (interior do moinho), assim como da ponte de Ronfes (imagem C), concluiu-se que a altura aproximada da coluna de água, para uma cheia centenária, deveria rondar os 6 metros a partir do talvegue do rio Leça.

Os próprios moradores referiram que a ponte de Ronfes, quando ocorrem cheias mais graves, funciona como uma barreira à passagem da água, acumulando muita água a montante. Para averiguar qual seria a possível quantidade de água que a ponte poderia escoar, procedeu-se a uma série de cálculos com base na equação fundamental da Hidrodinâmica (Cabezas 1983), que pode ser traduzida por: $Q = S \times V$, onde Q é o caudal expresso em m³/s, S corresponde à secção em m² e V à velocidade atingida pela água em m/s.

Os dados da velocidade da água, foram obtidos previamente no *software* HEC-RAS e na secção transversal da ponte o *software* forneceu o valor de 4 m/s. Para o cálculo da secção, calculou-se a área, dividindo-se o arco em duas peças: um retângulo³² e uma circunferência³³, assumindo-se que o arco correspondia a uma meia circunferência.

Como resultado obteve-se o valor de 198 m³/s, que corresponde a caudal possível de ser escoado pela ponte, até os arcos ficarem submersos, e começar a acumular água a montante. Esta aproximação ao caudal possível de ser escoado pela ponte demonstra que a secção livre da ponte é insuficiente para o escoar a água de cheias com períodos de retorno elevados.

³² $Lado \times Altura$

³³ $(\pi \times Raio^2)/2$

Observando a figura 34, pode ser verificado em detalhe o sector referido. Nesta figura são observáveis os pontos aproximados de fotografia, podendo os mesmos ser utilizados para validar alguns dos resultados, nomeadamente o ponto de fotografia que corresponde às imagens F e G. Neste sitio, a altura da água, segundo o morador e pelo que se verifica nas fotografias, atingia aproximadamente 1 metro, não atingindo diretamente a habitação. Pode-se constatar que os resultados gerados com base na fórmula estatística de Loureiro são exagerados, dado que a água cobre por completo a habitação afetando também a estrada que serve de acesso às residências. As imagens do moinho e da ponte de Ronfes também devolvem resultados interessantes, na medida em que a água atinge aproximadamente os 6 metros de altura, valores muito aproximados dos calculados com base na fórmula de *Giandotti* que se aproximam dos 6 metros verificados no terreno.

A imagem H da figura 33 também demonstra que a Estrada Nacional 13 estaria parcialmente alagada, e observando novamente a figura 34, constata-se que a altura da coluna de água na estrada não passa dos 0.9 metros, valores que parecem ser aproximados da realidade.

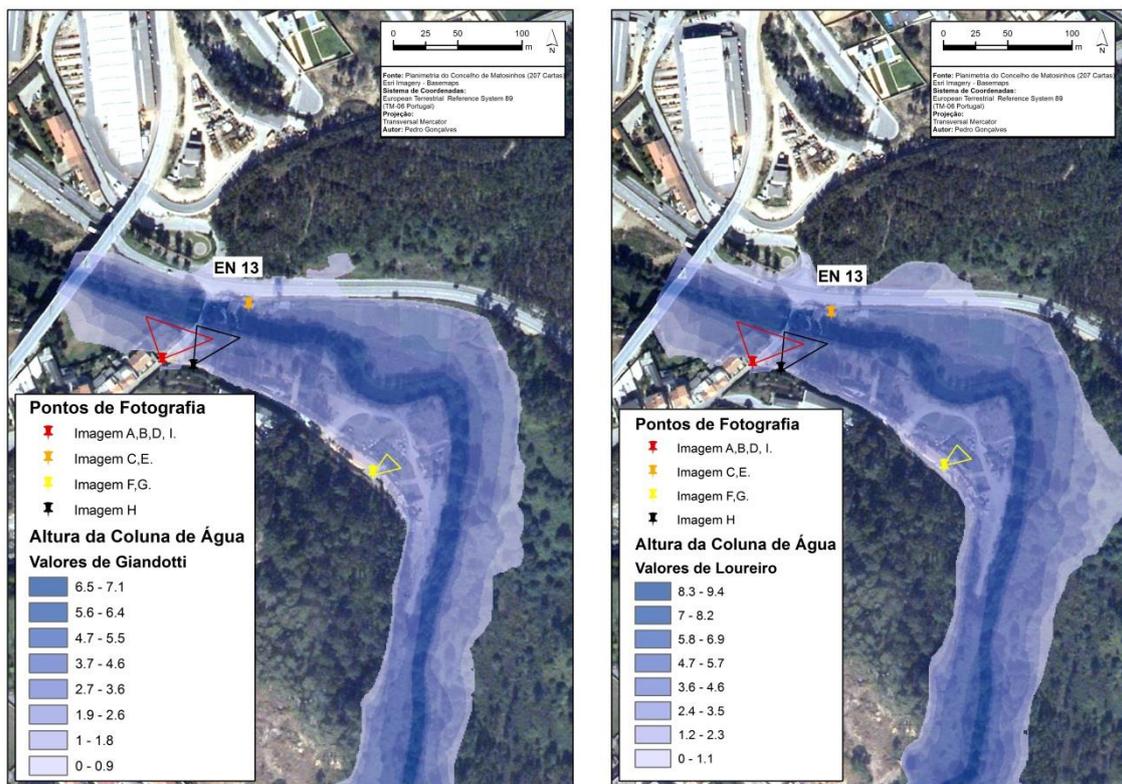


Figura 34 - Leça do Balio, sector da ponte de Ronfes – Pormenor.

O segundo sector, onde foi possível verificar com exatidão a altura da coluna de água foi na Ponte do Carro, no setor de Santa Cruz do Bispo. Aqui, os moradores

Resultados

também foram muito prestáveis, descrevendo detalhadamente os efeitos da cheia de 2001, indicando uma marca existente no moinho e a altura atingida numa habitação, embora não tenha sido possível obter fotografias dessa situação.

Santa Cruz do Bispo, Sector — Ponte do Carro

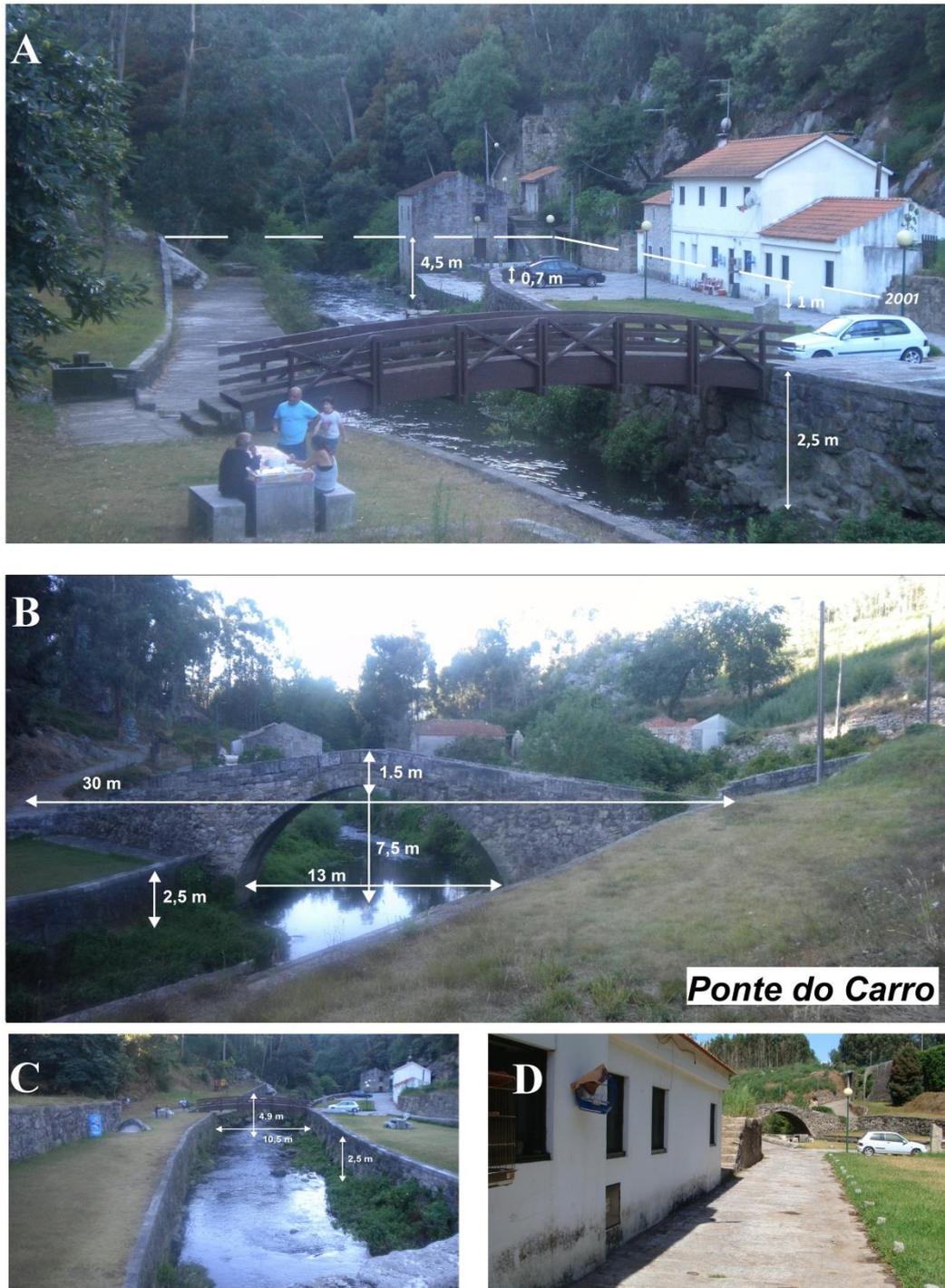


Figura 35 – Sector da Ponte do Carro. Elementos do Sector: A – Moinho e Residências Afetadas, B – Ponte do Carro, C – Ponte de Madeira, D- Pormenor da habitação afetada.

Os moradores deste sector afirmam que a água, em 2001, atingiu a cota da base da janela da residência, o que pode ser observado nas imagens 35A e 35D. A cota da janela está a um metro do solo e a aproximadamente 4,5 metros do talvegue do rio.

Observando a figura 36, os resultados calculados com base na fórmula de *Giandotti*, são consistentes com as informações que os moradores referiram, estando a cota da água, próximo da residência, a aproximadamente um metro de altura. Por outro lado, os resultados gerados com base nos caudais calculados com base na fórmula estatística de Loureiro, mais uma vez parecem ser exagerados, e para o mesmo local a altura da coluna de água era de 1.5 metros.

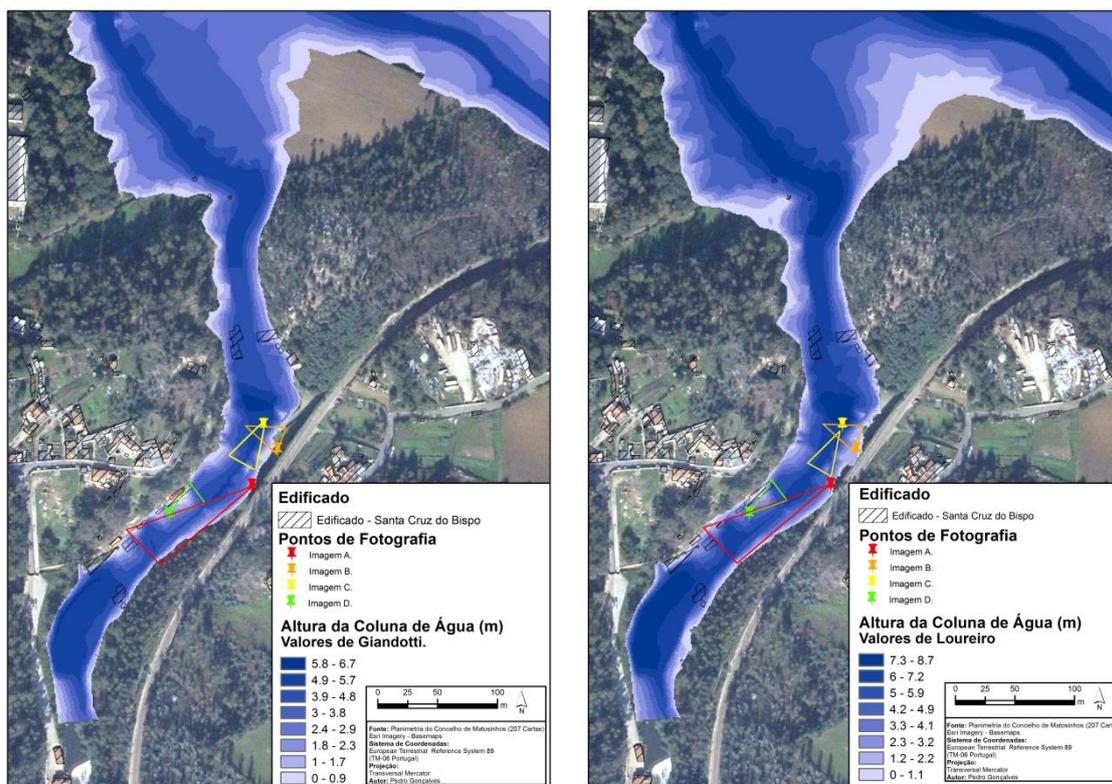


Figura 36 - Santa Cruz do Bispo, sector da ponte do Carro – Pormenor.

Os habitantes referiram a existência de uma marca deixada pelos próprios no moinho, um pouco acima da porta, ao qual se efetuaram algumas medições. Com base nos relatos e marcas fornecidas pelos moradores, calculou-se a altura da coluna de água. As medições foram efetuadas com auxílio de um distanciómetro da marca *® Leica*, mais concretamente o *Disto Classic 5ª*.

A figura 37 mostra, de forma esquemática, os resultados recolhidos, observando-se que a altura provável da coluna de água seria aproximadamente de 4.5 metros a partir do talvegue do rio Leça, atingindo a cota da esquadria superior da porta, onde existia uma marca deixada pelos moradores.



Figura 37 – Medições efetuadas à possível altura da coluna de água no moinho localizado no sector da Ponte do Carro em Santa Cruz do Bispo.

Verificando novamente a figura 36, para esta parte do sector e com base nos resultados calculados com base na fórmula cinemática de *Giandotti*, a cota máxima atingida pela água é de 4,9 metros a partir do talvegue e na marca da porta, aproximadamente 2,1 metros. Por outro lado, os resultados com base na fórmula estatística de Loureiro retornam para os mesmos locais a altura de 6,9 metros para o talvegue e 3,9 metros para o local onde se situa a porta.

A fórmula cinemática de *Giandotti*, depois de efetuada a verificação no terreno, parece ser aquela que mais se adequa à realidade, pois, confrontando os dados verificados no terreno e os relatos dos moradores é aquela que apresenta os resultados mais próximos à realidade.

Como referido anteriormente, a validação dos dados envolvia duas partes distintas, a primeira confrontando os resultados com os dados observados no terreno e a segunda seria fazer um comparação entre os resultados preliminares obtidos neste trabalho, com os resultados de outro trabalho desenvolvido por Edite Velhas em 2001, que apresenta perímetros de inundação para algumas das áreas modeladas neste trabalho.

Com efeito a autora, apresenta alguns resultados para as duas áreas modeladas neste trabalho, nomeadamente para o sector do Centro Empresarial da Leonesa, em Leça do Balio e do sector da Rua das Carvalhas, em Santa Cruz do Bispo.

O primeiro passo para poder trabalhar as áreas foi georreferenciar as duas áreas apresentadas pela autora no mesmo sistema de coordenadas utilizado neste trabalho. Concluído este processo com um erro aceitável, como pode ser observado na tabela 25, vectorizou-se os limites da cheia centenária proposto pela autora, podendo os mesmos ser observados através da análise da figura 38.

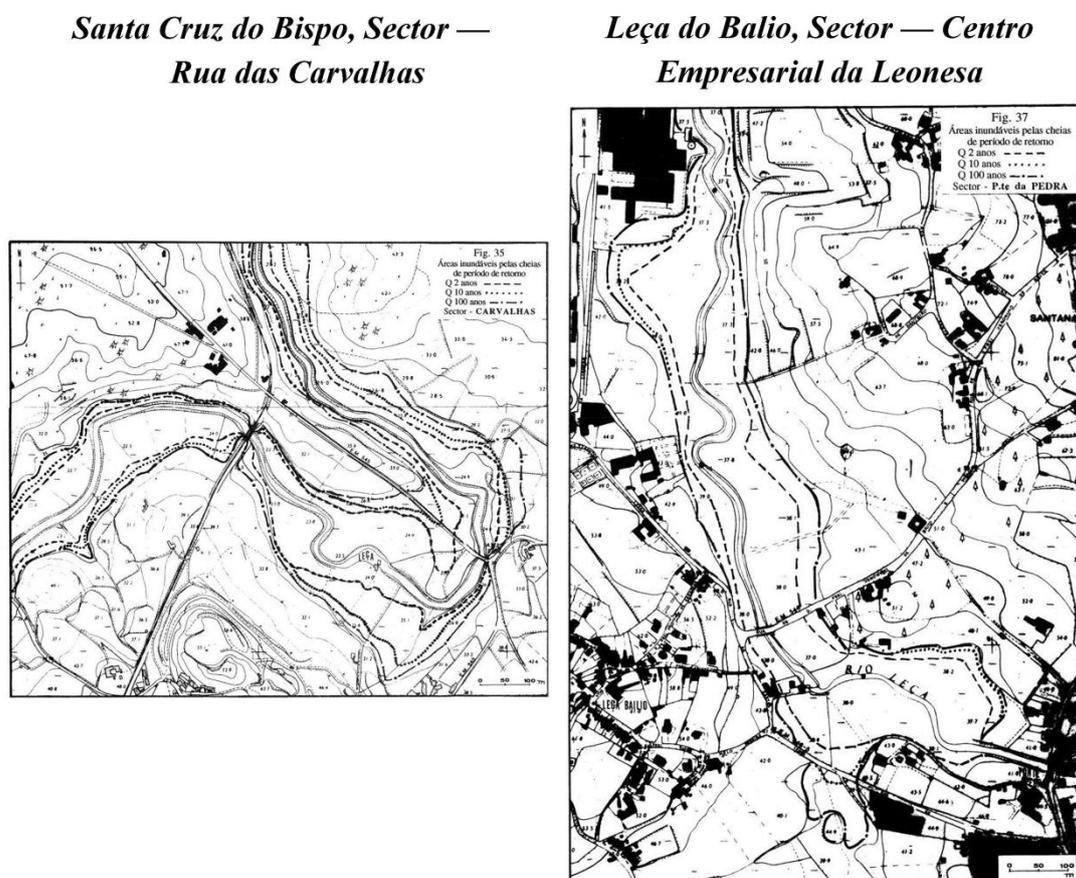


Figura 38 - Perímetros de inundação, para três períodos de retorno (2, 10 e 100 anos), em dois sectores do rio Leça³⁴.

Parâmetros	Santa Cruz do Bispo	Leça do Balio
Erro médio quadrado	2.1 m	0.8 m
Nº de Pontos utilizados	8	9

Tabela 25 - Erro médio quadrado e número de pontos de controlo utilizados para a georreferenciação dos resultados obtidos em trabalhos anteriores.

³⁴ Extraído de Velhas, E. (1991).

Na tabela 26, foram compilados os resultados calculados para dois períodos de retorno distintos, nomeadamente 10 e 100 anos. Estes dados foram comparados aos resultados de trabalhos anteriores (Velhas 1991), para assim ser possível verificar a variação de área atingida por cheias com os períodos de retorno referidos.

Pode ser verificado, na tabela 26, que a nível da variação os resultados com base na fórmula estatística de Loureiro são, novamente, os que apresentam maior desfasamento contrariamente aos valores de caudal de *Giandotti*, que se aproximam mais dos resultados obtidos por Velhas, E. (1991).

	Santa Cruz do Bispo		Leça do Balio	
	Área m ²	Variação %	Área m ²	Variação %
Giandotti – T10	267961.83	14.39	136771.05	38.03
Giandotti – T100	290558.20	-0.53	149577.87	20.40
Loureiro – T10	306646.48	30.90	162833.11	64.33
Loureiro – T100	356770.30	22.12	203984.34	64.20
Trabalhos Anteriores – T10	234246.43	0	99084.16	0
Trabalhos Anteriores – T100	292131.50	0	292131.50	0

Tabela 26 – Área calculada e variação da área em percentagem para os resultados preliminares obtidos neste trabalho comparativamente a trabalhos anteriores.

Embora para a delimitação dos perímetros de inundação, quer neste trabalho quer no trabalho desenvolvido por Velhas, E. (1991), tenham sido efetuados com base nos mesmos valores de caudal a variação ainda é significativa, principalmente observando o período de retorno de 10 anos. Para o período de retorno de 100 anos, embora com menor variação, as diferenças ainda são significativas, sendo contabilizados neste trabalho aproximadamente mais de 20 % de área afetada para a área de estudo de Leça do Balio e aproximadamente menos 0.5% na área de Santa Cruz do Bispo.

Considera-se importante referir que as diferenças podem advir da escala da cartografia utilizada, o que condiciona os resultados obtidos, sendo que a utilização de uma cartografia mais detalhada condiciona os resultados obtidos, quer do perímetro da inundação propriamente dito, quer da altura da coluna de água (Aggett and Wilson 2009, Cook and Merwade 2009).

3.3. Correção do MDT

No decurso da validação, os resultados preliminares foram confrontados com os dados verificados no terreno, o que levou a constatação de alguns problemas derivados da cartografia utilizada.

Foram verificados em detalhe os nove sectores, das duas áreas de estudo, para se apurar onde se localizavam as diferenças, e efetuar novas medições para correção dos dados originais.

Assim, considerou-se que se deveria incluir dados que eram inexistentes na cartografia fornecida, como cotas de edifícios, cotas de muros e em alguns casos margens. Por um lado, para ser possível efetuar no HEC-RAS uma correta modelação das pontes e por outro, para o canal do rio e as suas margens serem representadas da forma mais realista possível uma vez que são elementos que afetam a qualidade da modelação hidráulica proposta neste trabalho.

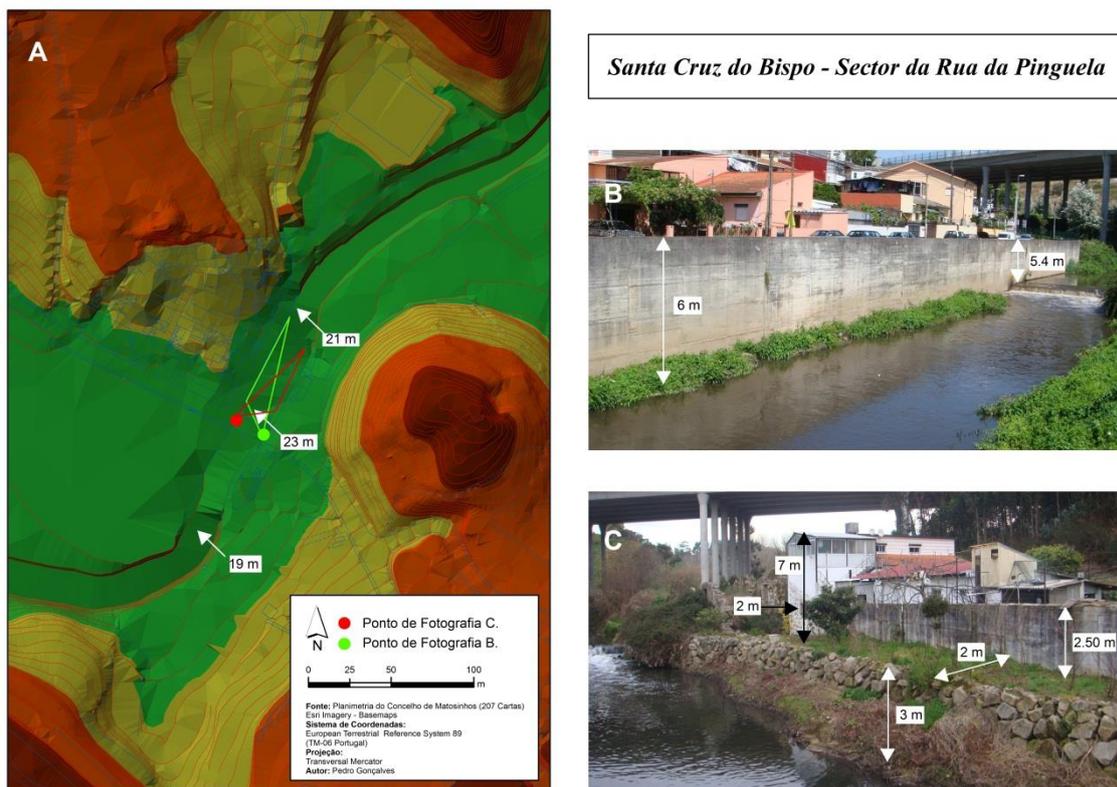


Figura 39 - Diferenças observadas entre a cartografia e os dados de campo, no sector da rua da Pinguela, em Santa Cruz do Bispo.

Tomando como exemplo a figura 39, identifica-se os elementos que não se encontram corretamente representados na cartografia. Neste sector, os moradores da margem direita do rio Leça (fig. 39B), não referem a ocorrência de cheias relacionadas

Resultados

com o rio Leça, no entanto os moradores da margem esquerda (fig. 39C) referiram que em 2001 a habitação sofreu inundações com a subida do rio Leça, tendo a água entrado por uma pequena janela que se encontra à cota de 5 metros a contar do talvegue do rio assim como pelas traseiras da habitação, podendo o referido ser verificado na figura 40. Esta figura mostra em detalhe o sector da rua da Pinguela, assim como as habitações potencialmente atingidas por uma cheia centenária.

Este cenário, segundo os populares, não corresponde ao ocorrido, sendo a cota da coluna de água aproximadamente 5 metros neste sector a contar do talvegue do rio. A necessidade de correção dos MDT advém do atrás exposto, pois quanto mais detalhado e completo este estiver melhor serão representados os perímetros de inundação, assim como a altura da coluna de água.

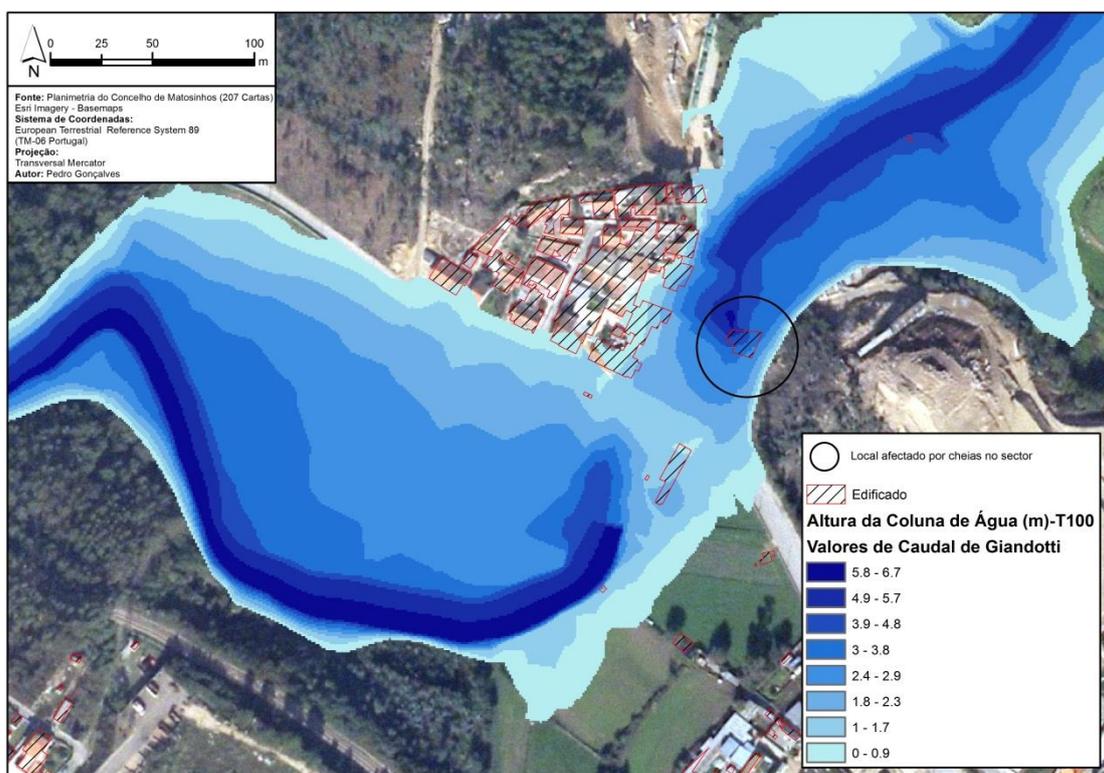


Figura 40 – Pormenor do sector da rua da Pinguela na área de estudo de Santa Cruz do Bispo.

Assim, as correções no MDT de base foram realizadas em 8 locais, correspondendo 5 destes ao setor de Santa Cruz do Bispo e 3 ao setor de Leça do Balio.

Como referido anteriormente, foi utilizado um distanciómetro da marca ® *Leica*, e modelo *Disto Classic 5ª*, com o qual foram retiradas medidas aos muros, pontes e edifícios que se encontravam mais próximos do rio, incorporando estes dados na cartografia disponibilizada pela Câmara Municipal de Matosinhos.

Com base nessas informações foram alteradas as curvas de nível, que em alguns dos casos eram inexistentes, como pode ser verificado na figura 41. Estas imagens retratam as redes irregulares de triângulos (TIN), criadas a partir da cartografia de base, demonstrando muita indefinição, principalmente nas áreas mais próximas das margens.

Observando a figura 41, constata-se que as correções efetuadas na cartografia de base foram, em alguns casos, muito acentuadas. As alterações efetuadas variaram consoante o grau de indefinição observado na cartografia de base, tendo sido efetuadas grandes alterações em alguns sectores, nomeadamente na Ponte do Carro, Rua da Pinguela, no sector do Monte de S. Brás e no sector da Ponte de Ronfes.

Na Ponte do Carro onde não era possível identificar as margens e os muros que ladeavam o rio, estes foram incorporados no modelo a partir das medições efetuadas no campo. Neste sector, ainda foram incluídos o moinho e o açude que serve o moinho, uma habitação e incluídos os apoios da Ponte do Carro.

Outro sector que sofreu grandes alterações foi o da rua da Pinguela, exemplo retratado anteriormente (fig. 38A). Neste sector foram definidas margens, por um lado para identificar o canal e por outro para permitir uma correta aproximação a ponte, foram também incluídos alguns edifícios, desenhados com recurso a fotografia aérea e incluído 2 muros de proteção e um muro de sustentação das margens do rio.

O mesmo processo foi efetuado em quase todos os restantes sectores com a exceção da Rua das Carvalhas e da prisão de Santa Cruz do Bispo. No sector da Rua das Carvalhas, apenas foi incorporada a ponte, tendo sido aproveitados os pontos cotados do tabuleiro para se verificar a cota da ponte, construindo-se assim o tabuleiro assim como os apoios da ponte, novamente com recurso a medidas realizadas com trabalho de campo.

O sector da prisão de Santa Cruz do Bispo necessitava de alterações menores, nomeadamente ao nível de muros (estrada e suporte), unidas curvas de nível e corrigida a cota de duas das parcelas agrícolas.

A correção efetuada, permitiu por um lado a união das curvas de nível, que regulam e limitam a triangulação efetuada pelo *software*, suavizando a superfície, assim como a incorporação de novos elementos, como muros, edifícios e a inclusão ou alteração das margens para poder ser efetuada uma correta aproximação a pontes, para estas serem corretamente incorporadas e modeladas no HEC-RAS.

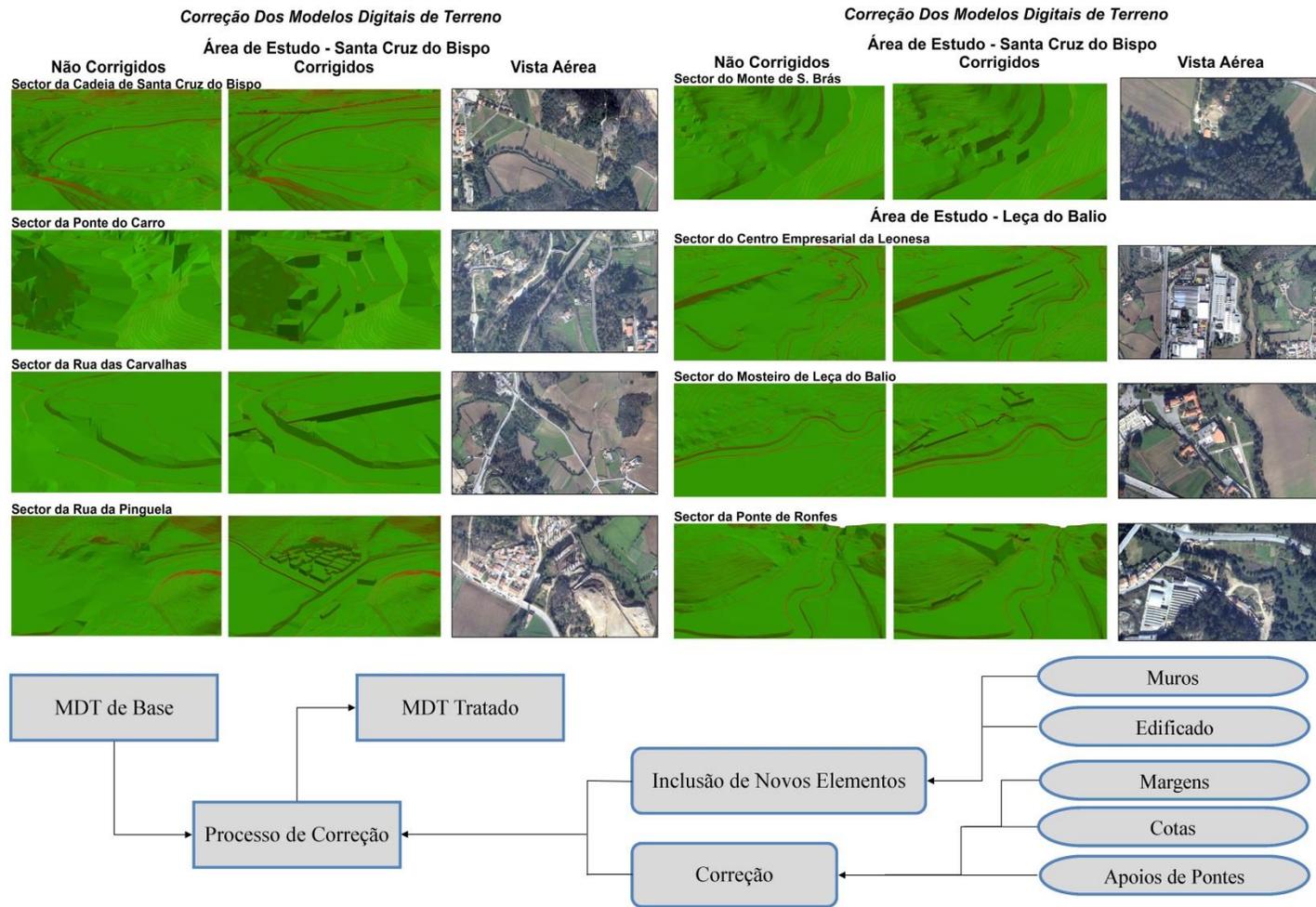


Figura 41 - Exemplo de correções efetuadas no MDT de Base e fluxo de trabalho da correção do modelo.

A figura 42 ilustra algumas pontes que foram modeladas no HEC-RAS e embora estas sejam apenas uma aproximação da realidade, foram implementadas com as medidas obtidas com trabalho de campo, nomeadamente a altura, distância entre pilares, largura dos pilares e espessura do tabuleiro. As medições foram efetuadas

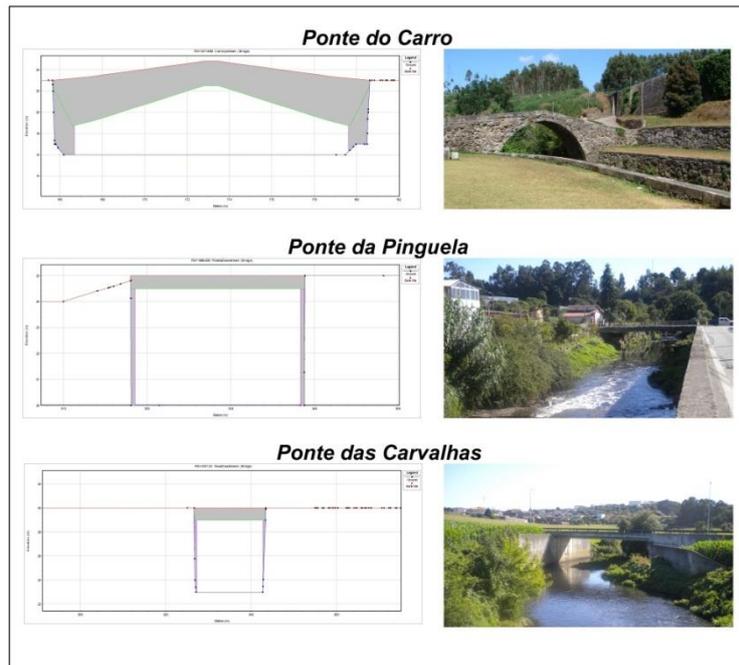


Figura 42 - Exemplo de pontes incorporadas no modelo hidráulico.

com o referido distanciómetro, não sendo assim despendido muito tempo na aquisição das cotas. Por outro lado, as medições efetuadas permitiram a correção das cotas nas margens para desta forma ser possível uma correta aproximação às pontes, dado que o MDT original carecia do detalhe suficiente para a ponte encaixar na perfeição no terreno.

As melhorias efetuadas ao MDT de base permitiram gerar um segundo MDT, mais detalhado e aproximado da realidade. Estas alterações permitem aprimorar os resultados obtidos inicialmente, dado que no novo MDT, estão presentes novos constrangimentos à livre circulação da água, como pontes, edifícios muros, etc. mas também uma maior definição ao nível as margens, permitindo ao *software* uma aquisição de cotas mais rigorosas quando forem traçados os perfis transversais.

3.4. Resultados Finais

Depois de terem sido efetuadas as correções necessárias ao MDT, geraram-se novamente os resultados, tendo como base a geometria criada anteriormente, nos resultados iniciais, necessitando-se apenas de extrair as cotas para os perfis transversais.

Decidiu-se não criar novos ficheiros geométricos, nem criar novos ficheiros de escoamento, mantendo-se os mesmos valores apresentados na metodologia dado que se pretendia comparar as diferenças entre os dois modelos e de que maneiras as diferenças nos dois MDT iriam condicionar os resultados.

Tendo sido verificado no capítulo da validação que a fórmula cinemática de *Giandotti* é aquela que juntamente com os dados de geometria criados, gera os resultados mais aproximados da realidade, foi apenas utilizada esta para gerar os novos resultados, podendo ser verificadas as figuras 44 e 45 que retratam os resultados obtidos para Leça do Balio e Santa Cruz do Bispo respetivamente. Os resultados obtidos nesta fase do trabalho são muito diferentes dos obtidos inicialmente, destacando-se na área de Leça do Balio os três sectores intervencionados: o Parque das Varas, onde a água não atinge o café, o Centro Empresarial da Leonesa, onde o perímetro de inundação é muito inferior e no sector da ponte de Ronfes, onde uma das habitações não é atingida.

Relativamente à altura da coluna de água na área de Leça do Balio, pode ser referido que no moinho de Ronfes a altura da coluna de água é de aproximadamente 5,5 metros. No sector do Centro Empresarial da Leonesa a água atinge a cota de 2 metros na rampa que dá acesso às garagens e cerca de 10 centímetros próximo ao edifício.

No sector de Santa Cruz do Bispo, verifica-se novamente uma diminuição da área inundável nos sectores que foram trabalhados. Com efeito, esta área foi a que sofreu maiores intervenções resultando em diferenças significativas nos elementos afetados.

Considerando o sector da rua das Carvalhas, no qual foram incluídas as pontes, verifica-se que a água ao contrário do modelo inicial não submerge a

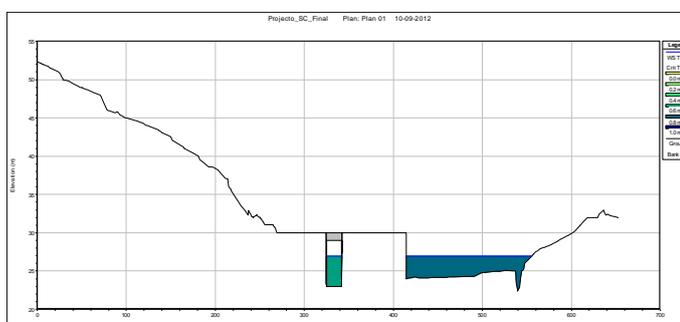


Figura 43 – Resultados finais obtidos para o sector da Rua das Carvalhas, exemplo de uma das pontes.

*A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça:
Modelação Hidráulica Para Duas Áreas Do Concelho de Matosinhos*

ponete, como pode ser verificado no perfil transversal correspondente à ponte (figura 43), atingindo a cota máxima de 3,9 metros, contrariamente aos resultados iniciais onde a ponte coluna de água atinge os 4,2 metros.

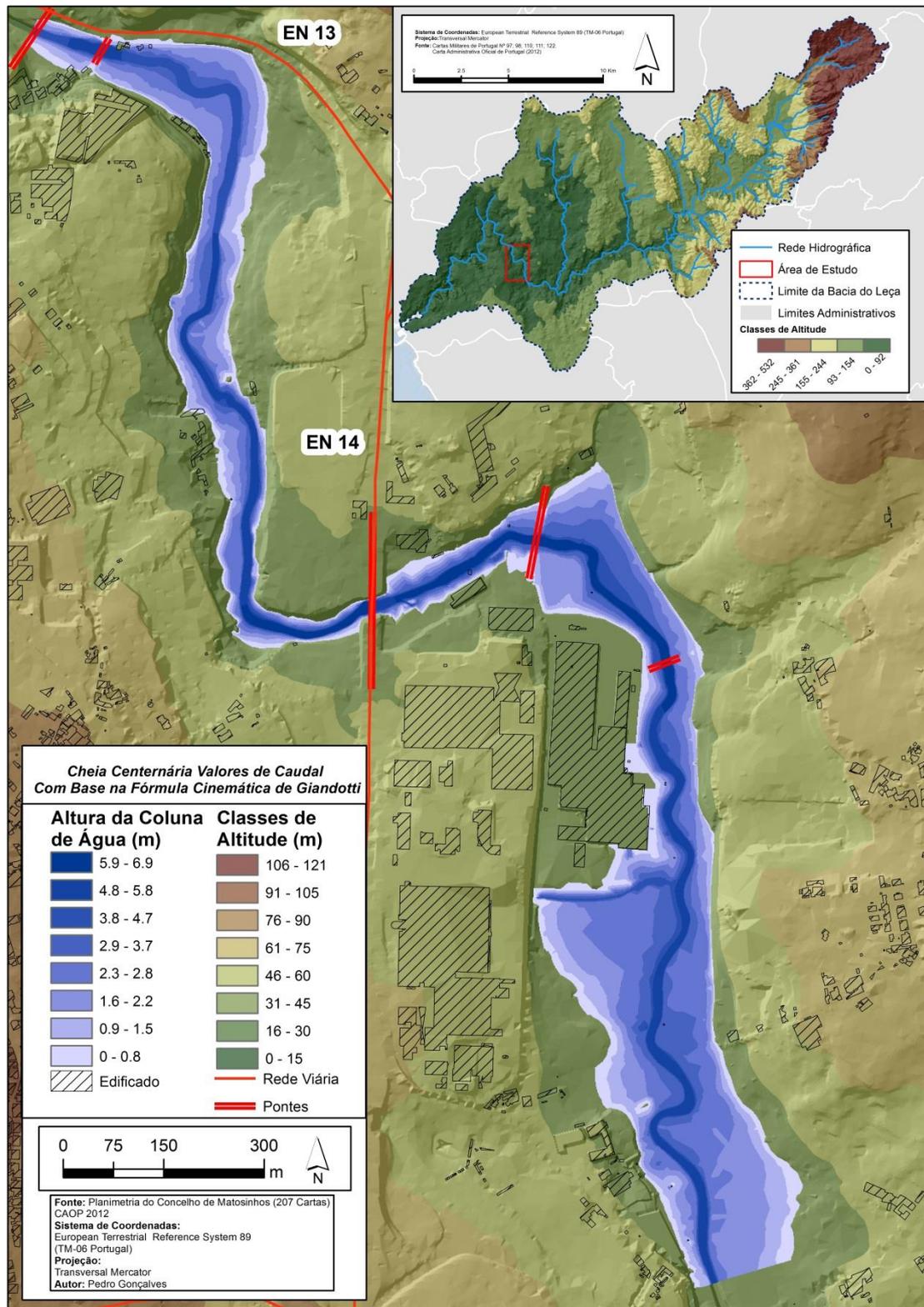


Figura 44 – Resultados finais para a área de estudo de Leça do Balio. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de Giandotti.

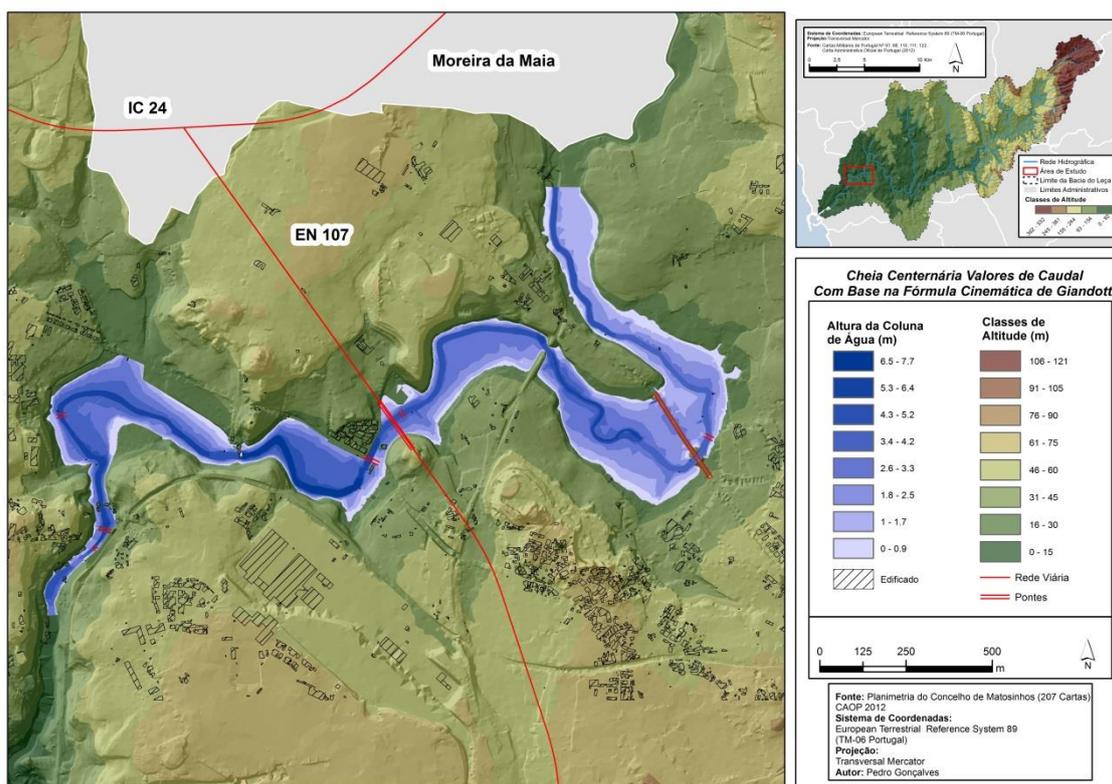


Figura 45 – Área de estudo de Santa Cruz do Bispo. Representação de uma cheia centenária baseado nos valores de caudal adotados com base na fórmula cinemática de *Giandotti*.

O sector da rua da Pinguela foi um sector muito trabalhado, não sendo de estranhar grandes diferenças ao nível dos resultados obtidos. No modelo inicial, a água atingia as casas da margem direita do rio, sendo que com a inclusão dos muros a água não atinge as habitações referidas. A altura da coluna de água no talvegue neste sector atingiu os 5,3 metros em oposição aos 2,3 metros registados no modelo inicial. Este sector teve apenas uma habitação atingida pela cheia de 2001, podendo a mesma ser verificada na figura 39C sendo a cota atingida pela água suficiente para a inundação da habitação.

A figura 46 retrata o sector da rua da Pinguela, comparando uma cheia centenária, com o MDT original (imagem A) e com o MDT corrigido (imagem B). Pode ser verificado que a inclusão de muros, neste sector limitou o avanço da cheia, na margem esquerda, quer junto as habitações, quer próximos a estrada, mais a jusante.

Na margem direita do rio Leça, neste sector também foi incluído um muro com aproximadamente as mesmas medidas que na margem direita, mas, no entanto, este aparentemente não limitou o avanço da cheia, podendo este facto ser explicado devido à entrada de água em sectores mais a montante, e como não se adicionou mais elementos a montante da habitação, a água pode circundar a habitação livremente.

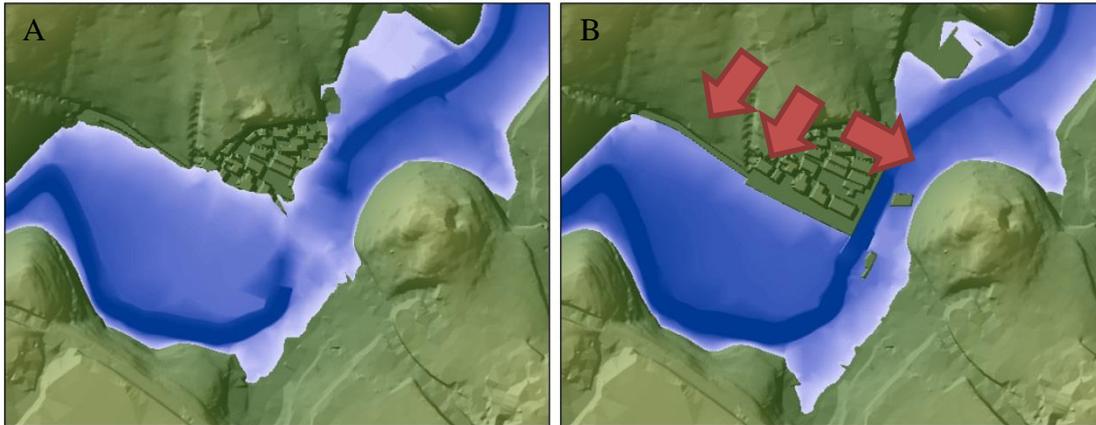


Figura 46 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da rua da Pinguela.

No sector do Monte de São Brás, embora as alterações não tenham sido muito acentuadas, apenas com a inclusão do moinho, açude habitações e muros que circundavam a propriedade, verificaram-se alterações profundas nos resultados.

Considerando a figura 47 que retrata o sector do Monte de São Brás, comparando uma cheia centenária, com o MDT original (imagem A) e com o MDT corrigido (imagem B), verifica-se que a montante da habitação, o perímetro de inundação é maior, no caso do MDT corrigido. A inclusão do moinho provocou a subida da coluna de água, sendo a altura máxima da água, no caso do MDT original de aproximadamente 4,5 metros enquanto no MDT corrigido, a cota da água atinge os 7,2 metros, a contar do talvegue do rio. No caso dos resultados com Base no MDT corrigido, a cota da água junto a habitação é de aproximadamente 1 metro, resultados consistentes com o referido pelos moradores.

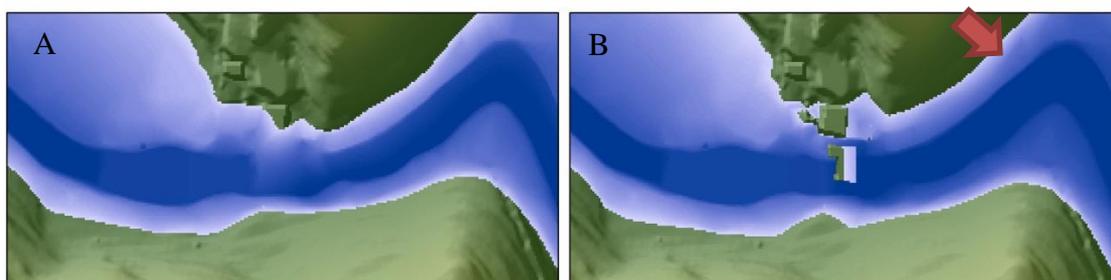


Figura 47 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector do Monte de S. Brás.

O sector da prisão de Santa Cruz do Bispo sofreu apenas alterações menores, com a adição dos muros, mas no entanto, como nos casos anteriores, condicionam os perímetros de inundação.

Pode ser verificado na figura 48, que embora não existam grandes diferenças entre a imagem A (correspondente ao MDT original) e B (correspondente ao MDT

Resultados

trabalhado), o perímetro de inundação, na imagem B, encontra-se mais regular, seguindo o traçado dos muros incorporados. A adição destes elementos possibilitou uma melhor calibração do modelo indo de encontro ao que os residentes referem. A água, segundo estes, não atinge a estrada, assinalada na imagem B, nem as zonas agrícolas a cotas mais elevadas.

A altura da coluna da água, neste sector, varia entre os 5,6 metros, como MDT original, e 5.9 metros, com o MDT corrigido.

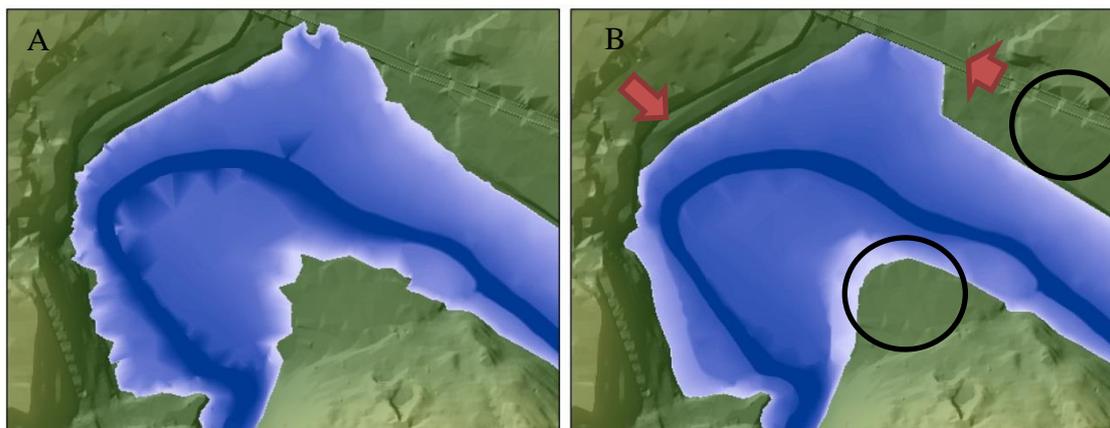


Figura 48 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da prisão de Santa Cruz do Bispo.

Por fim, o sector da ponte do Carro revela alterações muito significativas, nomeadamente na altura da coluna de água, efeito das profundas alterações geométricas efetuadas neste sector.

A correção das margens e inclusão de edifícios, neste sector possibilitou uma maior aproximação do modelo à realidade, podendo ser verificável na figura 49 as diferenças obtidas. A inclusão de edifícios limitou o avanço da cheia, podendo ser verificado na imagem B, no ponto de validação 1, na residência onde foram inquiridos os moradores a água atinge a cota de 1 metro e no ponto de validação dois, no moinho, a água atinge a cota de 4.5 metros a contar do talvegue e aproximadamente 1.8 metros a contar da superfície regularizada. Estes resultados

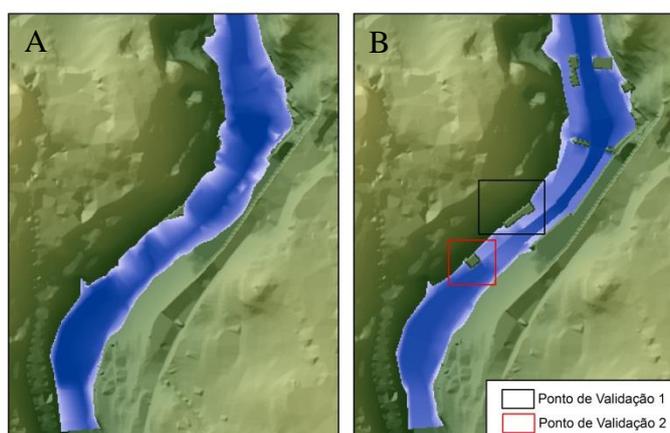


Figura 49 - Resultados iniciais comparativamente aos resultados finais - pormenor do sector da Ponte do Carro.

mostram-se consistentes com os dados relatados pela população e observados no campo.

A altura máxima da coluna de água é de 5,6 metros a montante da ponte do carro, com base no MDT corrigido, por outro lado, no mesmo local e com base no MDT original a altura máxima registada é de 6,3 metros. Pode ser verificado na figura 50, a altura e velocidade da água no perfil a jusante da ponte do Carro, podendo ser constatada a altura da coluna de água na ponte, assim como a velocidade da água nesta secção.

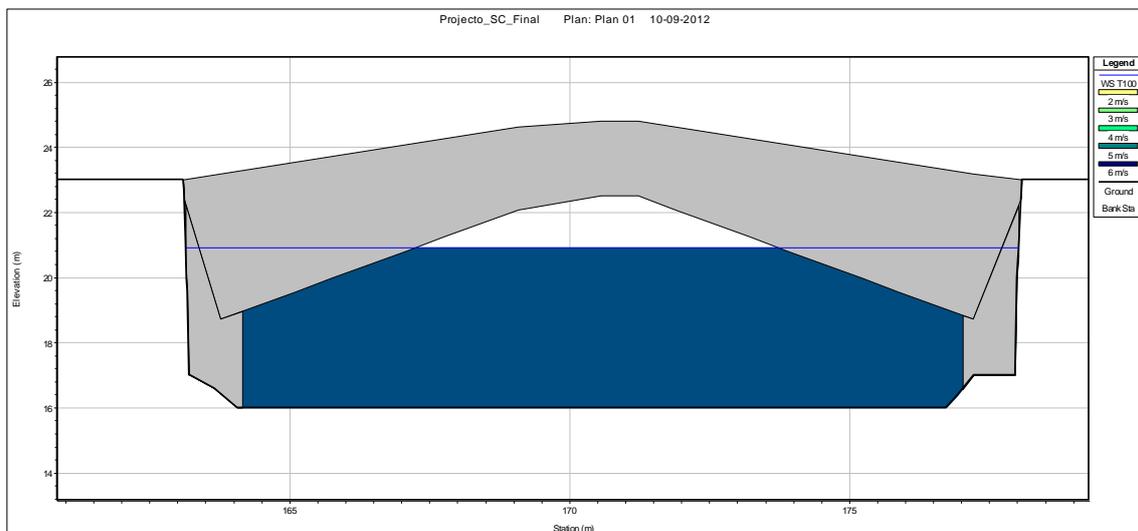


Figura 50 - Ponte do Carro, altura e velocidade da água. Simulação de uma cheia centenária, com base no MDT alterado.

O canal demonstra diferenças significativas nas alturas da coluna de água, sendo que no MDT corrigido foi registado em algumas secções uma diferença de pelo menos um metro relativamente ao MDT original.

A tabela 27 resume os resultados obtidos, para os três períodos de retorno, nas duas áreas de estudo. Nesta tabela pode ser verificada, a área ocupada pelas cheias modeladas, para diferentes períodos de retorno. Para a área de estudo de Santa Cruz do Bispo, comparando uma cheia centenária a cheias com recorrência de 50 e 10 anos, pode ser verificado uma diminuição de 3 e aproximadamente 9 % de área respetivamente, por outro lado, existe uma amplitude de 1,2 metros entre uma cheia com período de retorno de 10 anos e uma cheia centenária.

Na área de estudo de Leça do Balio, as diferenças são aproximadas, verificando – se um decréscimo de aproximadamente 10% de área comparando a cheia centenária a

Resultados

uma cheia com recorrência de 10 anos e novamente 3 % entre uma cheia centenária e uma cheia com recorrência de 50 anos. A altura da coluna de água apresenta uma variação de 80 centímetros entre os três períodos de retorno considerados.

Período de Retorno	Santa Cruz do Bispo		Leça do Balio	
	Área (m ²)	Altura (m)	Área (m ²)	Altura (m)
T 10	418781.71	6.7	272281.87	6
T 50	445785.19	7.4	292149.71	6.6
T 100	460004.97	7.72	302181.14	6.8

Tabela 27 – Diferenças registadas, para diferentes períodos de retorno, na área afectada pela cheia, assim como a altura da coluna de água para as duas áreas de estudo.

A tabela 28 fornece uma comparação direta entre os resultados calculados inicialmente e os resultados finais, podendo ser verificado que para todos os períodos de retorno e para as duas áreas de estudo os perímetros de inundação são menos extensos com base no MDT, corrigido que no MDT original, sendo as diferenças mais significativas no sector de Leça do Balio.

Por outro lado, deve ser referido que em Santa Cruz do Bispo, embora exista uma diminuição da área inundável, a altura da coluna de água é superior nos resultados com base no MDT corrigido. Por outro lado, em Leça do Balio, a cota máxima da coluna de água é mais reduzida, comparando o MDT corrigido com o MDT original.

Período de Retorno	Santa Cruz do Bispo		Leça do Balio	
	Diferença Área (%)	Diferença Altura m	Diferença Área (%)	Diferença Altura m
T 10	-4.35	0.75	-7.39	-0.29
T 50	-4.31	0.95	-7.23	-0.26
T 100	-3.06	1.07	-6.84	-0.29

Tabela 28 – Diferenças observadas, entre os resultados iniciais e finais, na área afetada e altura da coluna de água, para três períodos de retorno, para as duas áreas de estudo.

4. CONCLUSÕES

4.1. Vantagens e limitações na modelação da planície de inundação no concelho de Matosinhos

No decurso do trabalho verificaram-se diversos problemas, nomeadamente ao nível de informação de base para a concretização dos objetivos propostos, destacando-se: a falta de dados meteorológicos e udométricos, a informação de base para construção de MDT detalhados e informações históricas sobre a ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do Leça.

A existência de dados udométricos, permitiria a utilização de caudais de ponta de cheia reais. Caso esses dados existissem poderia ser modelada a cheia de Março de 2001, o que conduziria a uma modelação mais precisa dos perímetros de inundação. A utilização de dados udométricos, revestiria o modelo criado neste trabalho, de um grau maior de realismo na medida em que os caudais não seriam estimados com base nas fórmulas referidas.

Por outro lado, os dados meteorológicos revelam grandes lacunas, mais concretamente ao nível de séries contínuas de precipitação (30 anos). Desta forma, optou-se por utilizar os caudais calculados por outra autora para as secções estudadas, comparando duas fórmulas distintas para o cálculo de caudais de ponta de cheia.

Outro aspeto crucial para uma correta modelação de cheias com base em modelos hidráulicos, reside no detalhe do MDT utilizado e nos elementos que podem ser incorporados neste, como estradas, edifícios, muros, etc. Embora a cartografia disponibilizada oferecesse, nas curvas de nível, uma equidistância de 1 metro, carecia do detalhe necessário para uma rigorosa modelação.

O processo de correção do MDT foi uma experiência morosa, havendo a necessidade de trabalhar pequenos sectores, sempre à base de tentativa-erro, de forma a aproximar o mais possível o MDT da realidade. O trabalho de campo, neste sentido, é crucial e essencial. Embora não tenha sido possível utilizar uma estação total para um levantamento mais detalhado dos perfis e dos obstáculos à circulação, decidiu-se utilizar um distanciómetro para o cálculo de diversas alturas de obstáculos e margens, os quais foram posteriormente incorporados no MDT.

Com efeito, constatamos que o MDT de base, assim como os ficheiros geométricos, exercem uma grande influência no modelo hidráulico, *i.e.*, quanto mais

detalhado for o MDT, mais fidedignos serão os resultados. Relativamente aos ficheiros geométricos, o HEC-RAS manifesta alguns problemas, nomeadamente ao nível de inclusão de mais que um muro por margem. Desta forma decidiu-se efetuar modificações no MDT de base, incorporando muitos destes elementos, também para ilustrar que na maior parte dos casos, deve sempre verificar-se a informação de base, não devendo ser apenas construído os modelos do vale sem uma verificação cuidada dos dados.

A quantidade dos perfis transversais criados, também exerce uma influência significativa na qualidade dos resultados, pois, quanto mais perfis forem traçados, maior detalhe terá o resultado final, dado que o *software* apenas consegue ter informação das cotas do terreno com este elemento (Cook and Merwade 2009), não existindo possibilidade de incluir um ficheiro de terreno no HEC-RAS.

A validação dos resultados é fundamental para se verificar se este corresponde ao observado. Neste sentido, a população ribeirinha foi extremamente prestável, fornecendo indicações sobre a extensão e altura da coluna de água, assim como nos indicou os pontos mais críticos de cada sector, fornecendo inclusive algumas fotografias do local para atestar o episódio de cheia. Este tipo de informação é essencial, pois através destes registos é possível ter uma ideia da magnitude do evento e confrontar os resultados obtidos com dados de terreno, efetuando-se modificações e afinações no modelo, caso se verifiquem grandes diferenças.

A modelação hidráulica de cheias, com base no *software* HEC-RAS, como processo, é relativamente rápido mas depende de bons elementos geométricos e de terreno, como se verificou. Pelos resultados obtidos, constatamos uma assinalável fiabilidade deste *software* para a aquisição de perímetros de inundação, assim como para gerar alturas da coluna de água. Como se abordou no capítulo da validação, quer os resultados iniciais, quer os resultados finais apresentavam uma boa fiabilidade, comprometida apenas pela falta de detalhe do MDT em alguns sectores.

Alguns autores defendem que este *software gratuito* é uma solução, em alguns casos bastante superior, relativamente a outro tipo de *software* pago e complexo, destacando a rapidez na sua aprendizagem, manuseamento simples, rapidez no processamento dos dados e fiabilidade dos resultados (Hicks and Peacock 2005) .

Este *software* conta com um pacote muito robusto de funcionalidades, o que foi por um lado impossível de explorar neste trabalho devido ao tempo disponível e por outro porque não foi possível obter os dados necessários para correr outras rotinas de

cálculo como o modo *unsteady flow*. Este é um modo mais complexo de análise dado que considera o tempo, através da introdução de hidrogramas, e porque considera que a água não se comporta de forma linear, mas como um fluxo inconstante, existindo assim variações de direção e de velocidade no canal. Outro tipo de análises que não foi possível fazer com este *software* foram análises de deposição e transporte de sedimento, através da rotina própria que este programa disponibiliza.

Este apresenta como resultados, como referido, dados de velocidade, de tensão nas margens e cisalhamento que podem ser utilizados para o cálculo automático de erosão, o que, trabalhando grandes sectores ou bacias hidrográficas pode ser uma mais-valia, dado o tempo que é despendido no cálculo deste parâmetro. Neste trabalho, não foi possível efetuar este procedimento dado, que devido a uma anomalia de *software*, não foi possível gerar os pontos e consequentemente os resultados em formato *raster* correspondentes.

Embora se tenha apenas decidido modelar dois pequenos sectores na bacia hidrográfica do rio Leça, o *software* permite a modelação de uma rede de canais complexos (Warner, Brunner et al. 2009, Ackerman 2011), ou seja a bacia hidrográfica integral. Neste sentido, a conjugação entre o método hidrológico e o método hidráulico é uma mais-valia pois, este permite a delimitação aproximada da bacia e sub-bacias hidrográficas, assim como gerar dados de escoamento para estas, sendo necessário apenas introduzir os dados de escoamento calculado no HEC-HMS no HEC-RAS.

A definição de perímetros de inundação, assim como o cálculo das alturas máximas da coluna de água para os diferentes períodos de retorno, além de ser fundamental para a segurança e proteção dos moradores ribeirinhos, dotam os agentes responsáveis pelo ordenamento do território de informações detalhadas sobre eventos potencialmente destrutivos, podendo ser tomadas medidas de regularização antecipadamente para promover a segurança dos habitantes.

4.2. Perímetros de inundação e Ordenamento do Território

O conhecimento inerente aos perímetros de inundação e alturas da coluna de água dota todos os agentes responsáveis pelo planeamento territorial, de informação vital sobre o território e possíveis efeitos de uma cheia que possam ser nefastos, quer para a população e seus bens materiais, quer para as edificações e as infraestruturas. A

definição destes perímetros possibilita, à partida, uma visão mais detalhada do território, na medida em que podem ser tomadas medidas corretivas que visem a mitigação dos efeitos das cheias e a redução da vulnerabilidade a esses efeitos.

A erosão das margens é outro problema que deve ser tido em consideração na medida que a erosão afeta por um lado as margens em estado natural, assim como, as margens que se encontram artificializadas, acarretando potenciais problemas como a sustentação de estradas, pontes e edificações.

Reconhecendo a problemática, elaborou-se cartografia, que de forma sintética transmite as áreas onde potencialmente se verifica erosão ou deposição de materiais pela ação da corrente fluvial (figura 51).

A definição de áreas onde existe deposição ou erosão foi baseado no trabalho de *Allaby* (Allaby and Garratt 2003), em que se demonstra a forma como a rede hidrográfica molda a planície aluvial, sendo o material erodido de uma das margens depositado na margem oposta. A velocidade da água, não se comporta da mesma maneira em todo o canal, principalmente quando o rio apresenta meandros. Nestes, a água têm tendência para acelerar nas margens côncavas, provocando erosão das margens através do efeito de arrastamento que a água tem sobre as partículas. Por outro lado, nas margens convexas, a velocidade da água é mais reduzida o que possibilita a deposição de sedimentos (Schumm 1977, Xu and Cheng 2002, Allaby and Garratt 2003).

As figuras 51A e 51B, retiradas do *Google Earth*, datadas de 13/01/2003 (dois anos após a cheia centenária de 21 de Março de 2001), mostram ainda as áreas onde se depositaram sedimentos nas margens do rio Leça, nos sectores da cadeia de Santa Cruz do Bispo e da rua das Carvalhas. Com efeito, através dos elementos verificados nestas figuras foram construídas as figuras 51C e D. Estas, indicam por um lado as áreas erodíveis e por outras as áreas onde se verifica deposição de sedimentos. Estas análises são importantes na medida em que a definição destas áreas permite a atuação dos decisores municipais na salvaguarda dos terrenos agrícolas, incluindo proteções nas margens, que diminuem o ritmo de erosão verificado.

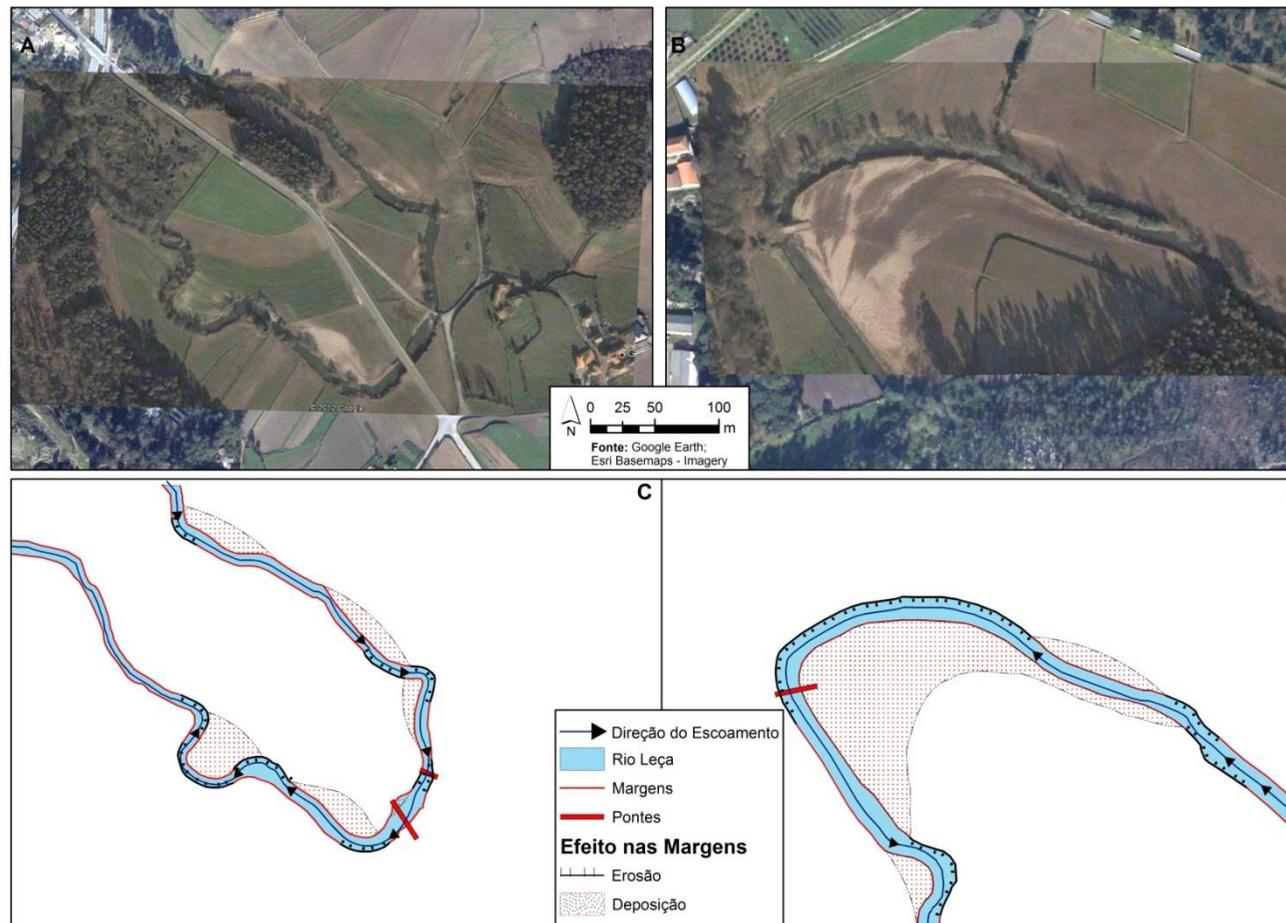


Figura 51 - Áreas de acumulação de sedimentos e erosão nas margens do rio Leça, visíveis após a cheia centenária de março de 2001³⁵.

³⁵ Fonte, ortofotos provenientes do *Google Earth* referentes à data de 13/01/2003

Este tipo de informação é particularmente útil para o planeamento de implementações hidráulicas no leito, como a construção de pontes. Verificando a ponte mais recente (fig.52), presente no sector da rua das Carvalhas, pode ser atestado o referido. A inclusão de muros de sustentação na ponte evita por um lado a erosão rápida das margens. A figura demonstra que a margem côncava é aquela que sofre mais com a circulação da água, dada a falta de depósitos nessa margem. É importante referir que caso os muros de suporte da ponte não existissem, a erosão das margens seria acentuada e que poderia eventualmente colocar em risco a estrutura ou levar eventualmente ao colapso da margem. Por outro lado a margem direita do rio, apresenta uma quantidade significativa de depósitos, o que indica deposição de sedimentos, ocupando uma boa percentagem da secção da ponte.

Convém fazer referência que em caso de uma cheia, a percentagem ocupada com sedimentos da secção livre da ponte, é bastante menor o que irá condicionar de forma significativa quer a quantidade de água que poderá ser escoada pela ponte, quer o comportamento da água, devendo, estas áreas de deposição, ser regularizadas através da remoção destes materiais.

Os muros de sustentação das margens são desta forma essenciais para o controlo da erosão das margens, não devendo ser descurada a sua importância quer na preservação dos espaços naturais, quer já artificializados.

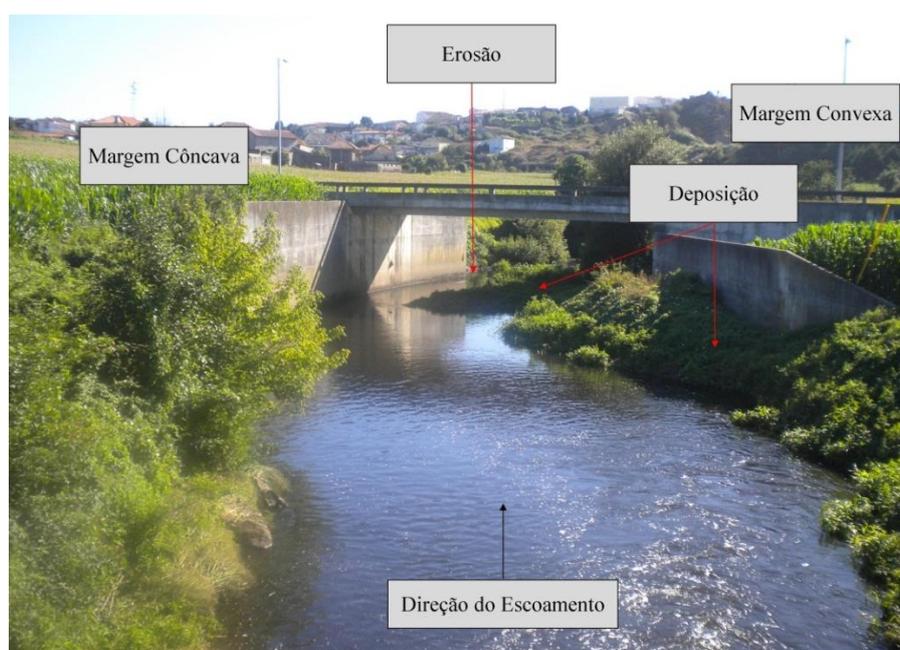


Figura 52 - Ponte mais recente no sector da rua das Carvalhas (15/08/2012) – Exemplo de áreas de deposição e erosão.

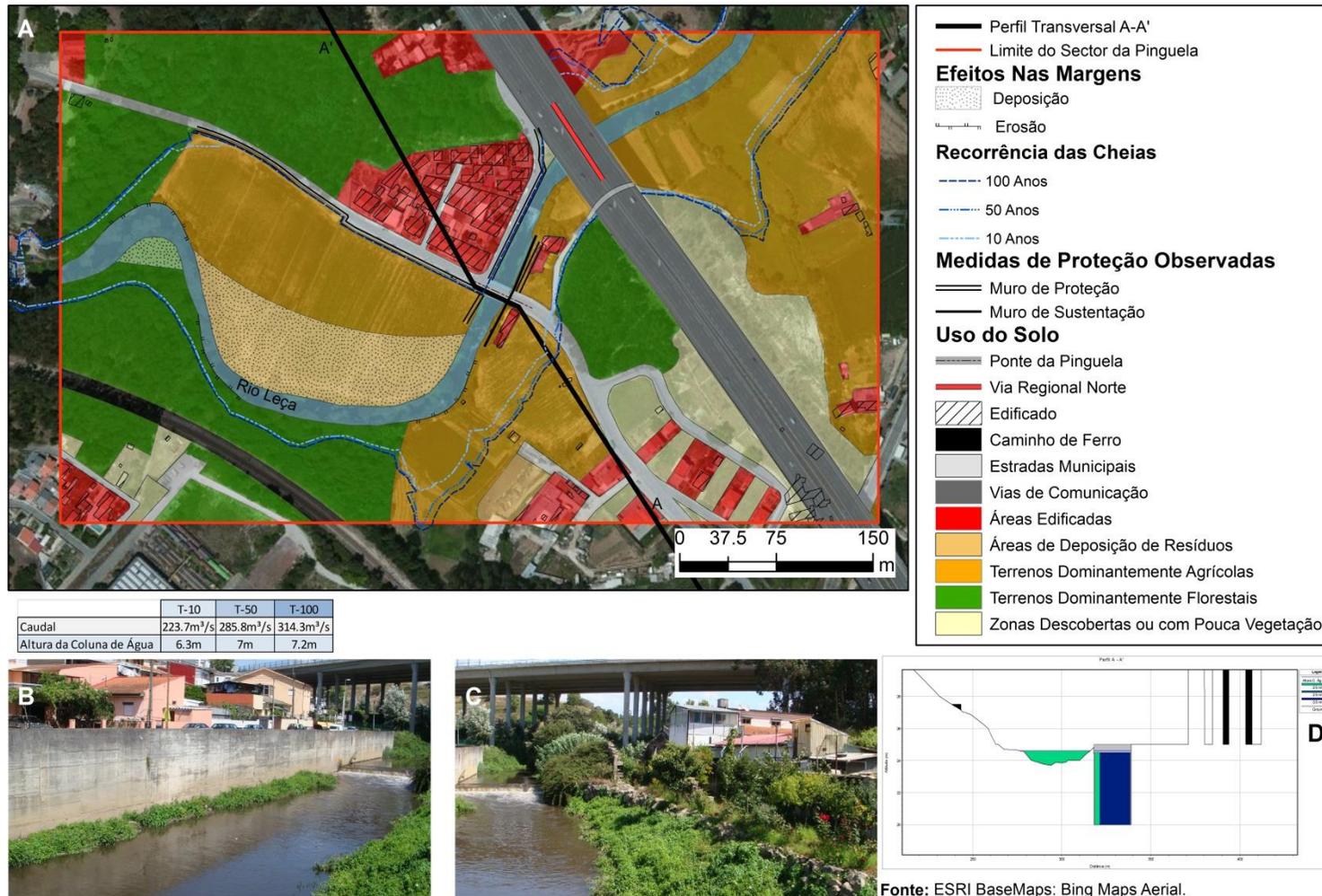


Figura 53- Carta de zonas inundáveis para uma área de risco - exemplo para o sector da rua da Pinguela.

O Artigo 7º do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro define com algum detalhe os elementos necessários para a construção de cartas de zonas inundáveis para áreas de risco. Com base nessa proposta, efetuou-se um exemplo cartográfico (fig. 53) para o setor da Rua da Pinguela seguindo os critérios definidos no referido artigo, bem como, incorporando alguns elementos que constam no Artigo 8º, referente a cartas de risco de inundação, nomeadamente, uso do solo dominante, edificado, estruturas rodoviárias e ferroviárias, etc.

Com efeito, considerando a figura 53A, estão representados os perímetros de inundação com períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, assim como, o uso do solo dominante, a informação sobre o edificado, que se considera pertinente para a identificação dos elementos expostos, constando inclusivamente alguns detalhes de infraestruturas presentes no leito/margens, como os muros de proteção e sustentação das margens e as pontes que atravessam o curso de água.

Pela figura verifica-se que nenhum dos perímetros delimitados ultrapassa os muros construídos na margem direita, embora deva ser assinalado que a altura da coluna de água numa cheia centenária estará próxima do topo dos muros de proteção, fato que deve ser tido em consideração, dado que em cheias com uma recorrência superior a 100 anos, as habitações da margem direita podem ser atingidas.

Como referido anteriormente, embora a cota da água não ultrapassa a cota do topo dos muros (fig. 53B e 53C), verifica-se que a água atinge as habitações da margem esquerda do rio, salientando-se a pequena janela presente na habitação pela qual, os moradores afirmam, que a água entrou. Por outro lado, as traseiras da habitação também não oferecem qualquer proteção ao avanço da cheia o que possibilita o contorno/inundação da habitação pela coluna de água.

Embora, próximo às habitações, a altura da coluna de água não ultrapasse os 5.3 metros numa cheia centenária, esta atinge a cota máxima de 7.2 metros junto aos campos agrícola a jusante da ponte. As variações da altura da coluna de água devem ser consideradas para o dimensionamento de estruturas, como pontes, estradas, habitações, devendo existir sempre que possível, uma margem de segurança, entre os dados obtidos através da modelação e a implementação no terreno.

Por outro lado, a ponte deste sector, segundo os relatos dos moradores, na cheia de 2001, a água não ultrapassou a cota do tabuleiro, verificando-se no perfil transversal a jusante da ponte (fig53C), que tal se confirma. Este, além de demonstrar a altura da coluna de água na cheia centenária modelada, apresenta dados de velocidade do

escoamento elevadas, quase a totalidade do canal apresenta velocidades na ordem dos 3m/s com velocidade mais elevadas na margem direita.

Considerando a figura 53A, observa-se que as cheias atingem neste sector áreas agrícolas, predominantemente. A definição de zonas de potencial erosão possibilita, novamente, a atuação sobre o território na medida em que, embora a erosão não possa ser impedida, a inclusão de muros de sustentação das margens, como visível na figura 53C, poderão minimizar o efeito que esta tem sobre as margens e conseqüentemente, a erosão dos campos agrícolas. A proteção dos terrenos agrícolas é fundamental dado o elevado potencial agrícola que estes apresentam (Decreto-Lei 73/2009 de 31 de Março).

A tabela 29 representa as percentagens de área ocupada por cada um dos perímetros de inundação apresentados na figura 52A. Nesta tabela, verifica-se que os usos do solo mais afetados por cheias modeladas correspondem a terrenos predominantemente agrícolas e florestais. No entanto, destaca-se que as habitações afetadas e as estradas municipais correspondem aproximadamente a 3 % da área afetada pelas cheias, o que embora não pareça significativo no total, deve ser considerado dado os prejuízos materiais que estão subjacentes e os transtornos que podem acarretar.

	Área Afetada T10	Área Afetada T50	Área Afetada T100
Áreas Edificadas	0.79%	1.12%	1.42%
Estradas Municipais	1.79%	1.92%	1.95%
Terrenos Agrícolas	85.4%	84.48%	84.01%
Terrenos Florestais	11.62%	11.98%	12.08%
Zonas Descobertas	0.35%	0.47%	0.53%
Total	100%	100%	100%

Tabela 29 - Percentagem de área ocupada, no sector da Rua da Pinguela, por cheias com recorrência de 10, 50 e 100 anos.

Sabendo que o risco para as populações afetadas neste sector só poderia ser anulado com a mudança dos residentes para outras áreas menos propícias à ocorrência de cheia, deve referir-se que a ocupação do território nas áreas ameaçadas pela ocorrência de cheias deve ser condicionada. Com efeito, baseando-nos no trabalho desenvolvido por Griffiths (2010), demonstra-se em que medida a informação relativa aos perímetros de inundação pode ser aplicada no ordenamento do território através de imposição de medidas de restrição à edificação, ou desenvolvimento territorial



Figura 54- Delimitação de zonas de risco, através de períodos de retorno com a aplicação no Ordenamento do Território³⁶.

A figura 54 mostra que nas áreas sujeitas a cheias com período de retorno de 1 a 5 anos, existe uma restrição total a toda a ocupação territorial não essencial, devendo estas áreas ser aproveitadas para atividades lúdicas, áreas florestais ou agrícolas. Nas áreas que são afetadas por cheias com recorrência de 50 anos, deve existir um controlo apertado sobre o uso do solo, com medidas rigorosas, ao nível da implementação de novos edifícios. As áreas afetadas por cheias com recorrência de 100 anos, embora ainda existam restrições a alguns usos do solo, as edificações podem ser permitidas devendo, no entanto ser exigido que as edificações devam ser executadas de forma resistir/adaptar-se à ocorrência de inundações (Griffiths 2010).

O sector da rua da Pinguela deve ser encarado desta forma como um bom e mau exemplo na ótica do ordenamento do território. É notória a atenção que foi tomada com a construção de muros de proteção no sector, nomeadamente na margem direita, assim como um pouco mais a sul, delimitando as áreas agrícolas da área urbanizada, na medida que a sua inclusão delimita o avanço da cheia nessa área. No entanto a presença de habitações na margem esquerda do rio, sujeitas aos efeitos das cheias, nomeadamente através do avanço da cheia pelo flanco da habitação (a montante da ponte), dado que não existe nenhuma medida de contenção aí localizada e outra habitação a jusante da ponte, que não tem qualquer proteção contra as cheias, situando-se a uma cota mais baixa que o tabuleiro da ponte.

Os perímetros de inundação e alturas da coluna de água podem ser utilizados de forma preventiva, no caso de urbanização de novas áreas, através do estudo antecipado do comportamento do rio em caso de cheia, definindo-se desta forma restrições à edificação ou então medidas que permitam aos edifícios resistir a esses eventos. Por outro lado, como já visto, este tipo de informação pode ser utilizado para o dimensionamento de obras hidráulicas como pontes, podendo ser antecipado o

³⁶ Adaptado de Griffiths 2010

comportamento da ponte no caso de um evento extremo, podendo esta ser dimensionada para suportar tais eventos.

Desta forma, a aquisição de perímetros de inundação, independentemente do método utilizado para a sua delimitação, é uma mais-valia, não só devido a utilidade que estes têm no ordenamento do território, como na salvaguarda das populações e seus bens, habitações e infraestruturas.

Embora se considere que o rio Leça é um pequeno rio do Norte de Portugal, estudos semelhantes poderiam ser levados a cabo para os restantes rios portugueses, não só através da modelação de sectores onde se verificam grandes concentrações populacionais, mas para toda a bacia hidrográfica, definindo e criando sistemas de alerta para a população na iminência de cheias para desta forma ser possível avisar as populações em tempo útil, prevenindo por um lado a perda de vidas, como avultados prejuízos materiais.

BIBLIOGRAFIA

- Ackerman, P. (2011). Hec-GeoRas - GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS - User Manual. Davis, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources - Hydrologic Engineering Center: p.244.
- Aggett, G. R. and J. P. Wilson (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.
- Allaby, M. and R. Garratt (2003). Dangerous Weather - Floods, Facts on File Science Library.
- Araújo, M. (1991). Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral da Região do Porto. Departamento de Geografia. Porto, Faculdade de Letras da Universidade do Porto. **Doutoramento:** p.534.
- Asgharpour, S. E. and B. Ajdari (2011). "A Case Study on Seasonal Floods in Iran, Watershed of Ghotour Chai Basin." Procedia - Social and Behavioral Sciences **19**(0): 556-566.
- Ashley, S. T. and W. S. Ashley (2008). "Flood Fatalities in the United States." Journal of Applied Meteorology and Climatology **47**(3): 805-818.
- Bichançã, M. d. F. (2006). Bacias De Retenção Em Zonas Urbanas Como Contributo Para A Resolução De Situações Extremas: Cheias e Secas. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Mestrado:** 142.
- Borga, M., et al. (2011). "Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project." Environmental Science & Policy **14**(7): 834-844.
- Brandão, C., et al., Eds. (2001). Análise de Fenómenos Extremos: Precipitações Intensas em Portugal Continental. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos. Lisboa.
- Brunner, G. (2008). HEC-RAS, River Analysis System - Hydraulic Reference Manual. Davis, US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. (2010). Hec-Ras - River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. U.S.A.C.E. Davis: P.417.
- Cabezas, J. (1983). Fundamentos Basicos de Hidraulica, IICA Biblioteca Venezuela.
- Calçada, M., et al. (2003). Modelação de Cheias em Timor Leste. 6º SILUSBA - 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Cabo Verde: p.16.
- Chow, V. (2009). Open-Channel Hydraulics, Blackburn Press.

Bibliografia

Chow, V. T. (1962). "Hydrologic Determination of Waterway Areas for Design of Drainage Structures in Small Drainage Basins." Engineering Experiment Station Bulletin(462): 110.

Chow, V. T. (1964). Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology, McGraw-Hill.

Chow, V. T., et al. (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill.

Christofoletti, A. (1978). "A Morfologia de Bacias de Drenagem." Notícias Geomorfológicas **18**(36): p.130.

Cook, A. and V. Merwade (2009). "Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping." Journal of Hydrology **377**(1–2): 131-142.

Costa, P. (1986). As Cheias Rápidas de 1967 e 1983 na Região de Lisboa. Estudos de Homenagem a Mariano Feio.

Costa, T. and R. Lança (2011). "Hidrologia de Superfície." Instituto Superior de Engenharia - Universidade do Algarve - Departamento de Engenharia Civil.

Costa, T. d. and R. Lança (2001). "Sebenta de Hidráulica Aplicada - Condutos Livres." Instituto Superior de Engenharia - Universidade do Algarve - Departamento de Engenharia Civil: p.57.

Cramptom, S. (2007). Hec-Ras Dam Break Modeling of Gwinnett County's NRCS Facilities. Georgia Water Resources Conference. Georgia: p.3.

David, J. (1976). Determinação de Caudais de Ponta de Cheia em Pequenas Bacias Hidrográficas. Drenagem de estradas, Caminhos de Ferro e Aeródromos. Lisboa, LNEC.

Davie, T. (2012). Fundamentals of Hydrology, Taylor & Francis.

FEMA (2001). Policy for Use Hec-Ras in the NFIP. Washington, D.C.

Fernández, D. S. and M. A. Lutz (2010). "Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis." Engineering Geology **111**(1–4): 90-98.

Gavin, K. and J. Xue (2008). "A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes." Computers and Geotechnics **35**(2): 223-230.

Giandotti, M. (1953). Considerazioni Idrologiche Sulle Piene del Po: Con Speciale Riguardo Alla Piena del Novembre 1951, Istituto poligrafico dello Stato.

Griffiths, J. S. (2010). Investigating The Role Of Landscape Evolution In Determining Ground Conditions For Engineering: Examples From South-West England. Geoscience In South-West England.

- Gunn, A. M. (2008). Natural Disasters. Encyclopedia of Disasters : Environmental Catastrophes and Human Tragedies, Library of Congress.
- Hicks, F. and T. Peacock (2005). "Suitability of Hec-Ras for Flood Forecasting." Canadian Water Resources Journal **30**(2): p.16.
- Hicks, F. E. and T. Peacock (2005). "Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting." Canadian Water Resources Journal **30**(2): 159-174.
- Horritt, M. S. and P. D. Bates (2002). "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." Journal of Hydrology **268**(1-4): 87-99.
- Kirpich, Z. (1940). "Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds." Civ. Eng. **10**(6): p.362.
- Konrad, C. (2003). Effects of Urban Development on Floods. USGS. Tacoma: 4.
- Lança, R., et al. (2005). "Metodologia para o Estudo Hidráulico e Sedimentológico em Pontes. Aplicação à Ribeira de Oeiras, entre as Localidades de Corte de Pão e Água e de Morena, Concelho de Mértola." Tecnovisão. Faro : Escola Superior de Tecnologia: p.8.
- Lemmens, M. (2009). "Airborne Lidar Sensors." GIM Internacional **23**(2): 16-19.
- Lencastre, A. and F. M. Franco (1992). "Lições de Hidrologia." Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade nova de Lisboa **2ª Edição**: 453p.
- Lopes, L. (S/D). Análise Do Escoamento De Superfície. Estudo Do Hidrograma. Departamento Florestal, Universidade De Trás Os Montes e Alto Douro: 7.
- Loureiro, J. M. (1984). "Expressão para o Cálculo do Caudal Máximo de Cheia em Cursos de Água de Portugal " Recursos Hídricos - Lisboa **5**(1).
- Louro, S. and L. Lourenço (2005). O comportamento Hidrológico do Rio Mondego Perante Valores de Precipitação Intensa, em Coimbra. Territorium: 9.
- Lyra, G., et al. (2010). "Coeficiente de Rugosidade de Manning para o Rio Paracatu." Revista Brasileora de Engenharia Agrícola e Ambiental **14**(4): 8.
- Maia, R., et al. (2010). Estudo Hidráulico e Fluvial dos Rios Âncora, Coura e Neiva, Polis Litoral Norte. **I**: p.64.
- Marafuz, I. (2011). Inundações Urbanas e Cheias Progressivas em Arouca. Casos de Estudo, Metodologias de Análises e Ordenamento do Território. Departamento de Geografia. Faculdade de Letras, Universidade do Porto. **Mestrado**: 152.
- Martins, F. (1999). "Elementos Gerais de Hidrologia." Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Departamento de Engenharia Civil.

Bibliografia

Martins, F., et al. (2003). "Passagens Hidráulicas. Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico e Estimativa de Custos Assistidos por Computador." Recursos Hídricos **24**(3): 14.

Martins, F. J. P. (2000). Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais. Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. Mestrado: 310.

McCuen, R. H. (1982). A guide to hydrologic analysis using SCS methods, Prentice-Hall.

Meyer, V., et al. (2008). "A Multicriteria Approach for Flood Risk Mapping Exemplified at the Mulde River, Germany." Nat Hazards **48**.

Monico, J. (2000). "Posicionamento por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma Solução para a Geodinâmica." Brazilian Journal of Geophysics **18**(1): 10.

Pistocchi, A. and P. Mazzoli (2002). Use of HEC-RAS and HEC-HMS Models with ArcView for Hydrologic Risk Management. iEMSS 2002 Congress Proceedings. Lugano: p.6.

Quaresma, I. (2008). Inventariação e Análise de Eventos Hidro-Geomorfológicos com Carácter Danoso em Portugal Continental. Departamento de Geografia. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa Mestrado: 100pp.

Ramos, C. (2005). Programa de Hidrogeografia - Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial.

Ramos, C., et al. (2007). Cheias – os seus ciclos e prevenção. 2.º Ciclo de Debates À Volta do Ambiente Loures.

Ramos, C. and E. Reis (2001). As Cheias no Sul de Portugal em Diferentes Tipos de Bacias Hidrográficas.

Rashed, T. and J. Weeks (2002). "Assessing Vulnerability to Earthquake Hazards Through Spatial Multicriteria Analysis of Urban Areas." Geographic Information Science **17**(6): 547-576.

Rodrigues, R., et al. (2003). A Regularização Promovida Pelos Aproveitamentos Hidroelétricos, Erradamente Apreendida como Estímulo Adicional na Progressiva Ocupação dos Leitões de Cheia
II Simpósio Sobre Aproveitamentos Hidroeléctricos. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro: 8.

S.Jonkman and J.Vrijling (2008). "Loss of Life due to Floods." Flood Risk Management: 14.

Sande, C., et al. (2003). "A Segmentation and Classification approach of IKONOS-2 Imagery for Land Cover Mapping to Assist Flood Risk and Flood Damage Assesmet." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **4**: p.13.

Santos, P. M. P. d. (2009). Cartografia de Áreas Inundáveis a Partir do Método de Reconstituição Hidrogeomorfológica e do Método Hidrológico Hidráulico: Estudo Comparativo na Bacia Hidrográfica do Rio Arunca. Departamento de Ciências da Terra. Coimbra, Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia. **Mestrado**: p.163.

Schaake, J., et al. (1967). "Experimental Examination of the Rational Method." Journal of the Hydraulics Division **HY6**(ASCE,Nº 93): p.27.

Scheuer, S., et al. (2010). Integrated Assessment of Urban Flood Risk, Coping Capacity and Vulnerability. IAPS - Vulnerability, Risk and Complexity: Impacts of Global Change on Human Habitats. Leipzig.

Schumm, S. (1977). The Fluvial System. New York.

Shreve, R. (1966). "Statistical Law of Stream Number." Jornal of Geology **74**: 20.

Soares, L. (2002). "Texto de Apoio das Aulas de Morfometria Fluvial." p.41.

Soares, L., et al. (2012). Contexto Geográfico: Território do Leça, in: O Rio da Memória: Arqueologia do Território do Leça. Matosinhos, Câmara Municipal de Matosinhos.

Straatsma, M. W. and M. J. Baptist (2008). "Floodplain roughness parameterization using airborne laser scanning and spectral remote sensing." Remote Sensing of Environment **112**(3): 1062-1080.

Sunkar, M. and S. Tonbul (2011). "Hydrographic analysis of Iluh River (Batman) in relation to flood and torrent events." Procedia - Social and Behavioral Sciences **19**(0): 537-546.

Temez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Velhas, E. (1991). "A Bacia Hidrográfica do Rio Leça: Estudo Hidroclimatológico." Revista da Faculdade de Letras - Geografia **VH**(1): p.113.

Warner, J., et al. (2009). Hec-Ras, River Analysis System Applications Guide. U.S.A.C.E.: P.351.

Xu, J. and D. Cheng (2002). "Relation between the erosion and sedimentation zones in the Yellow River, China." Geomorphology **48**(4): 365-382.

Endereços Eletrónicos

<http://dqa.inag.pt/>

http://dqa.inag.pt/actu_2012/Ficheiros%20Site%20DQA/P%C3%A1g1%20%20DQA/01%202000_60_CE%20%20Directiva%20Quadro%20da%20%C3%81gua.pdf

<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>

http://saltonseasdsu.edu/legacy_tales_steady_unsteady_hec_ras.html

<http://www.ces.uc.pt/aigaion/attachments/IL542005.pdf49046a6fdd2e5f9a0103f035e79c42ba.pdf>

<http://www.coolgeography.co.uk/GCSE/AQA/Water%20on%20the%20Land/Hydrographs/Hydrographs.htm>

<http://www.dre.pt/>

<http://www.emdat.be/result-country-profile>

<http://www.resenhaavozdeleca.blogspot.pt/>

http://www.sd-w.com/civil/mannings_formula.html

<https://www.apdl.pt/gca/index.php?id=195>

<http://www.flickr.com/photos/miguelmarques>

Legislação

Assembleia da República (2005) - Lei n.º 54/2005. D.R. n.º 219, Série I-A de 2005-11-15

Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas (2009) - Decreto-Lei n.º 73/2009. D.R. n.º 63, Série I de 2009-03-31

Ministério da Qualidade de Vida (1983) - Decreto-Lei n.º 321/83. D.R. n.º 152, Série I de 1983-07-05

Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (2010) - Decreto-Lei n.º 115/2010. D.R. n.º 206, Série I de 2010-10-22

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2008) - Decreto-Lei n.º 166/2008. D.R. n.º 162, Série I de 2008-08-22

Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território (1998) - Decreto-Lei n.º 364/98. D.R. n.º 270, Série I-A de 1998-11-21

Ministério do Planeamento e da Administração do Território (1990) - Decreto-Lei n.º 93/90. D.R. n.º 65, Série I de 1990-03-19

Parlamento Europeu e do Conselho (2000) - Diretiva n.º 2000/60/CE, de 2000-10-23

Fontes Cartográficas

IGP (2012) – Carta Administrativa Oficial de Portugal

<http://www.igeo.pt/produtos/cadastro/caop/inicial.htm>

IGEOE, IGP (2007) – Carta de Ocupação do Solo 2007

http://www.igeo.pt/gdr/index.php?princ=PROJECTOS/cos2007&sessao=m_projectos (15-04-2012)

ESRI Base Maps (Várias Datas) – World Imagery; Bing maps Aerial

<http://www.esri.com/data/basemaps>

World Map for APRS (S/D) – World Political Map

<http://aprsworld.net/gisdata/world/> (13-02-2012)

IGEOE (Várias Datas) – Cartas Militares de Portugal N^o: 97, 98, 110, 111, 122, 123.

Câmara Municipal de Matosinhos (2008) – Planimetria do Concelho de Matosinhos (206 Cartas)

Compagnie Generale des Eaux Pour L'Étranger (1986) - Planta da Villa de Mattozinhos com a Canalização par Abastecimento d'Água.