



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

**BACIAS DE RETENÇÃO EM ZONAS URBANAS COMO CONTRIBUTO PARA A
RESOLUÇÃO DE SITUAÇÕES EXTREMAS: CHEIAS E SECAS**

Maria de Fátima Bichanço

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção
do grau de mestre em Vias de Comunicação

Orientador científico

Adalberto Q.S. França - Doutor em Engenharia Civil. Professor associado. FEUP

Dezembro de 2006

RESUMO

Apresentam-se medidas de controlo do escoamento superficial urbano. Estuda-se o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica de forma elíptica com a alteração do seu revestimento superficial e crescimento das áreas urbanizadas. Demonstra-se como os caudais gerados pela impermeabilização do solo, e que excedem a capacidade das infraestruturas de drenagem existentes, podem ser armazenadas em bacias de retenção para resolver situações de cheia e, simultaneamente, minimizar os problemas de seca, reaproveitando a água retida para outros fins. Descrevem-se os tipos de bacias de retenção existentes e as suas funcionalidades e efectua-se os cálculos de situações existentes, demonstrando os factos concluídos nesta tese.

Palavras-chave: Escoamento superficial; caudal; volume; bacia hidrográfica; bacia de retenção.

ABSTRACT

Some control measures of urban runoff are presented. The behaviour of the hydrological basin, with elliptic form, is studied in face of ground alteration and increased urban areas. By this way, it is shown how the flow created by the waterproofing of the soil, that exceeds the existent drainage capacity, can be stored in retention basin, solving flood situations. At the same time it can be taken advantage of the retained water for other purposes, especially during dry seasons.

The types of retention basin and their potentialities are described here. And the existent situations are calculated demonstrating the conclusions obtained in this thesis.

Key words: runoff; flow; volume; hydrological basin; retention basin

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Sr. Professor Doutor Adalberto França, a minha profunda gratidão pela forma permanente e incondicional que caracterizou o seu apoio e orientação durante todo o período de elaboração desta dissertação. Os seus esclarecimentos foram essenciais para a concretização deste trabalho.

A todos os meus colegas do mestrado, Carlos Matos, Joaquim Pedreiras, Manuela Santos, Paula Baltazar e Paulo Reis, pela partilha de conhecimentos e opiniões durante a parte curricular do mestrado.

À Maria Gorete Matias pelos elementos que prontamente me disponibilizou.

Ao Sr. Professor Doutor Arnaldo Melo e Sr. Professor Doutor Carlos Rodrigues e de um modo geral a todos os elementos da Secção de Vias de comunicação da FEUP por toda a colaboração prestada.

Ao Eurico pela coragem que me transmitiu e pela sua cooperação na elaboração da tese.

Aos meus Pais, pela força e incentivo que sempre me deram e, principalmente, pelo precioso auxílio familiar que me prestaram, e que possibilitou a frequência deste mestrado.

Muito especialmente, aos meus filhos, Ema e Dinis, pela paciência e compreensão que tiveram durante todo este tempo.

ÍNDICE DE TEXTO	pág.
1. SUMÁRIO	2
2. CONSIDERAÇÕES HIDROLÓGICAS	5
2.1 O ciclo hidrológico	5
2.2 O escoamento superficial e o funcionamento da bacia hidrográfica	6
2.3 Riscos	11
2.4 As inundações urbanas	12
2.5 Medidas minimizadoras dos efeitos da impermeabilização elevada nas áreas urbanizadas	13
2.6 Medidas actuais de controlo	16
2.7 Controlo moderno e sustentável	19
2.8 Cálculo dos caudais de projecto	20
2.8.1 Métodos de cálculo	20
2.8.1.1 Método Racional	21
2.8.1.2 Conceitos	22
2.9 Forma da bacia hidrográfica	23
3. ANÁLISE SUMÁRIA DO EFEITO DA IMPERMEABILIZAÇÃO PROGRESSIVA NO AUMENTO DE CAUDAIS	26
3.1 Efeitos directos	26
3.2 Efeitos indirectos	26
3.3 Análise de uma bacia hidrográfica teórica de forma elíptica, antes e após a sua total impermeabilização	27
3.3.1 Descrição do estudo efectuado	27
3.3.2 Apresentação dos resultados	29
3.3.2.1 Tempo de concentração	29
3.3.2.2 Caudais	29
3.3.3 Análise dos resultados	31
3.4 Análise de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões e parcialmente impermeabilizada na zona adjacente à PH	32
3.4.1 Descrição do estudo efectuado	32
3.4.2 Apresentação dos resultados	37
3.4.3 Análise dos resultados obtidos	45
4. ANÁLISE SUMÁRIA DO EFEITO DA IMPERMEABILIZAÇÃO PROGRESSIVA NO AUMENTO DOS VOLUMES	48
4.1 Análise de uma bacia hidrográfica teórica de forma elíptica, antes e após a sua total impermeabilização	48
4.1.1 Descrição do estudo efectuado	48
4.1.2 Apresentação dos resultados	49

4.1.2 Análise dos resultados.....	51
4.2 Análise de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões e parcialmente impermeabilizada na zona adjacente à PH.....	52
4.2.1 Descrição do estudo efectuado	52
4.2.2 Apresentação dos resultados.....	54
4.2.3 Análise dos resultados.....	65
5.BACIAS DE RETENÇÃO - DESCRIÇÃO GENÉRICA DO SEU MODO DE FUNCIONAMENTO	68
5.1 Definições e constituição	68
5.2 Utilidade	69
5.3 Tipologias de bacias de retenção	72
5.3.1 Bacias em série e em paralelo.....	72
5.3.2 Bacias a céu aberto e enterradas	75
5.3.3 Bacias a seco e com nível de água permanente	76
5.4 Escolha da bacia.....	78
5.4.1 Condicionantes da escolha.....	78
5.5 Disposições técnicas	80
5.5.1 Bacias secas	80
5.5.2 Bacia com nível de água permanente	80
5.6 Fases do projecto.....	81
6. AS BACIAS DE RETENÇÃO EM ZONAS URBANAS – PROBLEMAS ESPECÍFICOS	84
6.1 Generalidades	84
6.2 Questão da integração paisagística das bacias a céu aberto	85
7. EVENTUALIDADE DO RE-APROVEITAMENTO DA ÁGUA.....	88
DESPOLUIÇÃO DOS EFLUENTES PLUVIAIS URBANOS	88
7.1 Introdução	88
7.2.Elementos constituintes da água residual e os seus inconvenientes	88
7.3 O papel das bacias de retenção na despoluição das águas pluviais.....	90
7.3.1 Mecanismos de despoluição	90
7.3.1.1 Processo Físico	90
7.3.1.2 Processo Químico	90
7.3.1.3 Processo microbiológico	90
7.4 Dinâmica dos poluentes na bacia de retenção.....	91
7.5 Manutenção das bacias de retenção.....	92
7.6 Descrição sucinta de alguns aspectos do processo de monitorização	92
7.6.1 Objectivo da monitorização	92
7.6.2 Desenvolvimento do programa de monitorização da qualidade da água pluvial	93
7.6.3 Consideração dos parâmetros de medição	95

7.6.4 Importância do período de recolha e análise das amostras	95
8.APLICAÇÃO PRÁTICA	98
9.CONCLUSÃO	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS	122

ÍNDICE DE IMAGENS**pág.****CAPÍTULO 2**

Fig.2.1-Ciclo hidrológico (FEAM, Belo Horizonte 2006).....	5
Fig.2.2-Rede de drenagem da bacia hidrográfica (FEAM, Belo Horizonte 2006).....	8
Fig.2.3-Alteração do revestimento superficial da bacia hidrográfica devido à urbanização (FEAM, Belo Horizonte 2006).....	9
Fig.2.4-Gráfico que relaciona a vazão antes e depois da área urbanizada (Leopold1998)...	10
Fig.2.5-Perfil transversal tipo de linha de água (FRWG 1998).....	12
Fig.2.6-Utilização de pavimentos porosos em parques de estacionamento e passeios.....	13
Fig.2.7-Utilização de depressões e plantação de árvores nas bermas dos arruamentos (FEAM, Belo Horizonte 2006).....	14
Fig.2.8-Exemplo de uma zona de retenção de águas pluviais (FEAM, Belo Horizonte 2006)	15
Fig.2.9-Bacia de retenção de águas pluviais integrada numa zona urbana (FEAM, Belo Horizonte 2006).....	15
Fig.2.10-O crescimento da urbanização/canalização (Tucci 2003).....	17
Fig.2.11-Tipos de geometria das bacias e respectiva influência nos caudais.....	24

CAPÍTULO 3

Fig.3.1-Variação do tempo de concentração com a impermeabilização do solo e para diferentes inclinações.....	29
Fig.3.2-Variação dos caudais afluentes para diferentes dimensões relativas da bacia.....	29
Fig.3.3 -Variação do crescimento relativo dos caudais Q^1 e Q^2 para diferentes situações de impermeabilização.....	30
Fig. 3.4-Valor do caudal Q^1 para diferentes comprimentos da bacia hidrográfica.....	30
Fig.3.5-Variação dos caudais para duas velocidades de escoamento.....	31
Fig.3.6-Esquema da bacia parcialmente urbanizada.....	32
Fig.3.7A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9m/s$; $v_2=2.6m/s$).....	37
Fig.3.7B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.25$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9m/s$; $v_2=2.6m/s$).....	37
Fig.3.7C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9m/s$; $v_2=2.6m/s$).....	38

Fig.3.7D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	38
Fig.3.7E-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.90$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	39
Fig.3.7F-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	39
Fig.3.8A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	40
Fig.3.8B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.25$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	40
Fig.3.8C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	41
Fig.3.8D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	41
Fig.3.8E-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.90$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	42
Fig.3.8F-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	42
Fig.3.9A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	43
Fig.3.9B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	43
Fig.3.9C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	44
Fig.3.9D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	44

CAPÍTULO 4

Fig.4.1-Variação dos volumes retidos para diferentes coeficientes de escoamento.....	49
Fig.4.2-Variação relativa dos volumes retidos para diferentes situações de impermeabilização.....	50
Fig.4.3-Valor do volume V2 para diferentes comprimentos da bacia hidrográfica.....	50

Fig.4.4A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	54
Fig.4.4B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.25$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	54
Fig.4.4C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	55
Fig.4.4D-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	55
Fig.4.4E-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.90$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	56
Fig.4.4F-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	56
Fig.4.5A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,10$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	57
Fig.4.5B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,25$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	57
Fig.4.5C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,50$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	58
Fig.4.5D-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,75$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	58
Fig.4.5E-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,90$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	59
Fig.4.5F-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	59
Fig.4.6A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,10$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	60
Fig.4.6B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,50$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	60
Fig.4.6C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,75$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	61
Fig.4.6D-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	61

Fig.4.7-Valores dos volumes obtidos em função de t_c e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	62
Fig.4.8-Valores dos volumes obtidos em função de t_c e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	62
Fig.4.9-Valores dos tempos de duração de chuva obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.50$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	63
Fig.4.10-Valores dos tempos de duração de chuva obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=2.6\text{m/s}$).....	63
Fig.4.11-Valores dos tempos de duração de chuva obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.80$; $v_1=0.9\text{m/s}$; $v_2=3.5\text{m/s}$).....	64

CAPÍTULO 5

Fig.5.1-Bacia de retenção em Frescoule, França (STU 1994).....	68
Fig.5.2-Bacias de retenção utilizadas para diferir os caudais	
(a) Roissy, França (Renaudie 2005).....	70
(b) IC 29 Espinho, Portugal 2006.....	70
Fig.5.3-Bacia de retenção com uso recreativo – Sarcelles, França (Renaudie 2005).....	71
Fig.5.4-Bacia de retenção como exemplo do enriquecimento da paisagem – Thillay, França (Renaudie 2005).....	71
Fig.5.5-Bacia de Retenção: a) em série ou <i>On-Line</i> e b) em paralelo ou <i>Off-Line</i> (Mata Lima; Silva; Raminhos -2006).....	72
Fig.5.6 Perfil transversal de uma bacia em série.....	73
Fig.5.7-Perfil transversal de uma bacia em paralelo.....	73
Fig.5.8-Hidrograma do escoamento afluente e efluente de uma bacia em série (JAE 1998).....	74
Fig.5.9 -Hidrograma do escoamento afluente e efluente de uma bacia em paralelo (JAE 1998).....	74
Fig.5.10-Bacia de retenção enterrada – França (Renaudie 2005).....	75
Fig.5.11-Perfil Transversal de uma bacia a seco.....	76
Fig.5.12-Bacias de retenção a seco acessíveis ao público	
(a) França (Renaudie 2005).....	76
(b) França (Renaudie 2005).....	76

Fig.5.13-Bacias de retenção a seco não acessíveis ao público	
(a)Thilley-França (<i>Renaudie 2005</i>).....	77
(b)Thilley-França (<i>Renaudie 2005</i>).....	77
Fig.5.14-Perfil transversal de uma bacia com nível de água permanente.....	77
Fig.5.15-Bacia com nível de água permanente – Parc de la Courneuve, França	
(<i>Renaudie 2005</i>).....	78
Fig.16-Bacia de retenção com fundo e bermas impermeáveis – França (<i>STU 1994</i>).....	79

CAPÍTULO 6

Fig.6.1-Bacia de retenção em meio peri-urbano (<i>EPA, Abril 2002</i>).....	84
Fig 6.2-Bacia de retenção em meio urbano - Orgement, França (<i>Renaudie 2005</i>).....	85

CAPÍTULO 8

Fig.8.1-Localização geográfica das bacias hidrográficas.....	98
Fig.8.2-Delimitação da bacia hidrográfica da Bacia A.....	99
Fig.8.3-Crescimento da zona urbanizada	
a) Planta topográfica anterior a 1991.....	100
b) Planta topográfica de 1991.....	100
c) Planta topográfica de 2006.....	100
Fig.8.4–Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias (Bacia A).....	103
Fig.8.5–Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias (Bacia A).....	103
8.6-Delimitação da bacia hidrográfica B.....	105
Fig.8.7-Crescimento da zona urbanizada	
a) Planta topográfica (anterior a 1995).....	106
b) Planta topográfica (1995).....	106
c) Planta topográfica (2006).....	106
Fig.8.8–Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias (Bacia B).....	109
Fig.8.9–Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias (Bacia B).....	109

ANEXOS

Fig 10.1-Curvas I-D-F para o território nacional (Matos e Silva).....	125
---	-----

ÍNDICE DE QUADROS**pág.****CAPÍTULO 2**Quadro 2.1-Factores condicionantes do escoamento (*Adaptado de CHOW e tal, 1998*).....7**CAPÍTULO 7**Quadro 7.1-Escala do tempo para análise versus constituinte da água pluvial
(*EPA,2002*).....96**CAPÍTULO 8**

Quadro 8.1 –Resumo dos resultados obtidos para a bacia A.....102

Quadro 8.2 –Resumo dos resultados obtidos para a bacia B.....108

ANEXOSQuadro 1-Valores médios do coeficiente de escoamento para utilização na fórmula
Racional (*Manual nº 37 da ASCE*).....122Quadro 2-Valores do coeficiente de escoamento para áreas permeáveis em função do
tipo do solo (classificação do SCS) e do declive.....123Quadro 3-Parâmetros a e b das curvas I-D-F para diversos postos hidrográficos nacionais
(Matos, M.R.).....124Quadro 4-Velocidades médias aproximadas de escoamento superficial (m/s) (Texas
Highway Department.Drainage Manual 1970).....126Quadro 5-Valores de K em função do período de retorno (Model Drainage Manual,
1991, AASHTO).....126

SIGLAS USADAS

ASCE - American Society of Civil Engineers

BMP - Best Management Practices

D.L. – Decreto-Lei

EPA - United States Environmental Protection Agency

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FRWG – Federal Interagency Stream Restoration Working Group

JAЕ- Junta Autónoma das Estradas

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SCS - Soil Conservation Service

STU – Service Techniques de l'Urbanisme

SIMBOLOGIA

a - semi-eixo maior da elipse

a' - parâmetro das curvas I-D-F

A - área da bacia hidrográfica

A_x - área da zona urbanizada da bacia

A_z - área da zona urbanizada da bacia hidrográfica

b - semi-eixo menor da elipse

b' - parâmetro das curvas I-D-F

C - coeficiente de escoamento

C_1 - correspondente à situação inicial – terrenos permeáveis

C_2 - correspondente à situação alterada – com solo urbanizado

I - intensidade de precipitação

I-D-F - curvas Intensidade Duração Frequência

K - factor de segurança

l - comprimento do percurso de água

L - comprimento da linha de água principal

PH - passagem hidráulica

q_s - caudal específico efluente

Q - caudal afluente

t_c - tempo de concentração

t_d - tempo de duração da chuvada

v_1 - velocidade de escoamento na situação inicial

v_2 = velocidade de escoamento na área alterada

V - volume

x - comprimento da secção da bacia hidrográfica em estudo

z - comprimento da zona urbanizada da bacia hidrográfica

CAPÍTULO 1

1. SUMÁRIO

A presente tese tem como objectivo principal o estudo e demonstração da aplicabilidade das bacias de retenção como contributo sustentável na gestão da drenagem e planeamento urbano, bem como as respectivas conexões.

A defesa do ambiente urbano e o melhoramento da sua qualidade é uma das maiores preocupações com que se debate a Humanidade, no início deste Milénio.

O ciclo hidrológico é indispensável à existência da vida e ao funcionamento dos ecossistemas. As actividades sociais e económicas utilizam a água na produção de alimentos e de matérias primas como fonte de energia, pelo que, do uso racional do ciclo hidrológico depende o desenvolvimento da Civilização.

Não só porque a água é essencial à vida, mas também pela forma como a sua utilização pode contribuir para o melhoramento da sua qualidade nas cidades, o estudo do ciclo hidrológico e a prevenção das situações extremas são relevantes no desenho da cidade.

Nas últimas décadas, o crescimento e expansão das zonas urbanas caracterizou-se pela ocupação e densificação dos centros das cidades e periferias, originando significativas alterações no ciclo hidrológico natural, que acarretam riscos elevados e desequilíbrios para a vida do Homem.

Tendo em atenção que a generalidade das cidades têm a sua origem nos pontos baixos das bacias hidrográficas, a impermeabilização do solo nas zonas periféricas tende a aumentar os caudais das águas pluviais. Como consequência imediata as redes de saneamento das águas pluviais, localizadas nas zonas antigas e centrais das cidades, passam a ficar sub-dimensionadas.

Uma das alternativas à substituição de malhas inteiras de tubagens nesses locais pode ser a previsão de bacias de retenção na interface das áreas urbanas recentes e antigas.

Este armazenamento, com posterior e eventual restituição a jusante de caudais compatíveis com os diâmetros das redes antigas nos momentos de ausência de pluviosidade, pode constituir assim uma hipótese válida para lidar com o problema.

Acresce que esta água armazenada pode ser de utilidade para muitas situações, de que são exemplos o combate a incêndios e a lavagem das ruas das cidades.

Se esta água for tratada poderá evoluir-se para aplicações de maior valor acrescentado. Então, a solução para situações de cheia pode ser a mesma que venha a resolver algumas carências em períodos de seca.

” Hoje na “cidade-região” a problemática da água alterou-se substancialmente. O que era pontual e circunscrito a pequenas áreas e se resolvia através de condutas e esgotos necessita agora de ser encarado de uma forma diferente, atendendo a um leque mais amplo de objectivos.” *(Arqtº Gonçalo Ribeiro Teles)*

CAPÍTULO 2

2. CONSIDERAÇÕES HIDROLÓGICAS

2.1 O ciclo hidrológico

A chuva ao cair na terra firme inicia um longo percurso até voltar de novo ao oceano. Calcula-se em cerca de 9% a quantidade de água que percorre a via terrestre. Na realidade, uma grande parte da água da chuva ou cai no mar ou evapora-se na atmosfera.

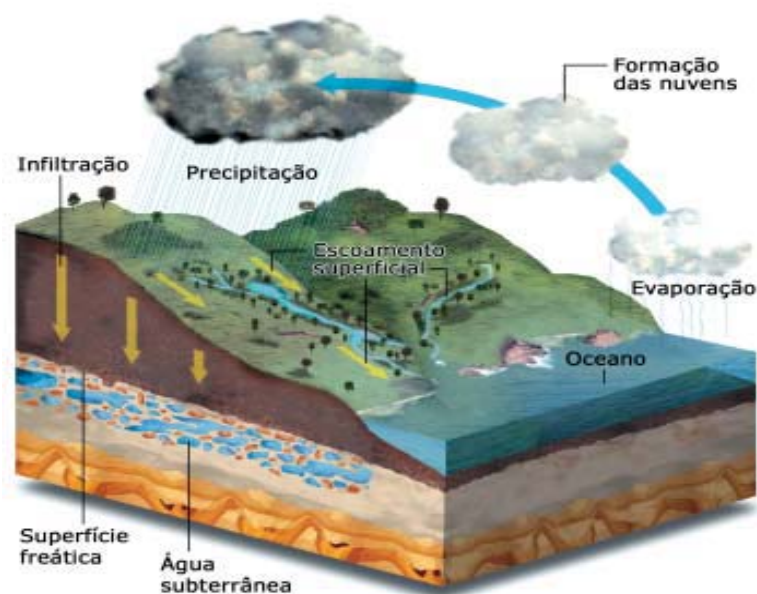


Fig. 2.1 - Ciclo hidrológico (FEAM, Belo Horizonte 2006)

Para estudarmos o ciclo hidrológico, podemos partir do momento em que a água se evapora dos oceanos e da superfície da terra e passa a integrar a atmosfera na forma de vapor de água. Em determinadas condições surgem gotículas que, pela acção da gravidade, formam a precipitação pluviométrica, ou seja, a chuva.

Desse ponto em diante, a água que se precipita em terra pode seguir basicamente por dois caminhos: parte infiltra-se no solo, abastecendo os reservatórios subterrâneos - lençol freático e aquíferos - e outra parte forma o escoamento superficial.

As águas armazenadas nos reservatórios subterrâneos flúem lentamente e, por meio da evaporação, fecha-se o ciclo hidrológico.

2.2 O escoamento superficial e o funcionamento da bacia hidrográfica

O estudo das características e funcionamento das bacias hidrográficas e consequente cálculo de caudais afluentes a uma determinada estrutura de drenagem implica conhecer a porção de precipitação que resulta em escoamento superficial.

A transformação da precipitação em escoamento superficial é um processo imensamente complexo e de difícil quantificação rigorosa.

Os percursos que a água pode seguir, sobre a bacia, até chegar à linha de água são diversos, e os fenómenos físicos que condicionam estes percursos são difíceis de quantificar continuamente no tempo e no espaço.

Os principais factores que influenciam o regime de escoamento de uma dada bacia são essencialmente os seguintes:

A - Características climáticas da bacia:

- Regime de precipitação na bacia: tipo de precipitação (orográfica, convectiva ou ciclónica), forma de precipitação (neve, granizo ou chuva), intensidade, duração, frequência, distribuição no tempo e no espaço, e direcção dominante das tempestades.
- Evapotranspiração (dependente da temperatura), vento, radiação solar, humidade do solo e no ar, tipo de vegetação que ocorrem na bacia.

B - Características fisiográficas da bacia hidrográfica:

- Forma, tamanho, declive, orientação, tipo de solo, utilização, cobertura vegetal da bacia e posição do nível freático.

C - Características da rede de drenagem.

- Dimensão e forma da secção transversal, declive, rugosidade, e comprimento dos cursos de água.

CHOW et al (1988), separa os factores condicionantes do escoamento em dois grupos, os climáticos e os fisiográficos, cuja classificação se apresenta no Quadro seguinte.

Quadro 2.1 -Factores condicionantes do escoamento (*CHOW e al, 1998*)

Grupo	Tipo	Factores
Climáticos	Precipitação	Modalidade (chuva, neve, granizo, orvalho, neblina ou geada), distribuição no tempo e no espaço, frequência de ocorrência, direcção dominante das tempestades, precipitação precedente e humidade do solo.
	Evaporação	Temperatura, vento, pressão atmosférica, natureza e superfície de evaporação.
	Transpiração	Temperatura, radiação solar, vento, humidade do ar e do solo e tipo de vegetação.
Fisiográficos	Características da bacia	Geométricas - forma, tamanho, declive, orientação e elevação.
		Físicas - cobertura e utilização do solo, tipo de solo, infiltração, permeabilidade, topografia e capacidade de formar toalhas freáticas.
	Características dos cursos de água	Capacidade de escoamento: dimensão e forma da secção transversal, declive, rugosidade, características da rede hidrográfica e comprimento do curso de água.
		Capacidade de armazenamento

A quantidade de água, usualmente denominada precipitação útil ou efectiva, é o resultado da diferença entre a quantidade de água precipitada e as perdas para o escoamento superficial por Intercepção, Retenção e Infiltração.

A intercepção corresponde à parte da água que, durante uma determinada chuvada, é interceptada pela vegetação e construções existentes na bacia, e que não chega a atingir o solo.

A retenção é a parte da precipitação que atinge o solo e que não se transforma imediatamente em escoamento superficial, por ficar retida nas várias depressões existentes que vão desde pequenas poças a lagos. Esta água retida é considerada perdida para efeitos do escoamento superficial, pois acaba por se evaporar para a atmosfera ou por se infiltrar no solo.

A água que se infiltra e que escoia sub-superficialmente até atingir a camada não saturada, ou percola verticalmente até atingir a camada saturada do solo, onde vai reforçar as reservas subterrâneas de água, constitui as perdas por infiltração que representam a maior perda para o escoamento superficial.

O escoamento superficial surge quando a capacidade de interceptação, retenção e infiltração do solo é ultrapassada, originando que a água se escoie superficialmente ao longo das encostas da bacia, convergindo para pequenas linhas de água que, por sua vez, se vão unindo e formando linhas de água cada vez maiores. O conjunto resultante, constitui a rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Este escoamento superficial representa a principal questão do escoamento urbano das águas pluviais, e pode-se considerar como um problema hidrológico de ordem geral, sobre o qual se deve ponderar, tendo em vista a previsão de cheias e a defesa contra inundações.

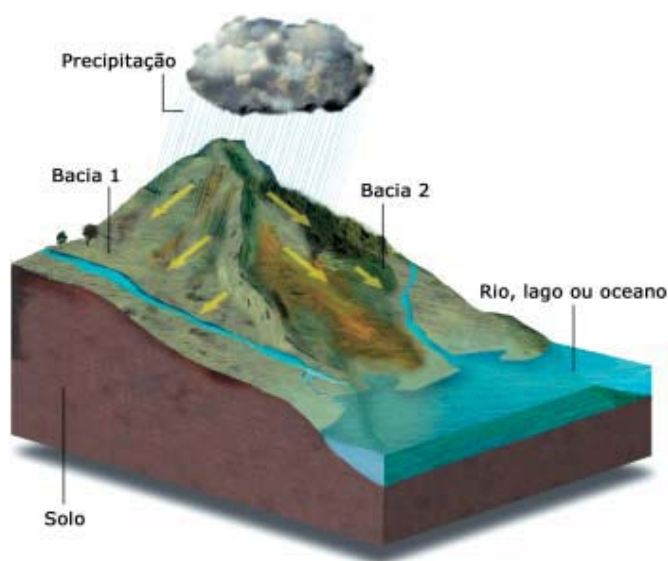


Fig. 2.2 -Rede de drenagem da bacia hidrográfica (FEAM, Belo Horizonte 2006)

A malha rodoviária: estradas, auto-estradas e outras vias constituem uma verdadeira barragem ao escoamento superficial, que altera a drenagem natural, forçando, assim, o escoamento das águas acumuladas para passagens obrigatórias, geralmente colocadas em encaminhamentos naturais aparentes (leitos de escoamento, talvegues,...), concentrando, desta forma, grandes massas de água numa mesma secção.

A crescente densificação das zonas urbanizadas confere a estes problemas características agudas, ao provocar a impermeabilização progressiva das superfícies, e consequente aumento dos caudais afluentes aos órgãos de drenagem.

O ciclo hidrológico sofre fortes alterações nas áreas urbanas devido, fundamentalmente, à alteração da superfície e à canalização do escoamento, aumento da poluição devido à contaminação do ar, das superfícies urbanas e do material sólido disposto pela população.

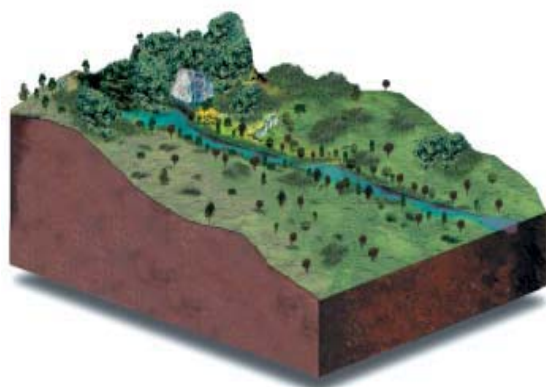


Fig.2. 3 - Alteração do revestimento superficial da bacia hidrográfica devido à urbanização (FEAM, Belo Horizonte 2006)

Este processo apresenta um impacto grave nos países em desenvolvimento, onde a urbanização e as obras de drenagem são realizadas com metodologias inadequadas e insustentáveis que, por isso, foram sendo abandonadas pelos países desenvolvidos ao longo dos últimos trinta anos.

A urbanização produz uma grande impermeabilização do solo que, a par da canalização do escoamento e da ocupação do solo pela população, provoca o aumento da vazão máxima da bacia urbana, ou seja, aumenta o caudal de saída da bacia.

Este efeito é descrito graficamente por *Leopold* através da razão entre as percentagens de área urbanizada e de área com condutas de drenagem traduzida graficamente da seguinte forma:

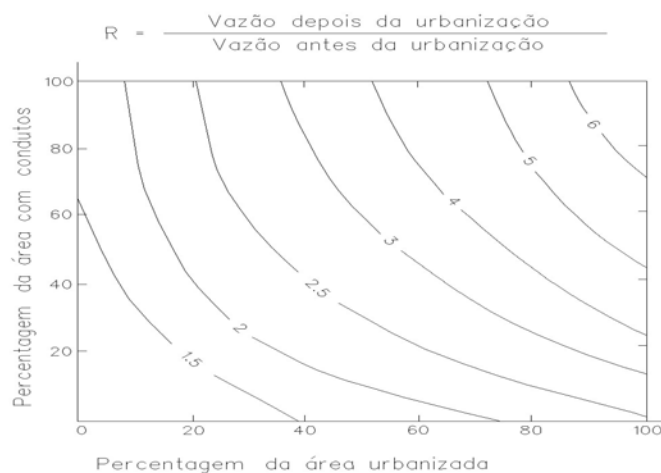


Fig. 2.4 –Gráfico que relaciona a vazão antes e depois da área urbanizada (Leopold1998)

O gráfico 2.4 traduz a tendência do crescimento da vazão da bacia hidrográfica com o aumento da área urbanizada e com o aumento da percentagem de área drenada com colectores. Como normalmente, o segundo factor é consequência do primeiro, se os dois ocorrem em simultâneo, o agravamento da vazão é ainda mais acentuado.

Por exemplo, para 40% de área urbanizada e 20% de área com colectores o valor de R é 2.1, aumentando para 2,5 quando para a mesma área urbanizada existe 40% de área com colectores.

Segundo *ASCE* e *WEF* (1992), a percentagem de áreas impermeáveis numa bacia urbana varia, em regra, entre 10 e 100%, sendo 10 a 30% em locais de baixa densidade residencial, entre 30% e 60% em zonas de densidade residencial elevada e entre 80% e 100% em zonas centrais e comerciais de aglomerados urbanos.

Quanto mais impermeabilizadas se apresentarem as bacias, maiores velocidades ganhará o escoamento, e menor será o tempo necessário para que toda a bacia contribua para o escoamento na secção final da bacia.

Esta diminuição do tempo de concentração, fará com que chuvadas mais curtas e estatisticamente susceptíveis de originar uma maior intensidade de precipitação (I) induzam, por sua vez, ao aumento do caudal afluente aos órgãos de drenagem ou às linhas de água. Note-se que, sendo menor o tempo de concentração da bacia, resultarão simultaneamente dois efeitos negativos nas redes de drenagem:

- caudais mais fortes por corresponderem a chuvadas de menor duração;
- maior concentração de caudais pela sua mais rápida afluência causada pela superior velocidade do escoamento.

2.3 Riscos

Os impactos que ocorrem na drenagem urbana são, em primeiro lugar, consequência directa das práticas de uso do solo e da forma como a infra-estrutura urbana é planeada, legislada e implantada. O processo de “pensar” as cidades não tem sido realizado de forma sistemática e coerente ao longo dos últimos anos, precisamente quando foi intenso o processo de urbanização.

O inevitável aumento dos caudais, agravado ainda pela diminuição dos tempos de concentração, resulta, no caso de incapacidade apresentada pelo sistema de drenagem ou da linha de água localizada a jusante, em ocorrência de cheias e inundações.

As consequências são as perdas em vidas humanas, qualidade de vida, bens e serviços materiais e ambientais, causados pelas águas pluviais.

2.4 As inundações urbanas

O escoamento superficial da precipitação pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas devido a dois processos, que podem ocorrer isoladamente ou combinados:

- Inundações das zonas ribeirinhas: as linhas de água possuem, geralmente, dois leitos, o leito menor em que a água se escoia na maioria do tempo, e o leito maior (leito de cheia).

Quando o leito maior é inexistente ou foi suficientemente ocupado, podem ocorrer cheias, um fenómeno perfeitamente natural mas que se revela bastante preocupante devido às perdas materiais e vidas humanas envolvidas.

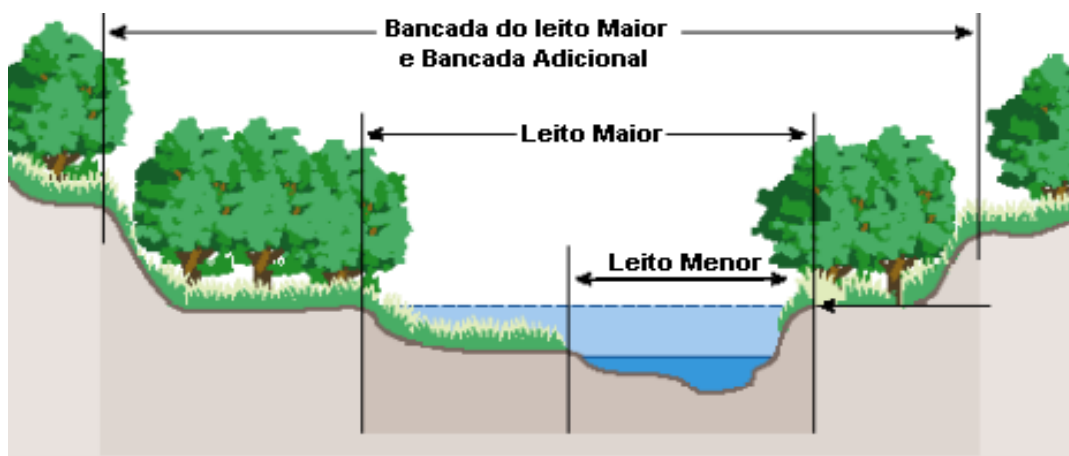


Fig. 2.5 - Perfil transversal tipo de linha de água (FRWG 1998)

- Inundações devidas à urbanização: as cheias aumentam a sua frequência e a sua amplitude em consequência da impermeabilização causada pela ocupação do solo mas também devido à construção nos vales. O desenvolvimento urbano pode, ainda, constituir obstáculo ao escoamento, através da construção de aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções diversas.

Quando se torna impossível intervir no próprio leito do rio devido à ocupação excessiva, torna-se necessária a implementação de outro tipo de medidas que diminuam os riscos de inundação e protejam as populações.

2.5 Medidas minimizadoras dos efeitos da impermeabilização elevada nas áreas urbanizadas

A forma de minimizar os efeitos da alteração da permeabilidade dos solos, será actuar ao nível do escoamento superficial, tentando diminuí-lo e/ou diferi-lo no tempo, sendo que, para o efeito, se devem tomar as seguintes medidas:

- aumentar o volume de infiltração, integrando no seio das áreas urbanizadas, ou na sua envolvente, áreas permeáveis, tais como, parques relvados, passeios para peões e vias de acesso construídas em materiais incoerentes, pavimentos porosos e trincheiras filtrantes para promover a percolação através do solo;



Fig. 2.6 – Utilização de pavimentos porosos em parques de estacionamento e passeios (FEAM, Belo Horizonte 2006)

- aumentar o volume de água retida e interceptada, através da implementação de depressões ligeiras (despercebidas na topografia) e da plantação de árvores e arbustos, de

forma a contribuir para o atraso significativo do tempo de escoamento de entrada (*inlet time*) e, conseqüentemente, para a redução do caudal de ponta;

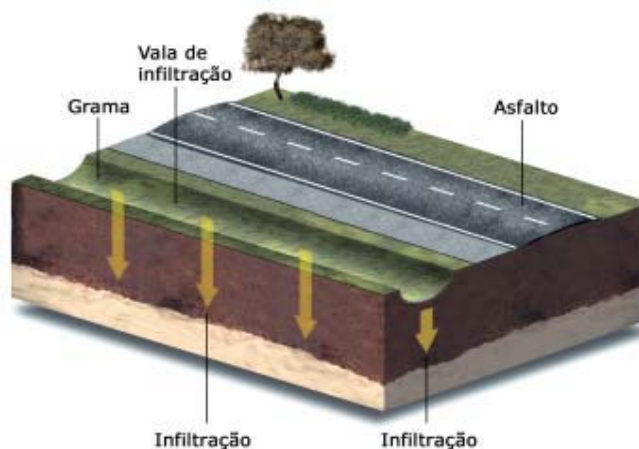


Fig 2. 7– Utilização de depressões e plantação de árvores nas bermas dos arruamentos (FEAM, Belo Horizonte 2006)

- incluir nos planos directores municipais índices máximos de impermeabilização, de forma que, em todos os terrenos ou lotes esta não exceda, por exemplo, 50% da área total da intervenção. Para o cálculo deste valor devem ser consideradas todas as áreas pavimentadas com materiais não porosos;

- permitir que, durante a ocorrência de precipitações intensas, se crie uma altura de escoamento superficial ao longo das superfícies impermeabilizadas (passeios, arruamentos, parques de estacionamento), com um limite admissível ao movimento de peões e veículos. Esta situação será conseguida através do aumento, criteriosamente calculado, do espaçamento entre sarjetas e sumidouros e das suas características de vazão;

- em áreas urbanizadas já consolidadas, onde estas alterações profundas das suas características não são viáveis, a solução a adoptar será promover o armazenamento temporário das águas afluentes em locais escolhidos, criando ao nível do solo e

aproveitando sempre que possível áreas em depressão, reservatórios ou bacias de retenção de águas pluviais.



**Fig.2. 8 – Exemplo de uma zona de retenção de águas pluviais
(FEAM, Belo Horizonte 2006)**



**Fig. 2. 9 – Bacia de retenção de águas pluviais integrada numa zona urbana
(FEAM, Belo Horizonte 2006)**

2.6 Medidas actuais de controlo

Entre nós a política existente de desenvolvimento e controlo dos impactos quantitativos na drenagem continua, essencialmente, a basear-se no conceito de “*escoar a água precipitada o mais rápido possível*”, designado na terminologia francesa por “*tout à l’égout*”.

Princípio este que foi sendo abandonado nos países desenvolvidos a partir do início da década de 1970.

Os projectos, baseados nesse conceito, têm como consequência imediata o acréscimo dos caudais de ponta e das inundações a jusante por insuficiência na canalização, na medida em que acelera o encaminhamento das águas para os vales e aumenta, consideravelmente, o volume a escoar pelos colectores devido à diminuição da capacidade de infiltração da água resultante da precipitação.

A tendência natural da urbanização e, consequentemente, da drenagem urbana é a de ocorrer no sentido de jusante (foz) para montante (nascente), dadas as características do relevo e as práticas habituais de implantação urbana.

Na generalidade dos casos, quando um loteamento é projectado, os serviços técnico-municipais costumam exigir apenas que o sistema de drenagem pluvial seja eficiente no sentido de escoar a água que se precipita no próprio loteamento.

Quando o poder público não controla essa urbanização ou não amplia a capacidade das linhas de água a jusante, a ocorrência das enchentes aumenta, com perdas sociais e económicas.

A combinação do impacto de diferentes loteamentos e ocupações produz, muitas vezes, o aumento da frequência de cheias a jusante. Esse processo ocorre por sobrecarga da drenagem secundária (dos colectores) sobre a drenagem primária (rios e canais) que drena as áreas urbanas. As áreas mais afectadas, devido à construção de novas habitações a montante são, normalmente, as áreas mais antigas localizadas a jusante.

As consequências dessa falta de planeamento e regulamentação são sentidas em muitas cidades.

A tendência de controlo da drenagem urbana é a de se processar por meio de canalização das secções críticas. Este tipo de solução adopta a visão particular de uma secção da bacia, sem se ter em conta as consequências para a área restante.

A canalização dos pontos críticos acaba apenas por transferir a inundação de um lugar para outro da bacia.

Segundo *Tucci* esse processo, em geral, ocorre como representado na figura seguinte:

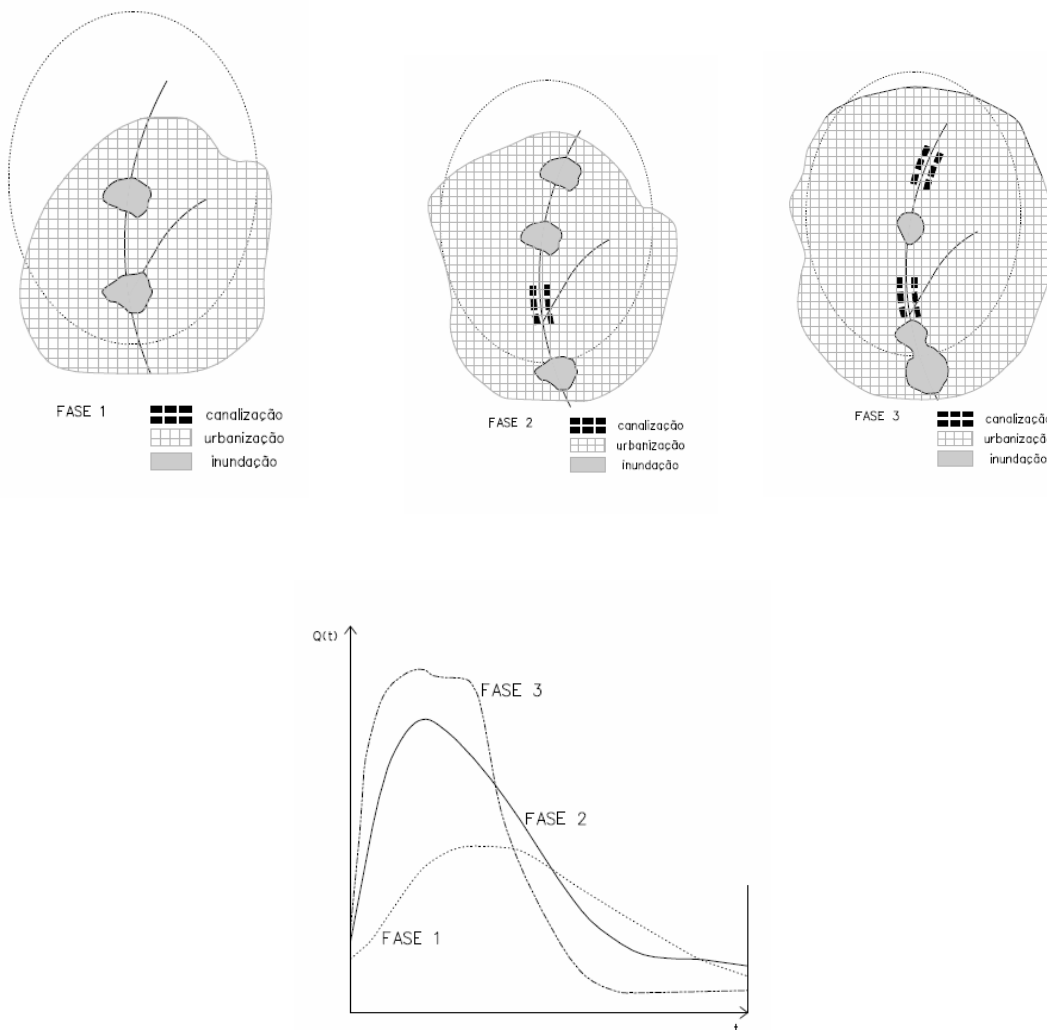


Fig.2. 10 - O crescimento da urbanização/canalização (Tucci 2003)

Fase 1: a bacia começa a ser urbanizada de forma distribuída, com maior ocupação a jusante, aparecendo, no leito natural, os locais de inundação devido a estrangulamentos naturais ao longo do curso do rio principal;

Fase 2: as primeiras canalizações são executadas a jusante, com base na urbanização actual; com isso o hidrograma a jusante aumenta, mas é ainda contido pelas áreas que inundam a montante, que fazem o efeito de um reservatório de amortecimento de enchentes;

Fase 3: com o maior adensamento urbano, a pressão dos moradores de montante faz com que as autarquias continuem o processo de canalização para montante. Quando o processo se completa, ou mesmo antes, as inundações retornam para jusante, devido ao aumento de vazão máxima em função da urbanização e canalização a montante. Nessa fase, são necessárias mais obras para ampliar todas as secções e a canalização, simplesmente, transfere a inundação para jusante.

A dimensão e irracionalidade destes projectos leva a custos insustentáveis, podendo atingir valores exagerados relativamente aos custos que seriam necessários, para amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma retenção.

Dá-se, então, o paradoxo de que os países ricos, ao verificarem que os custos de construção de uma nova canalização seriam muito altos, abandonaram este tipo de solução, enquanto que os países pobres continuam a adoptar, sistematicamente, estas medidas, perdendo duas vezes: por um lado, custos de investimento muito maiores e, por outro, aumento dos prejuízos.

2.7 Controlo moderno e sustentável

Contrariamente à tendência actual, praticada em Portugal, a drenagem urbana deverá ser planeada de forma sustentável, pondo de parte o conceito até aqui adoptado de “*escoar a água precipitada o mais rápido possível*”.

Os estudos das urbanizações e os planos de ocupação de solo necessitam de ter em conta o escoamento das águas pluviais enquanto elemento de funcionamento dos aglomerados e do quadro de vida.

” A solução para o que pode ser considerado o novo paradigma da gestão de sistemas de drenagem urbana, passa assim pela concepção e pela implantação de técnicas e procedimentos tendencialmente compatíveis com o desenvolvimento sustentável (..) ”MATOS (1999^a)

Para isso, será necessário adoptar medidas de controlo na origem que resolvam ou minimizem os problemas atrás referidos.

Controlo na origem designa o conjunto de soluções técnicas, a implantar a montante das redes de colectores, com o objectivo principal de minimizar os efeitos da impermeabilização elevada nas áreas urbanizadas, isto é, melhorar a infiltração das águas pluviais e/ou retenção temporária por forma a reduzir a afluência pluvial ao sistema de colectores, soluções já apresentadas no ponto 2.5.

Constituem uma alternativa sustentável à solução tradicional, que envolve a construção de colectores cada vez mais extensos e de maior diâmetro, com o consequente aumento de custos de exploração e conservação.

A filosofia da opção tradicional, a “*tout à l’égout*” para os franceses, consiste em recolher o mais depressa possível as águas pluviais, transportá-las em colectores enterrados, e descarregá-las no meio receptor, sem quaisquer preocupações do controlo da qualidade.

As soluções de controlo na origem têm, também, como característica, a descentralização, isto é, a estratégia base não é a descarga unidireccional num local ou num número muito limitado de locais, mas sim o envolvimento de várias áreas ou locais de disposição final.

Um exemplo destas soluções é, como já mencionado anteriormente, as bacias de retenção.

Este tipo de infraestrutura é utilizada desde a década de setenta em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, Japão e França, e têm-se mostrado como uma eficiente forma de eliminar as cheias frequentes.

2.8 Cálculo dos caudais de projecto

2.8.1 Métodos de cálculo

Para dimensionamento hidráulico dos diversos órgãos de drenagem, nomeadamente as passagens hidráulicas sob vias de comunicação e bacias de retenção, é necessário determinar os caudais máximos susceptíveis de serem atingidos.

Estes caudais, designados por caudais de projecto, podem ser calculados recorrendo a métodos simplificados ou a métodos mais elaborados, baseados em formulações mais ou menos complexas.

No caso de bacias hidrográficas com áreas na ordem dos 30 Km² ou inferiores poderá aplicar-se o Método Racional que é, de entre os métodos simplificados, o mais utilizado e reconhecido a nível mundial. Apesar das suas limitações, que condicionam o seu domínio de aplicação, permite obter resultados satisfatórios, desde que seja aplicada de forma criteriosa.

Para bacias de dimensão superior será necessário considerar outros factores, nomeadamente, a variação da intensidade das chuvadas.

Nestes casos poderão adoptar-se métodos de cálculo dos hidrogramas de cheia baseados na teoria do hidrograma unitário. Salienta-se, de entre os existentes, o método do Soil Conservation Service (SCS), por ser uma metodologia completa e consistente para o cálculo de hidrogramas de cheia em bacias das quais não se possui registos hidrométricos suficientes.

Nos estudos a desenvolver na presente tese, adoptar-se-á o Método Racional, tendo em conta as características das bacias hidrográficas que se pretendem analisar.

2.8.1.1 Método Racional

As limitações do Método Racional prendem-se com as simplificações de natureza hidrológica e hidráulica da sua formulação.

As simplificações de ordem hidrológica estão relacionadas com a precipitação que é admitida como invariável no espaço e no tempo, e da representação conceptual da transformação precipitação – escoamento que é considerada como uma relação linear e representada por um coeficiente de escoamento constante. Porém, em bacias de grandes dimensões e com percentagem importante de áreas impermeáveis, são menos válidas as hipóteses de invariância temporal e espacial da precipitação e da linearidade do respectivo processo de transformação em escoamento.

Do ponto de vista hidráulico, as limitações consistem na sua inadequação para representar o escoamento pluvial como um fenómeno dinâmico quer no espaço quer no tempo. O Método Racional estima um caudal de ponta, que ocorre no instante em que toda a bacia está a contribuir para o escoamento, isto é, quando a duração da chuvada crítica é igual ao tempo de concentração.

O valor da dimensão da bacia que deve constituir o limite da aplicabilidade do Método Racional não está definido de forma universal. Com efeito, os valores da área máxima admitida na Europa são distintos dos aceites na América.

Em Portugal, os estudos efectuados indicam a sua utilização, sem reservas, até valores da ordem dos 25 a 30 Km².

Hipóteses básicas consideradas no método racional:

- a relação entre o caudal máximo e a área drenante e entre o caudal máximo e a intensidade de precipitação é linear;
- a intensidade de precipitação é constante no intervalo de tempo $t = t_c$;
- o tempo de duração da chuvada é igual ao tempo de concentração;
- a precipitação e o caudal têm a mesma frequência ou período de retorno.

A expressão de cálculo do método racional é a seguinte: $Q = \frac{KCIA}{360}$ (2.1)

em que:

- Q - caudal (m^3/s)
- T - Período de retorno
- C - Coeficiente de escoamento
- I - Intensidade de precipitação (mm/h)
- t_c - Tempo de concentração (min)
- K - factor de segurança
- A - Área da bacia (ha)

2.8.1.2 Conceitos

- **Caudal** – o caudal a utilizar é o correspondente ao pico de cheia, associado a um período de retorno T;

- **Período de retorno** - intervalo médio de anos no qual ocorre ou é ultrapassada uma determinada cheia de magnitude Q;

- **K** - factor de segurança eventual para ter em conta situações mais gravosas, do que as que seriam de esperar em ocorrências normais, como por exemplo as que resultam de determinadas áreas permeáveis ou semi-permeáveis se poderem comportar como áreas impermeabilizadas, diminuindo as perdas por infiltração ou intercepção. É o que pode ocorrer para chuvadas pouco frequentes e, por isso, de período de retorno elevado, ou quando se sucedem ao longo do tempo chuvadas frequentes separadas por curtos períodos de tempo seco. (*Quadro 5-Anexos*).

- **Coeficiente de escoamento** -coeficiente que representa a fracção de precipitação que dá origem a escoamento superficial, é traduzido por um número compreendido entre 0 e 1 e depende da tipologia da ocupação e superfície, do declive e tipo de solo. Os seus valores médios estão consagrados no Manual da ASCE nº 37 e referenciados no Model Drainage Manual (1991), para as diferentes situações de permeabilidade (*Quadro 1 e 2-Anexos*).

- **Tempo de concentração** - tempo necessário para que toda a bacia contribua para o escoamento na secção a jusante, ou seja, o maior tempo de percurso da água precipitada,

desde o ponto hidráulicamente mais remoto da bacia de drenagem até à secção em análise. Pode ser estimado a partir das velocidades de escoamento superficial na rede hidrográfica da bacia.

No Drainage Manual (Texas Highway Department, 1970) estão estipulados os valores das velocidades médias para as várias situações de escoamento. (*Quadro 4-Anexos*).

- **Intensidade de precipitação** - é a intensidade média máxima da precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração (t_c), e para um período de retorno (T), sendo obtida a partir das expressões analíticas das curvas exponenciais de Intensidade – Duração- Frequência (curvas I-D-F) determinadas para diversos postos udográficos de Portugal Continental e Regiões Autónomas, ou de outras com diferente aspecto matemático mas com resultados semelhantes. (*Quadro 10.1-Anexos*).

- **Área** - área da bacia de drenagem que contribui para a alimentação da secção em que é feita a determinação do caudal.

A correcta delimitação da bacia hidrográfica com a qual interfere a obra rodoviária constitui um elemento de base indispensável para a análise das condições de drenagem. A definição da área contribuinte é conseguida com recurso a cartas topográficas a escala conveniente, normalmente 1/25 000, devendo ser complementada ou aferida com visita ao local.

2.9 Forma da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica de uma dada secção de um curso de água é a área que drena para essa mesma secção, ou seja, qualquer água precipitada nessa área acaba por passar por essa secção.

O valor do caudal afluente é influenciado pela forma planimétrica da bacia hidrográfica.

Bacias mais acidentadas têm maiores caudais, não só por causa da inclinação, mas também porque a sua forma é mais arredondada, e com maior número de afluentes, contrariamente ao que acontece nos relevos mais planos que originam bacias mais alongadas.

Apesar de não ser possível generalizar a forma das bacias hidrográficas, as mais comuns aproximam-se da forma elíptica, sendo possível sistematizá-las em três tipos: alongada arredondada e circular. No entanto, podem apresentar outras formas menos habituais de que é exemplo a bacia ramificada.

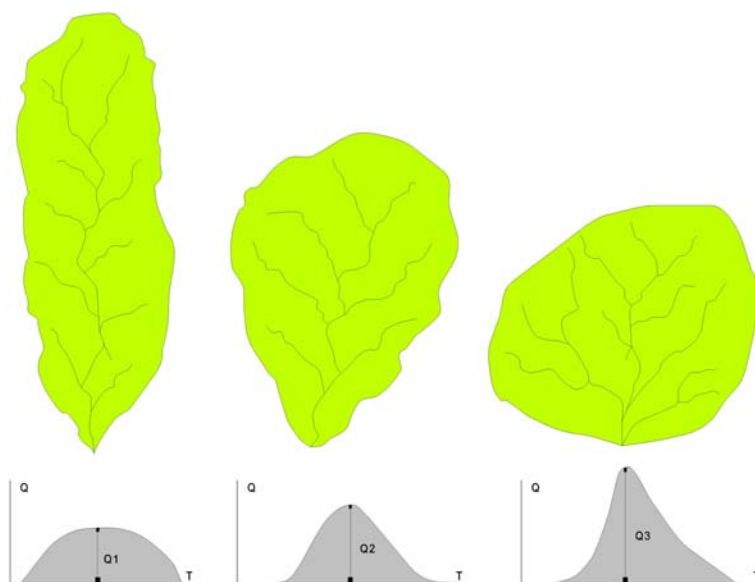


Fig.2. 11 – Tipos de geometria das bacias e respectiva influência nos caudais

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISE SUMÁRIA DO EFEITO DA IMPERMEABILIZAÇÃO PROGRESSIVA NO AUMENTO DE CAUDAIS

3.1 Efeitos directos

Representando C a percentagem de água precipitada que se transforma em escoamento, que, tal como referido anteriormente, será tanto maior quanto menor for a infiltração de água no solo, o caudal afluente à secção final da bacia hidrográfica crescerá com a impermeabilização progressiva do terreno.

3.2 Efeitos indirectos

O tempo de escoamento que cada partícula demora, desde o seu ponto de impacto até a secção final da bacia, depende directamente da extensão do percurso que essa partícula de água necessita percorrer e, inversamente, da velocidade de escoamento.

Esta, por sua vez, depende do tipo de escoamento (em lâmina ou em canal), da inclinação e do tipo de cobertura das encostas.

Quanto mais impermeabilizadas se apresentarem as bacias, maiores velocidades ganhará o escoamento, e menor será o tempo necessário para que toda a bacia contribua para o escoamento na secção final.

Com esta diminuição do tempo de concentração, sofrer-se-ão, necessariamente, os efeitos de uma maior intensidade de precipitação (I) que, por sua vez, induzirá ao aumento do caudal afluente à PH, colector ou linha de água. Note-se que sendo menor o tempo de concentração da bacia, corresponderão aos caudais mais fortes chuvadas de menor duração, logo, de maior caudal específico.

3.3 Análise de uma bacia hidrográfica teórica de forma elíptica, antes e após a sua total impermeabilização

3.3.1 Descrição do estudo efectuado

O presente estudo teve como objectivo analisar uma bacia, cuja área foi urbanizada, calcular os caudais induzidos pelo aumento do coeficiente de escoamento e diminuição do tempo de concentração, e compará-los com os valores que seriam de esperar para a mesma bacia no seu estado natural, i.e. sem alteração do seu revestimento superficial.

Para isso, considerou-se uma bacia teórica de forma elíptica, por ser a forma mais comum apresentada pelas bacias hidrográficas, conforme se referiu no ponto 2.9.

Admitiu-se que a linha de água principal corria segundo o seu eixo maior, sobreposto ao eixo dos xx.

A partir do Método Racional foram determinados os caudais para vários cenários possíveis, correspondentes a diferentes dimensões relativas dos eixos maior e menor, de forma a permitir deduzir qual o efeito provocado em termos de quantidade de água resultante em escoamento.

Para determinação da intensidade de precipitação usaram-se os parâmetros “a” e “b” das curvas I-D-F do posto hidrográfico do Porto, correspondentes a um período de retorno de 100 anos, e designados nas fórmulas apresentadas por “a’” e “b’”.

Foram adoptadas as seguintes designações para os coeficientes de escoamento:

C_1 - correspondente à situação inicial – terrenos permeáveis

C_2 - correspondente à situação alterada – com solo urbanizado

Consideraram-se duas situações distintas de impermeabilização correspondentes diferentes tipologias de ocupação da zona urbanizada:

Hipótese 1:

$$C_1 = 0,2$$

$$C_2 = 0,5$$

$$v_1 = 0,9\text{m/s}$$

$$v_2 = 2,6\text{m/s}$$

Hipótese 2:

$$C_1 = 0,2$$

$$C_2 = 0,8$$

$$v_1 = 0,9\text{m/s}$$

$$v_2 = 2,6\text{m/s}$$

De forma a estudar o comportamento da bacia, e respectiva evolução dos caudais, perante a ocorrência de diferentes intensidades de precipitação, adoptaram-se duas velocidades para a zona urbanizada, qualitativamente coerentes com os coeficientes de escoamento C_2 seleccionados, constituindo assim uma terceira hipótese.

Hipótese 3:

$$C_1 = 0,2$$

$$C_2 = 0,8$$

$$v_1 = 0,9\text{m/s}$$

$$v_2 = 3,5\text{m/s}$$

Os tempos de concentração obtidos para a bacia permeável e impermeável são designados respectivamente por t_1 e t_2 .

3.3.2 Apresentação dos resultados

3.3.2.1 Tempo de concentração

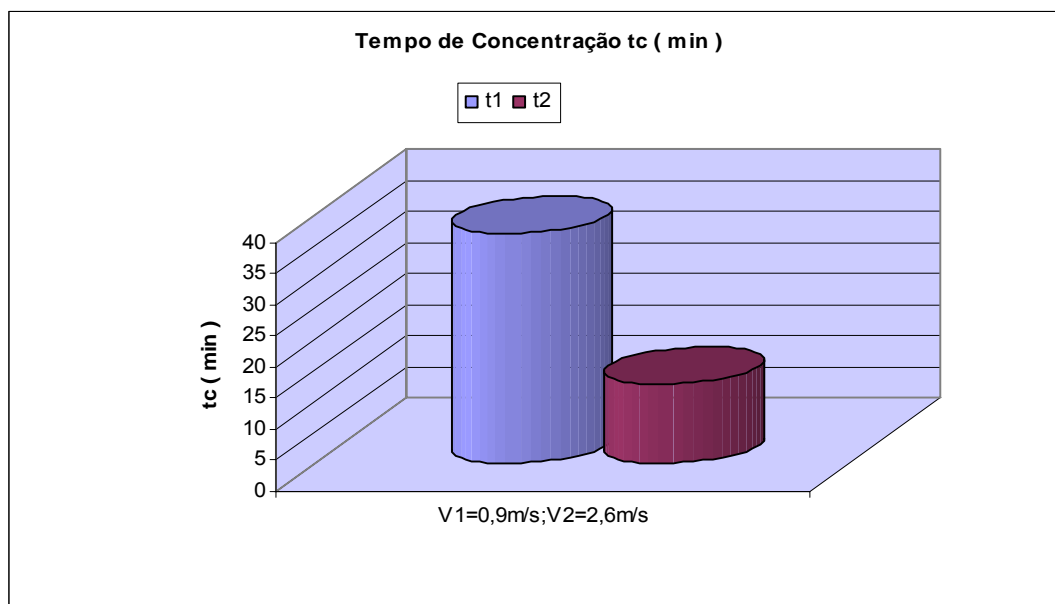


Fig. 3.1-Variação do tempo de concentração com a impermeabilização do solo

3.3.2.2 Caudais

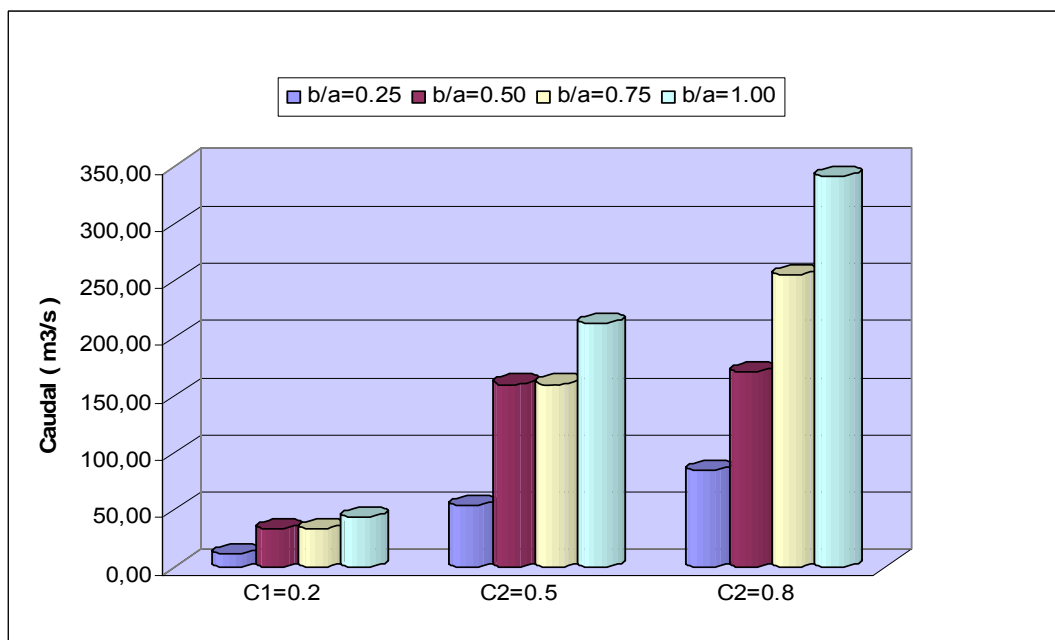


Fig. 3.2-Variação dos caudais afluentes para diferentes coeficientes de escoamento

Nota: Os símbolos **a** e **b** são aqui representativos das extensões, respectivamente, dos semi-eixos maior e menor da elipse.

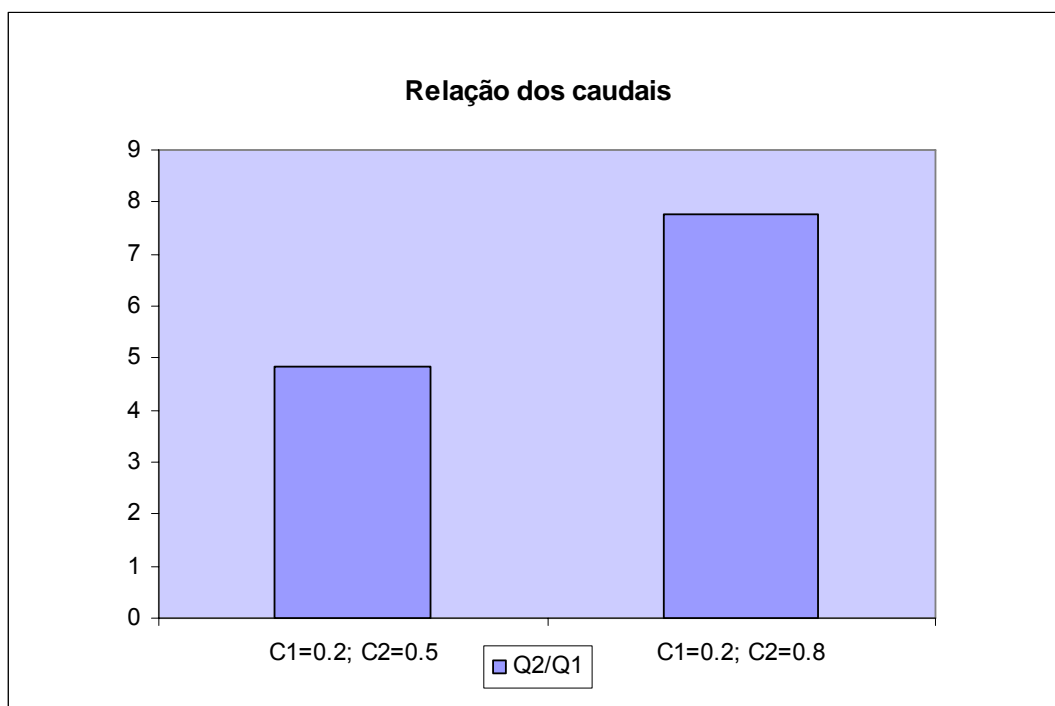


Fig.3.3 -Variação do crescimento relativo dos caudais Q_1 e Q_2 para diferentes situações de impermeabilização

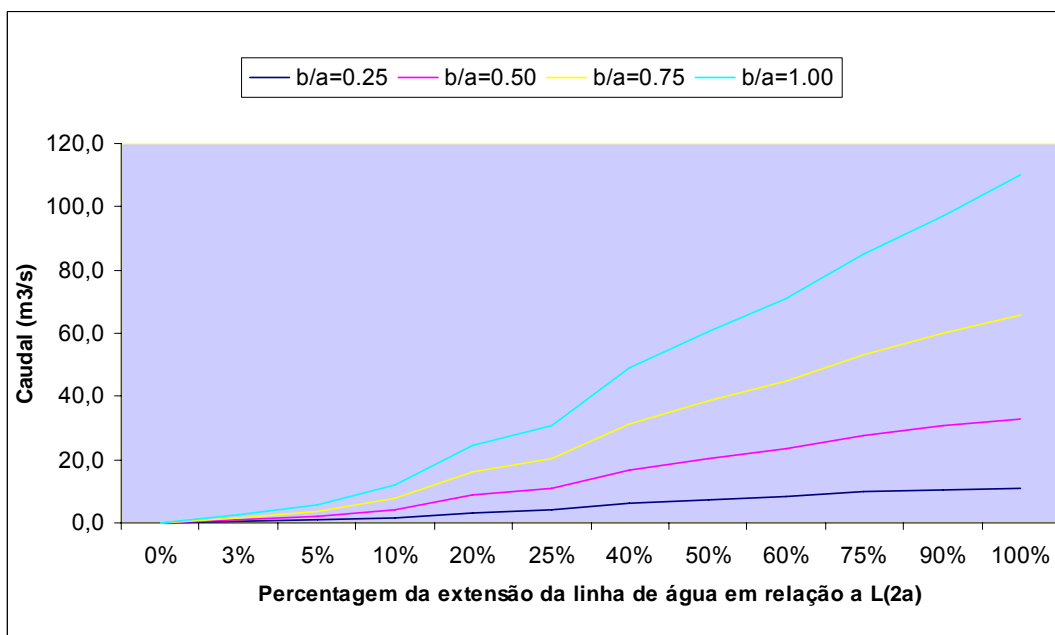


Fig. 3.4-Valor do caudal Q_1 para diferentes comprimentos da bacia hidrográfica

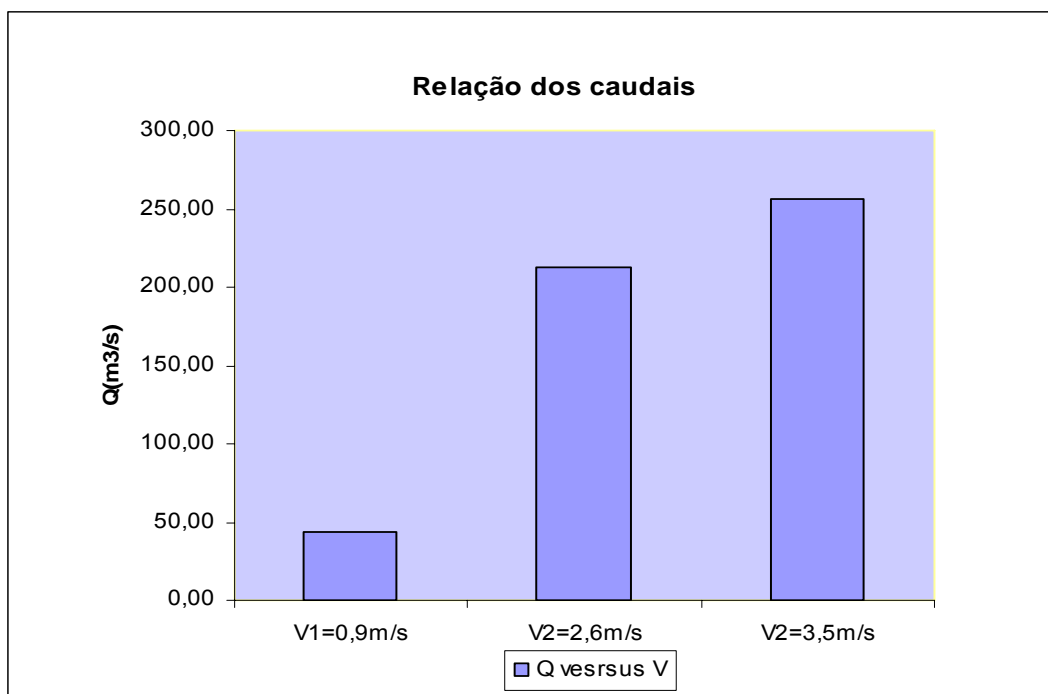


Fig. 3.5 - Variação dos caudais para diferentes velocidades de escoamento

3.3.3 Análise dos resultados

- O tempo de concentração diminui com a impermeabilização do solo e com o consequente aumento da velocidade de escoamento.
- Os valores dos caudais são tanto maiores quanto maior for a velocidade do escoamento na bacia hidrográfica e, consequentemente, quanto menor for o respectivo tempo de concentração, provocada pela urbanização do solo.
- Sendo constantes, ao longo de toda a bacia, o tipo de solo e a cobertura vegetal, os caudais aumentam à medida que cresce o parâmetro “b” da elipse, i.e, à medida que aumenta a largura da bacia, e por conseguinte, a sua área.

3.4 Análise de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões e parcialmente impermeabilizada na zona adjacente à PH

3.4.1 Descrição do estudo efectuado

A hipótese de que a situação mais gravosa ocorre quando toda a bacia está a contribuir, pode não ser necessariamente verdade sempre que se trate de bacias heterogéneas.

Em certas sub-bacias, com áreas relativamente pequenas em relação à área total da bacia, a situação mais gravosa pode acontecer para chuvadas curtas de grande intensidade em que apenas a área da sub-bacia junto à PH contribui para o escoamento.

O objectivo deste estudo consiste, por isso, na quantificação do caudal máximo esperado, e a distância à PH onde o mesmo ocorre, por forma a averiguar, se para esse escoamento, contribui toda a área da bacia ou apenas parte dela.

Assim, supõe-se uma bacia de forma elíptica, em que a linha de água principal flui coincidente com eixo “x”, a meio da largura de “y” (2b) e com uma zona impermeabilizada junto à PH com extensão z.

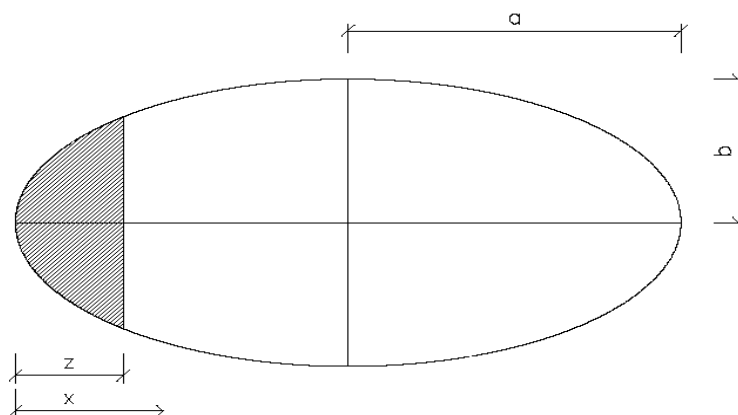


Fig. 3.6- Esquema da bacia parcialmente urbanizada

Para o coeficiente de escoamento e velocidade correspondente às diferentes situações fisiográficas consideradas foram adoptadas as seguintes designações:

- C_1 = coeficiente de escoamento da situação inicial—sem alteração da permeabilidade do solo
- C_2 = coeficiente de escoamento da fracção alterada – com solo urbanizado
- v_1 = velocidade de escoamento na situação inicial
- v_2 = velocidade de escoamento na área alterada

Note-se que ao proceder a esta análise estática para cada relação “ z/L ” e iterar o procedimento para diversas relações está-se a simular uma análise dinâmica decorrente do crescimento progressivo da área urbanizada em relação à área total que é constante. Tendo em consideração que geralmente as bacias se vão impermeabilizando de jusante para montante a análise feita reflecte a realidade.

Para a verificação, em cada situação de urbanização ($z=\text{constante}$), da possível existência de sub-bacias mais desfavoráveis em termos de caudais, procedeu-se ao cálculo para diferentes valores de $x \leq L$. Trabalhou-se assim com secções da elipse cada uma contendo uma outra de forma distinta e que corresponderá à área impermeabilizada junto ao extremo de eixo maior da elipse, e a restante mais afastada, com superfície natural.

Ao considerar “ z ” como sendo o comprimento da parte impermeabilizada e “ x ” a extensão da bacia, ocorrem três situações distintas, dependentes destes valores, que importa considerar:

- Situação 1 $\Rightarrow x < z$;
- Situação 2 $\Rightarrow x = z$;
- Situação 3 $\Rightarrow x > z$;

Para cada uma destas secções, terão que se considerar, necessariamente, diferentes tempos de concentração e, diferentes coeficientes de escoamento.

Os tempos de concentração foram calculados atendendo aos comprimentos de percurso e às respectivas velocidades de escoamento.

O coeficiente C foi, no caso da área composta heterogénea, determinado pela média ponderada do C_1 e C_2 , correspondente às duas zonas constituintes da bacia.

Foram deduzidas as seguintes expressões:

a) - Tempos de Concentração

$$\bullet \quad tc = \frac{\frac{b}{a}\sqrt{2ax-x^2} + x}{v_2}; x < z \quad (3.1)$$

$$\bullet \quad tc = \frac{\frac{b}{a}\sqrt{2ax-x^2} + z}{v_2}; x = z \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad tc = \frac{\frac{b}{a}\sqrt{2ax-x^2} + (x-z)}{v_1} + \frac{z}{v_2}; x > z \quad (3.3)$$

b) Coeficientes de escoamento

$$\bullet \quad C = C_2; x < z$$

$$\bullet \quad C = C_2; x = z$$

$$\bullet \quad C = \frac{C_1(A_x - A_z) + C_2 A_z}{A_x}; x > z \quad (3.4)$$

c) Caudais

$$\bullet \quad Q = C_2 \, a' \left[\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + x}{v_2} \right]^{b'} A_x; \quad x < z \quad (3.5)$$

$$\bullet \quad Q = C_2 \, a' \left[\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + z}{v_2} \right]^{b'} A_x; \quad x = z \quad (3.6)$$

$$\bullet \quad Q = \frac{C_1(A_x - A_z) + C_2 A_z}{A_x} a' \left[\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + (x - z)}{v_1} + \frac{z}{v_2} \right]^{b'} A_x; \quad x > z \quad (3.7)$$

Uma das hipóteses para cálculo do caudal máximo, será determinar a abcissa, que delimita a bacia e para a qual o Q é máximo, igualando a zero a 1ª derivada (em ordem a “x”) das expressões deduzidas para o caudal. Obtiveram-se as seguintes derivadas:

$$\bullet \quad \frac{dQ}{dx} = C_2 \left(\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + x}{v_2} \right)^{b'} \left(\frac{2ab - 2b(x-a)^2/a}{\sqrt{a^2 - (x-a)^2}} \right) +$$

$$\left(\frac{b(2a - 2x)}{\sqrt{2ax - x^2}} + 1 \right) \frac{1}{v_2} b' C_2 A_x \quad (3.8)$$

$$\bullet \quad \frac{dQ}{dx} = \left(\frac{C_1(A_x - A_z) + C_2 A_z}{A_x} \right) \left(\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + (x - z)}{v_1} + \frac{z}{v_2} \right)$$

$$\left(\frac{2ab - 2b(x-a)^2/a}{\sqrt{a^2 - (x-a)^2}} \right) + b' \left(\frac{b(2a - 2x)}{\sqrt{2ax - x^2}} + 1 \right) \frac{1}{v_1} \left(\frac{C_1(A_x - A_z) + C_2 A_z}{A_x} \right) A_x$$

$$+ \frac{(-A_z(C_1 - C_2))}{A_x} A_x \left(\frac{\frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + (x - z)}{v_1} + \frac{z}{v_2} \right); \quad x < z \quad (3.9)$$

Nota: A expressão do caudal para $x = z$, não tem derivada em ordem a x .

Ainda que se apresentem as expressões analíticas das derivadas optou-se por analisar o comportamento dos caudais tratando graficamente as expressões da alínea c), atribuindo valores crescentes a x , para cada extensão impermeabilizada (z), até a um comprimento máximo de 2000m, ao mesmo tempo que se fixavam os valores das velocidades (v_1 e v_2) e os coeficientes de escoamento (C_1 e C_2).

Admitiram-se os seguintes valores para o cálculo:

$a' = 399.66$ (da curvas I-D-F)

$b' = -0.624$ (da curvas I-D-F)

$2b$ (largura da bacia) = [200,500,1000,1500,1800,2000]

$2a$ (comprimento da bacia) = $L = [2000m]$

Z = comprimento da zona impermeabilizada = [200,400,500,800,1000,1500,2000]

x_i = comprimento das sub-bacias analisadas para efeitos comparativos

De forma a comparar os valores obtidos, para diferentes situações, consideraram-se diversos cenários, tendo-se feito variar, unilateralmente, os diversos factores intervenientes no processo de escoamento, nomeadamente a velocidade, o comprimento da área impermeabilizada e a largura da bacia.

O estudo feito vai permitir calcular as situações mais desfavoráveis em termos de caudais para bacias parcialmente impermeabilizadas e com formas diferentes. No seu limite máximo a bacia será a elipse completa mas estão consideradas várias fracções da elipse como área total, também estas apenas parcialmente impermeabilizadas.

Em todos os casos foi tomado como coeficiente de escoamento sobre o terreno natural o valor de 0,2, e admitiu-se que o percurso da gota cinematicamente mais afastada a montante da linha de água principal, se processa na perpendicular ao eixo dos “xx”, e à mesma velocidade que tomará quando fluir já em canal.

3.4.2 Apresentação dos resultados

A) Hipótese 1 - $C_2 = 0.50$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$

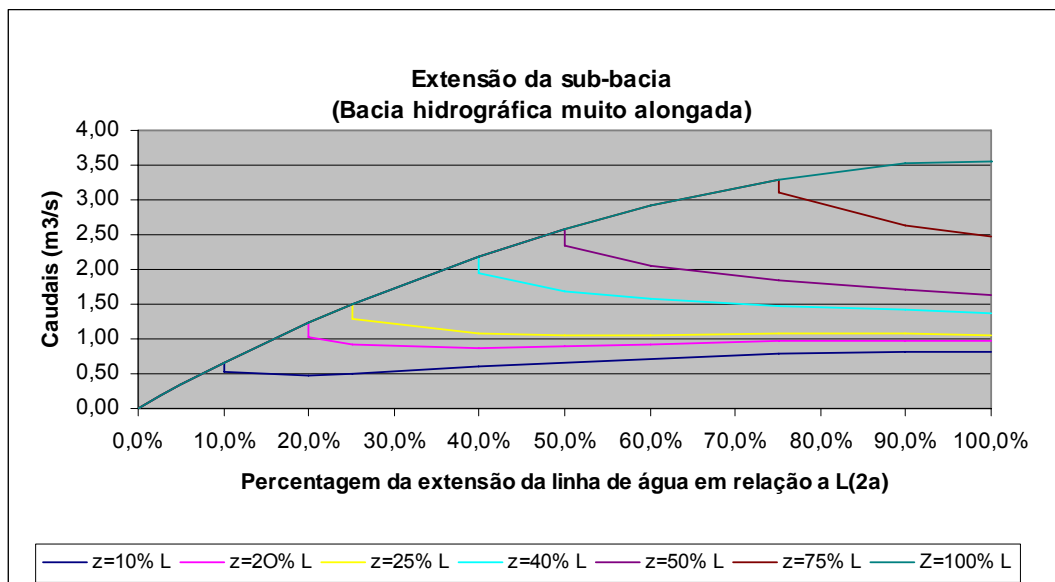


Fig.3.7A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$)

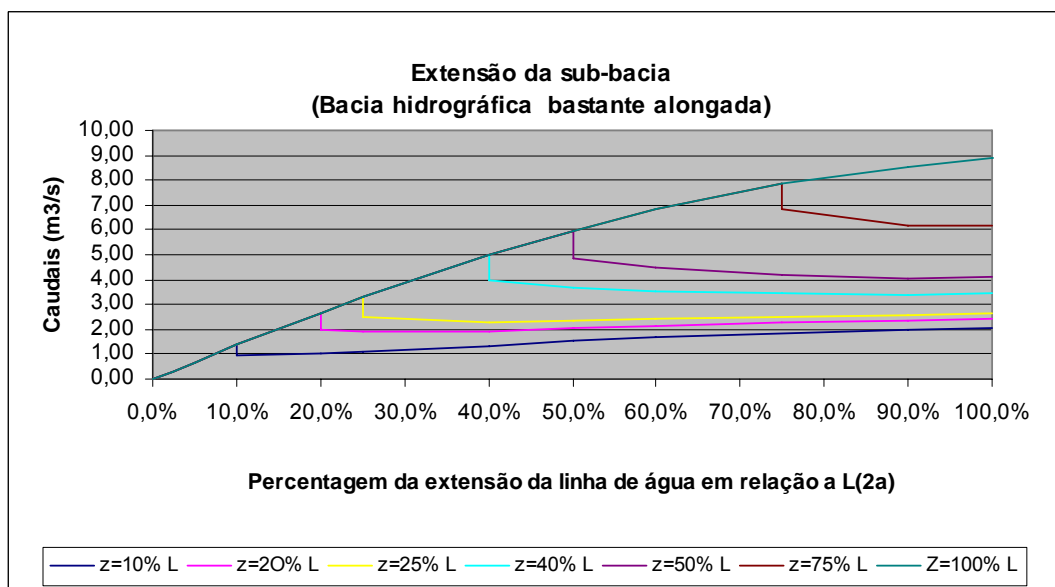


Fig.3.7B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.25$)

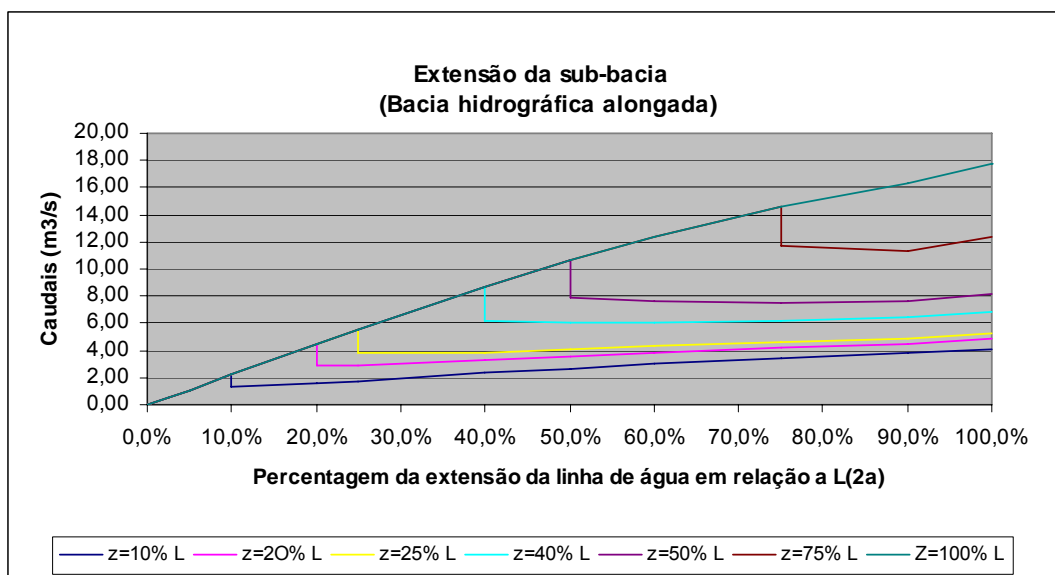


Fig.3.7C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$)

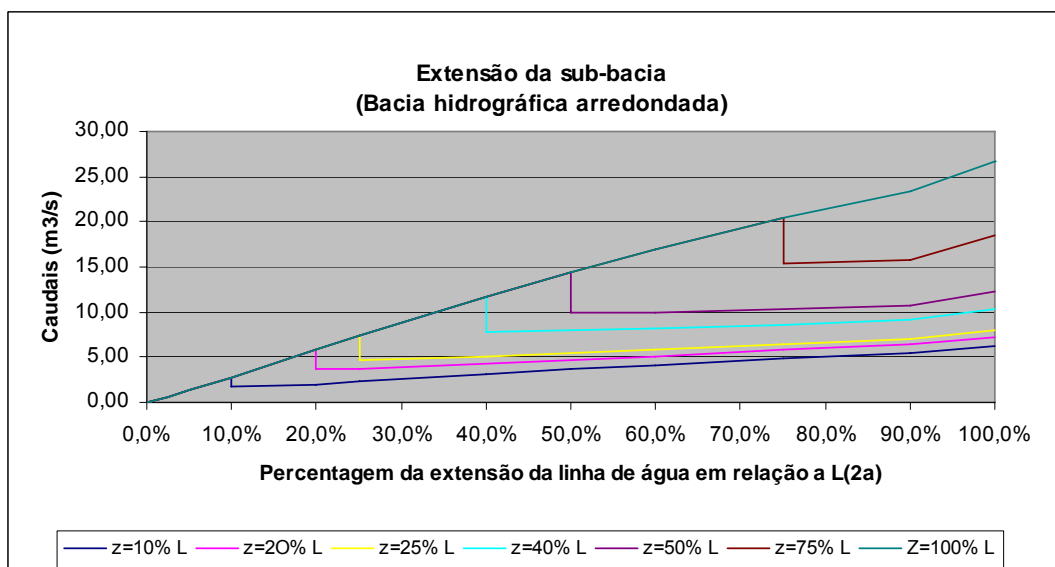


Fig.3.7D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$)

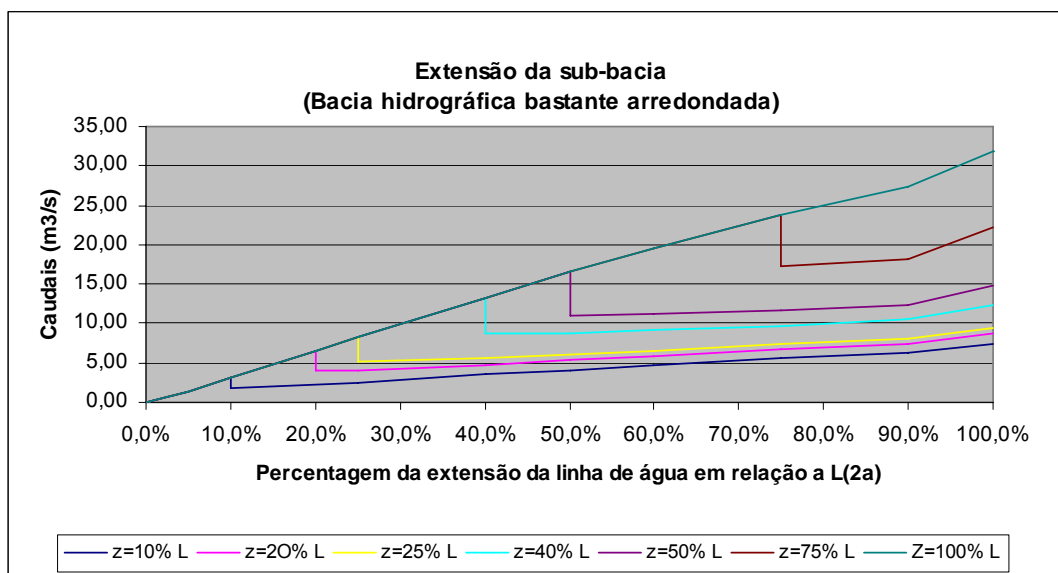


Fig.3.7E-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.90$)

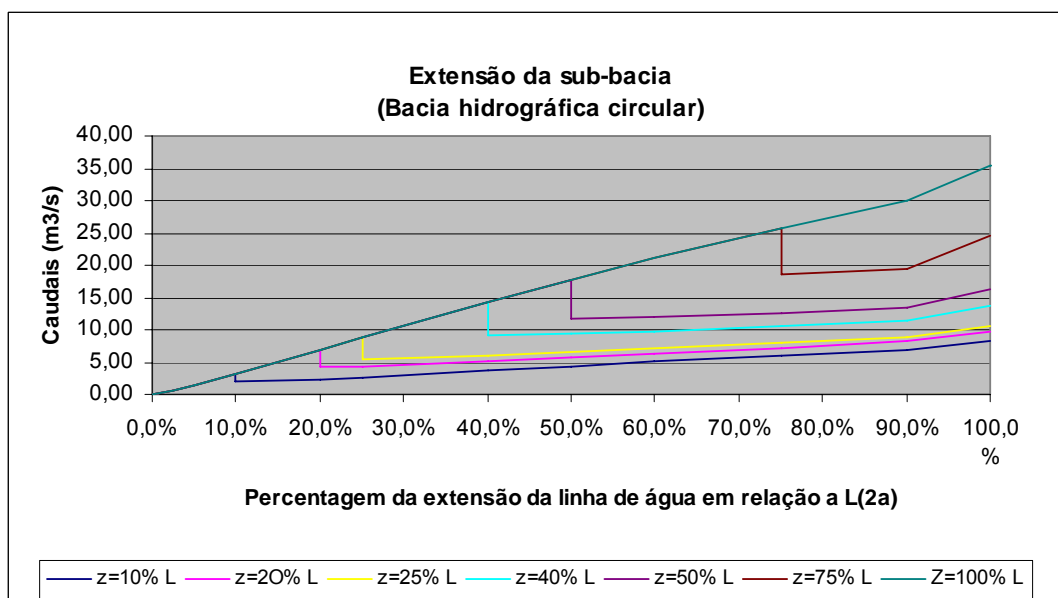


Fig.3.7F-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$)

B) Hipótese 2 - $C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$

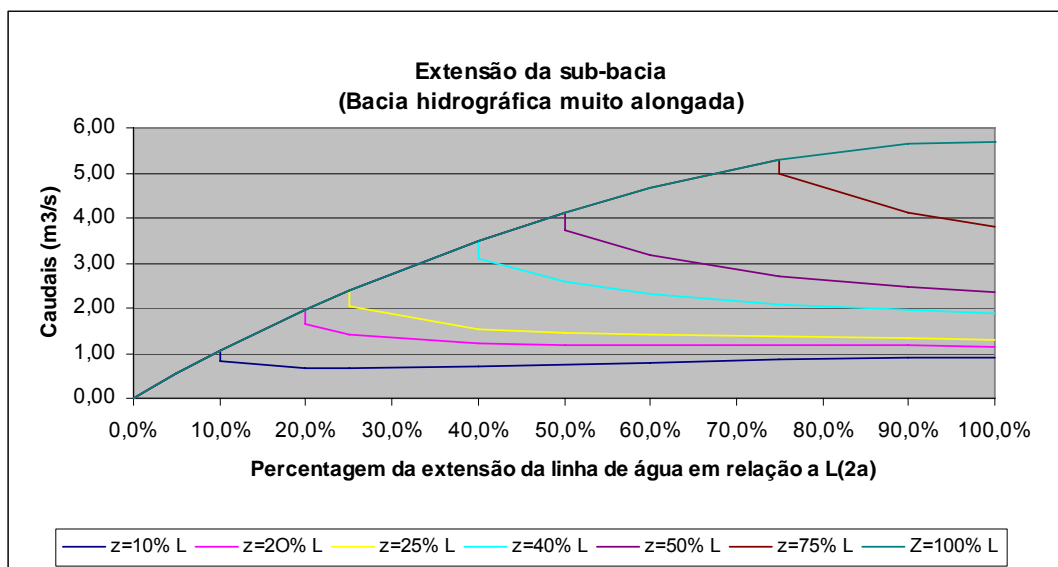


Fig.3.8A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,10$)

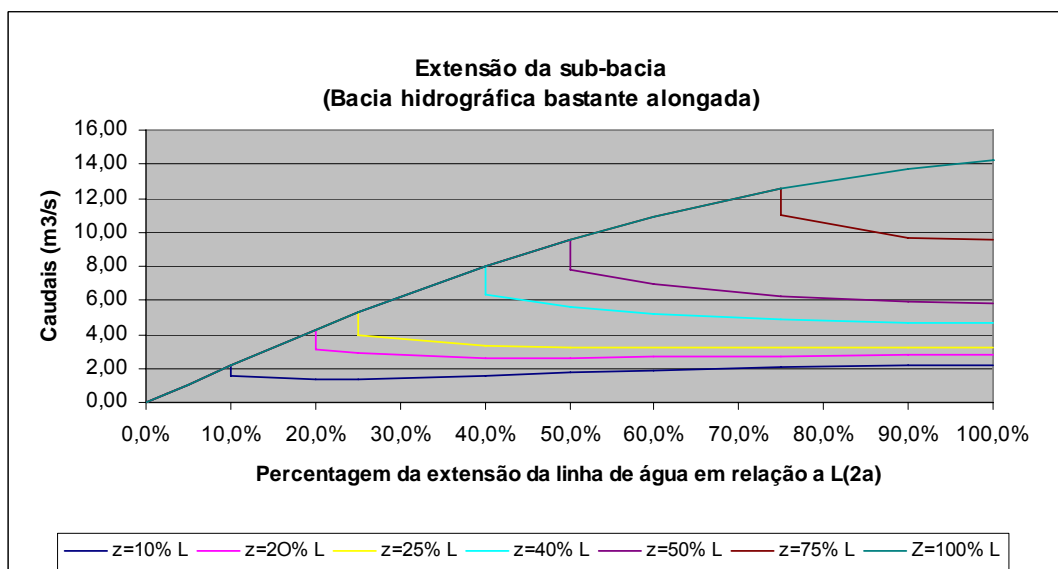


Fig.3.8B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,25$)

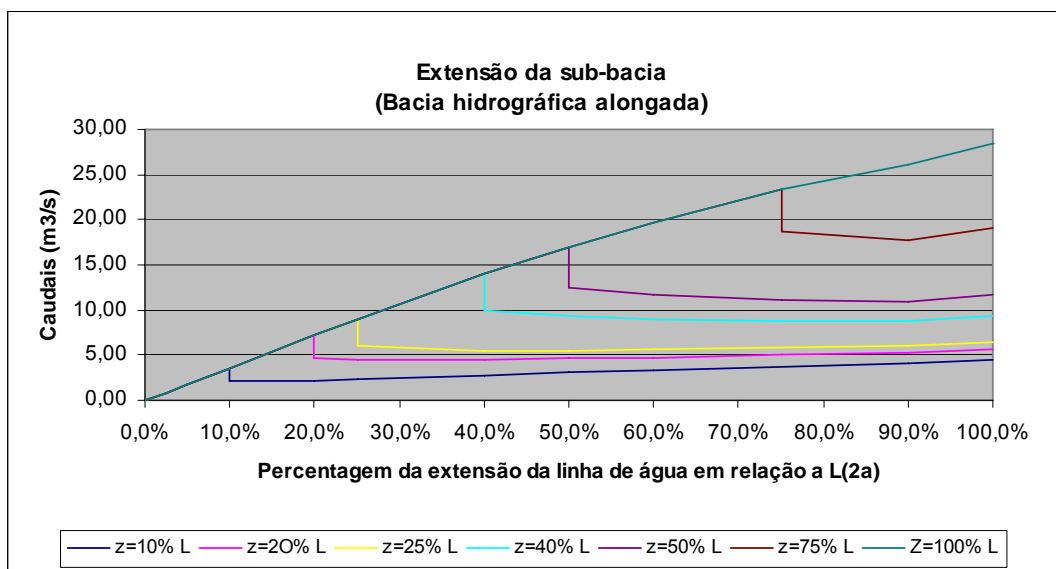


Fig.3.8C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas (b/a=0,50)

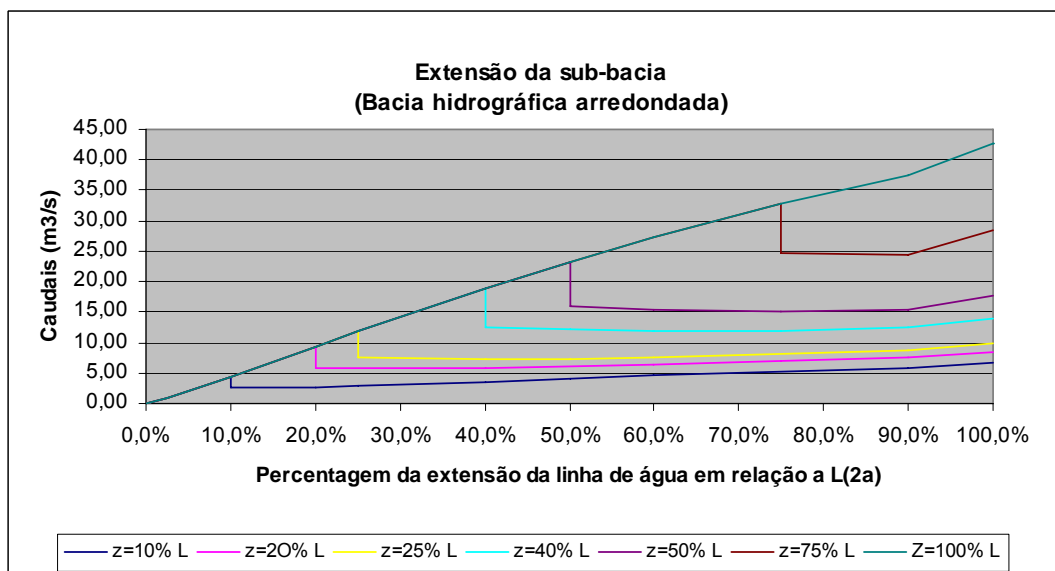


Fig.3.8D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas (b/a=0,75)

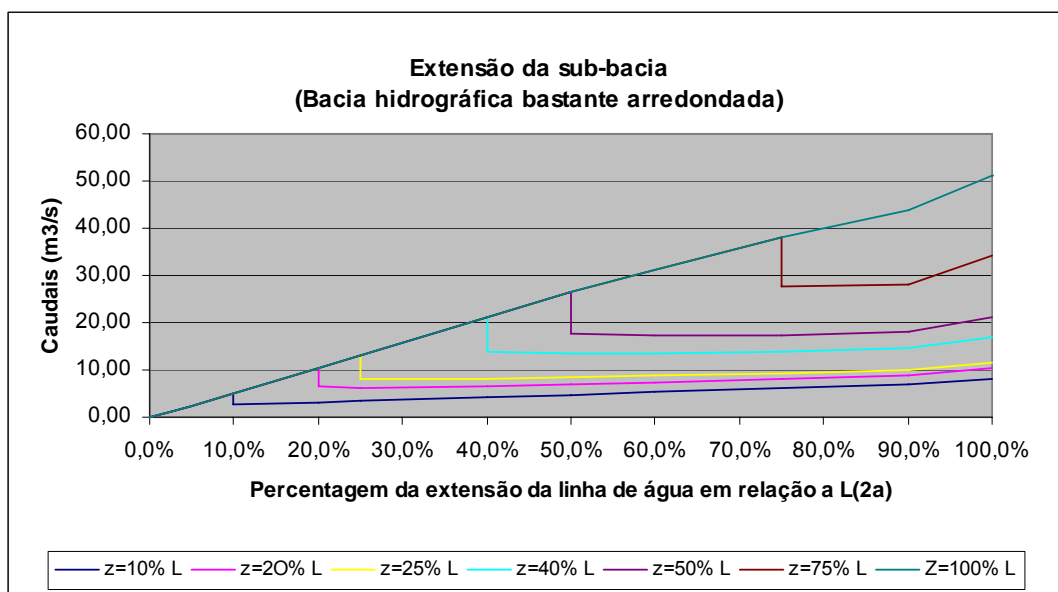


Fig.3.8E-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,90$)

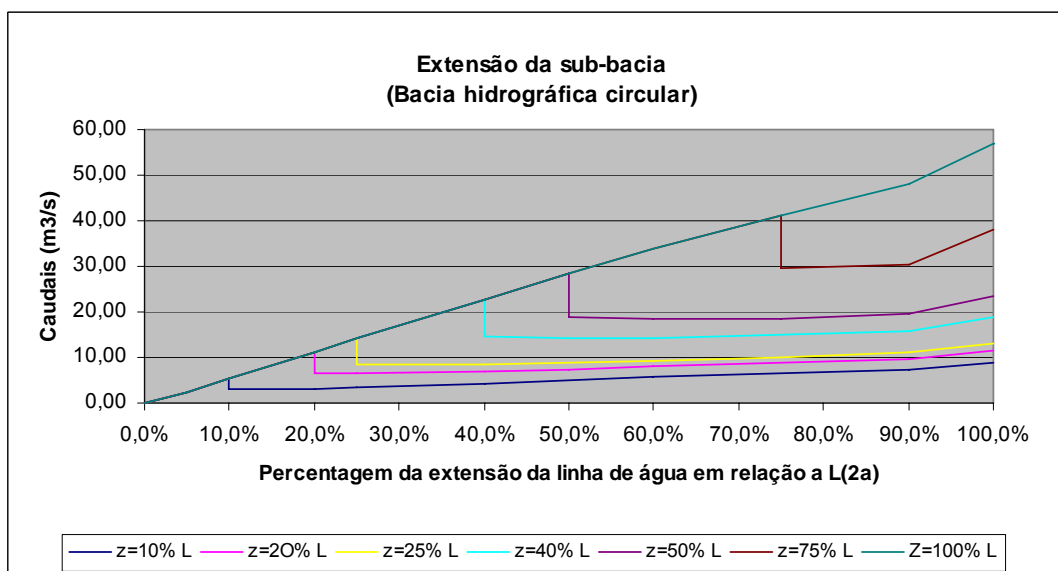


Fig.3.8F-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$)

C) Hipótese 3 - $C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 3.5\text{m/s}$

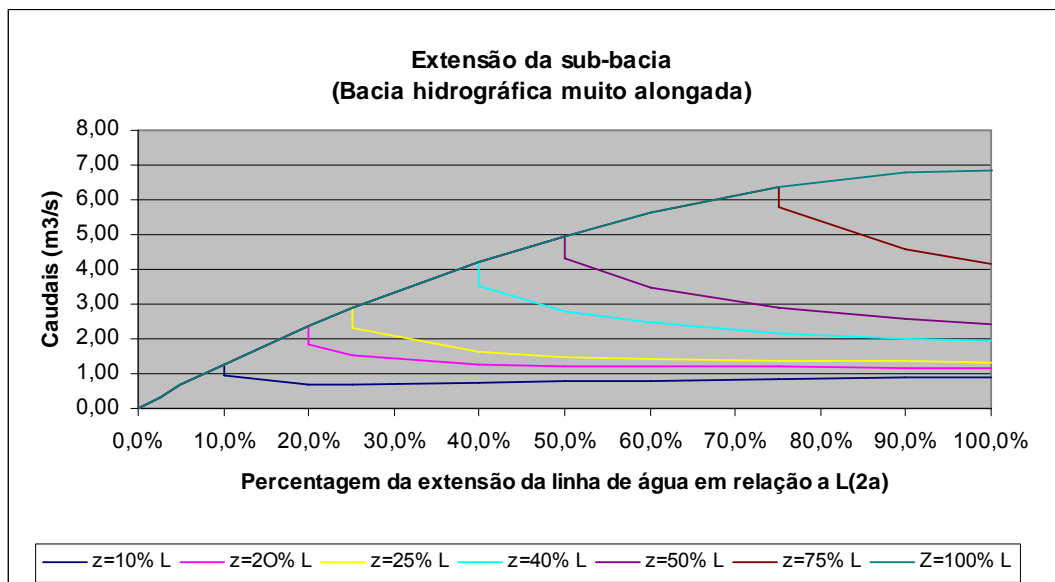


Fig.3.9A-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$)

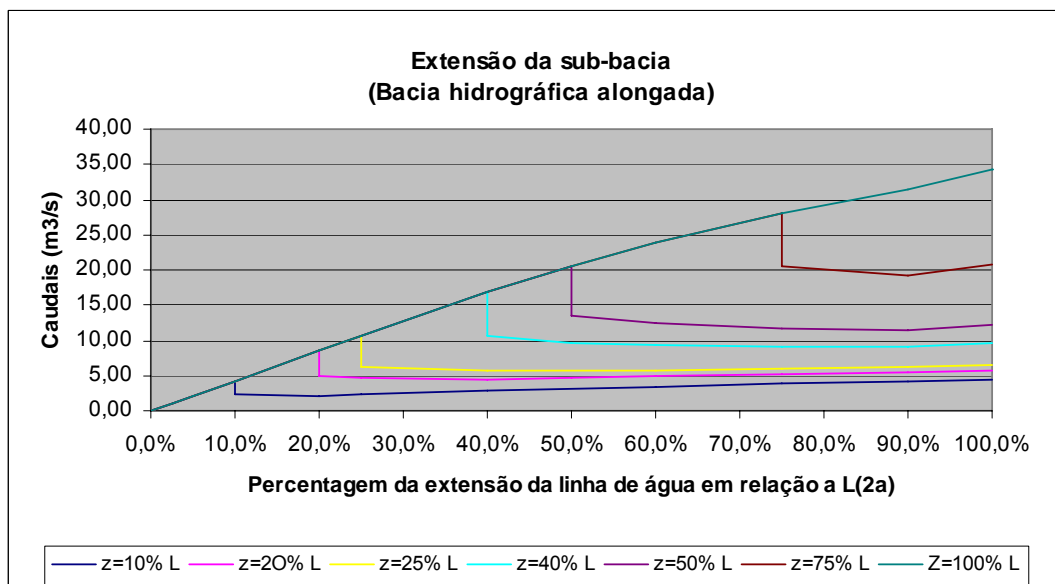


Fig.3.9B-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$)

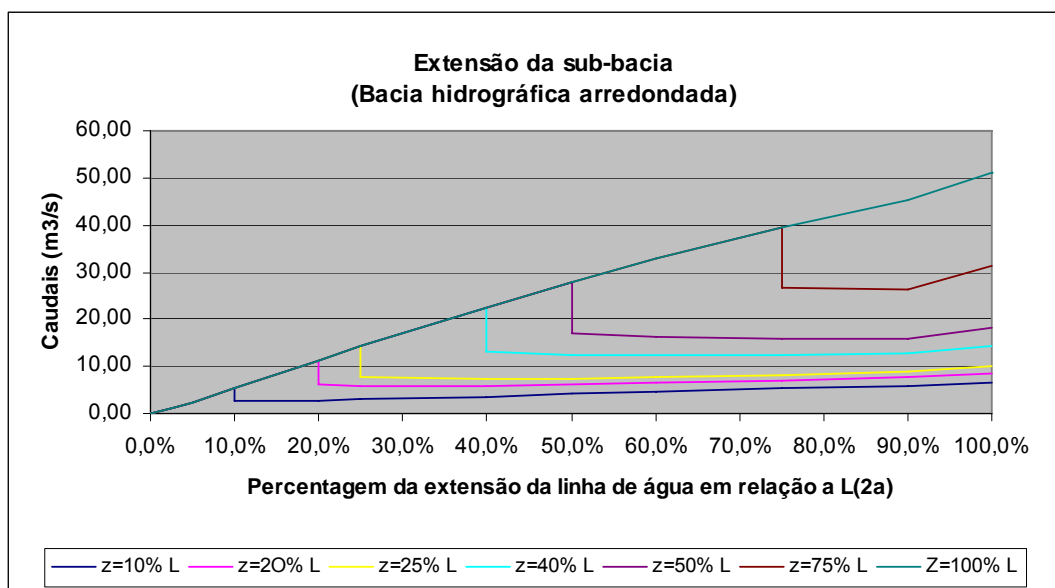


Fig.3.9C-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$)

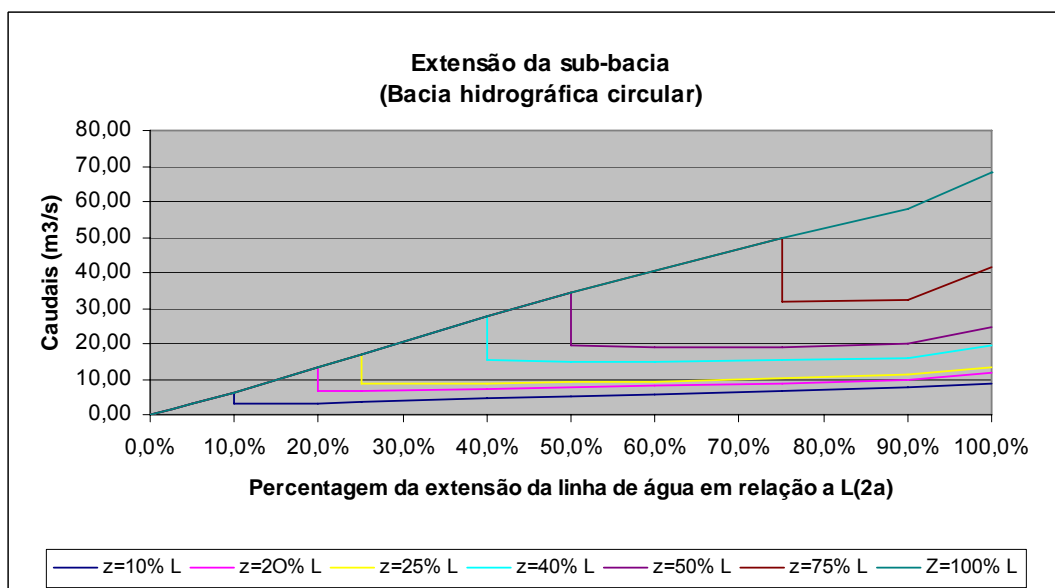


Fig.3.9D-Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$)

3.4.3 Análise dos resultados obtidos

Nos exemplos testados, variou-se C_2 entre os dois primeiros conjuntos enquanto a hipótese 3 vai poder ser comparada com a número 2, mantendo C_2 entre elas, mas elevando a velocidade de escoamento sobre terreno impermeabilizado.

- Nas situações analisadas verificou-se que, quando as bacias são alongadas ($b/a \leq 0.25$) o caudal máximo não ocorre quando toda a área da bacia está a contribuir para o escoamento, com excepção das que têm uma área impermeável junto à PH muito pequena em relação ao comprimento total da bacia hidrográfica ($z \leq 10\% L$), mas apenas no caso das bacias consideradas na Hipótese 1, ou seja com coeficiente e velocidade de escoamento mais baixo.

Nestes casos ($z \leq 10\% L$) o caudal obtido para uma área, correspondente à zona impermeabilizada, é igual ou praticamente igual ao caudal máximo gerado pela área total da bacia ($x = L$).

Então, neste tipo de bacias, em 90% dos casos a situação mais gravosa é aquela em que apenas a sub-bacia impermeabilizada contribui para o escoamento.

- Quando a forma das bacias se aproxima do tipo achatado ($b/a \geq 0.50$), os caudais máximos correspondem aos obtidos para a área impermeabilizada quando esta é superior a 20% L. Exceptua-se o caso das bacias descritas na Hipótese 1, onde os caudais mais gravosos ocorrem para sub-bacias cujo comprimento é igual ou superior a 40% de L.
- Da análise gráfica executada conclui-se que a generalidade dos cálculos hidrológicos habitualmente feitos em bacias heterogéneas, por estarem mais urbanizadas junto à secção em estudo, poderão estar errados, e não acautelando a segurança, dado que raramente os máximos caudais ocorrem para a chuvada com tempo de duração igual ao tempo de concentração de toda a bacia hidrográfica.
- O caudal máximo obtido com a sub-bacia de extensão z (impermeabilizada) conduz a caudais entre 7% e 117% superiores aqueles que se obteriam considerando toda a área da bacia, para as velocidades e coeficientes de escoamento considerados e desde que a área impermeabilizada seja igual ou superior a 10%L ou 20%L, para $b/a \leq 0.25$ e $b/a \geq 0.50$ respectivamente.

- Atingem-se maiores diferenças no caso em que diferença entre as velocidades consideradas é maior ($v_2 = 3.5 \text{ m/s}$).
- A situação, quase geral, de o máximo caudal de cheia ocorrer para as sub-bacias impermeabilizadas e não para toda a área tem maior relevância à medida que se acentuam as diferenças entre os coeficientes de escoamento (antes e depois da construção da urbanização) e, do mesmo modo, para as velocidades de escoamento de água.
- Não se detectam comportamentos qualitativamente diferentes, variando as velocidades e comparando as mesmas percentagens de impermeabilização e forma da bacia, no que se refere ao crescimento dos caudais. Quantitativamente as diferenças percentuais entre o pico e o calculado para toda a bacia são significativas.
- Como seria de esperar, o valor absoluto dos caudais máximos cresce muito quando a velocidade de escoamento na zona impermeável aumenta mantendo constante os restantes factores.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE SUMÁRIA DO EFEITO DA IMPERMEABILIZAÇÃO PROGRESSIVA NO AUMENTO DOS VOLUMES

4.1 Análise de uma bacia hidrográfica teórica de forma elíptica, antes e após a sua total impermeabilização.

4.1.1 Descrição do estudo efectuado

À semelhança da análise efectuada para os caudais, pretende-se com este estudo comparar os volumes retidos, a montante da PH, correspondentes ao aumento dos caudais originados pela impermeabilização do solo, e compará-los com os obtidos para a mesma bacia sem alteração do seu revestimento superficial.

Admitiram-se os mesmos pressupostos definidos no capítulo anterior, nomeadamente, forma da bacia, características da linha de água, coeficientes de escoamento e velocidades.

O cálculo dos volumes retidos pode ser realizado através de métodos mais ou menos simplificados.

De acordo com a Tese de Mestrado intitulada *Bacias de Retenção—Métodos de Dimensionamento* da autoria da Eng^a Maria Gorete Matias, o método simplificado pode contemplar além do método Holandês, um método alternativo que tenha em conta o esvaziamento da bacia hidrográfica após o final da chuva.

Uma vez que neste estudo se pretende avaliar o crescimento dos volumes e sua relação com a alteração das características do escoamento e não o seu valor quantitativo *per si*, utilizou-se o Método Holandês que é, de entre os métodos simplificados, o que permite calcular os volumes retidos de uma forma mais expedita.

Fórmula do Método Holandês:

$$V_a = -\frac{b' \times q}{1 + b'} \left[\frac{60 \times q}{C \times A \times a' \times (b' + 1)} \right]^{1/b'} \quad (4.1)$$

em que:

- q - caudal efluente (l/min)
- A - área da bacia de drenagem (m^2)
- C - coeficiente de escoamento
- a' e b' - constantes das curvas I-D-F
- V_a - volume de armazenamento (l)

Tal como no ponto 3.3 consideraram-se várias situações possíveis, correspondentes a diferentes dimensões do eixo menor da elipse, para avaliar qual o efeito da forma da bacia nos volumes gerados pela impermeabilização do solo.

Para o valor de caudal de saída – q – adoptou-se o valor de 3600 l/min.

4.1.2 Apresentação dos resultados

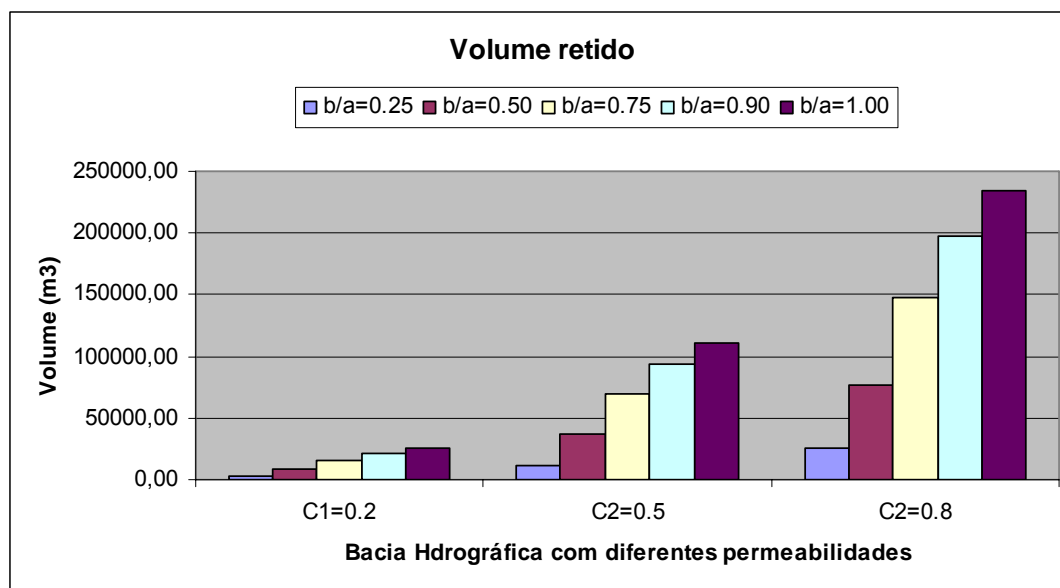


Fig.4.1- Variação dos volumes retidos para diferentes coeficientes de escoamento

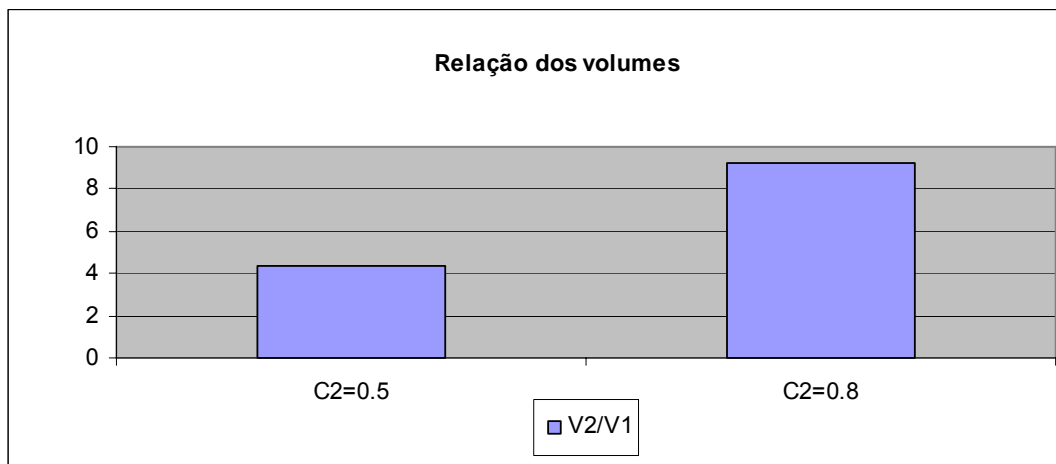


Fig.4.2-Variação relativa dos volumes retidos para diferentes situações de impermeabilização

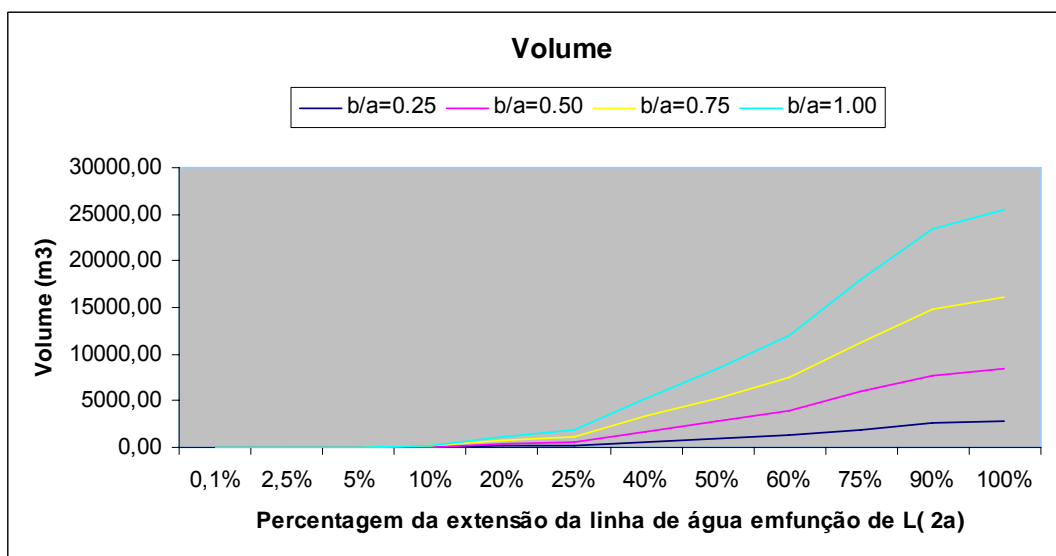


Fig.4.3 – Valor do volume V2 para diferentes comprimentos da bacia hidrográfica

4.1.2 Análise dos resultados

- Os valores dos volumes retidos são tanto maiores quanto maior for a velocidade do escoamento na bacia hidrográfica provocado pela alteração do revestimento do solo.
- O aumento da impermeabilização do solo, e respectivo crescimento do coeficiente de escoamento, induz a aumentos significativos dos volumes retidos.
- Sendo constantes, ao longo de toda a bacia, o tipo de solo e a cobertura vegetal, os volumes aumentam à medida que cresce o parâmetro “b” da elipse, i.e, à medida que aumenta a largura da bacia, e por conseguinte, a sua área.

4.2 Análise de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões e parcialmente impermeabilizada na zona adjacente à PH.

4.2.1 Descrição do estudo efectuado

Em complemento do estudo efectuado no ponto 3.4, pretende-se calcular os volumes relativos aos caudais induzidos pelo aumento do coeficiente de escoamento e diminuição do tempo de concentração em resultado do revestimento do solo, numa bacia cuja área foi sendo impermeabilizada.

Também, no caso dos volumes, pode não ser de todo verdadeira a hipótese de que a situação mais desfavorável acontece quando toda a bacia está a contribuir para o escoamento na secção final.

No caso dos volumes retidos é de esperar até que a situação tenha uma complexidade superior quando se trata de bacia heterogénea dado que serão de admitir situações com vários máximos relativos. Desde logo para chuvadas de duração inferior ao tempo de concentração de toda a bacia, mas também para chuvadas muito longas com pequenas intensidades mas que terão durações muito superiores ao tempo de concentração de toda a bacia. Na dissertação de Mestrado atrás referida esta última situação foi já abundantemente provada, ainda que para bacias homogéneas.

No presente trabalho admitiu-se a possibilidade, que se provará real, de, mesmo sub-bacias poderem levar a situações mais desfavoráveis que a consideração da área total. Esta diferença do comportamento, já provada para os caudais, resulta da heterogeneidade da bacia hidrográfica.

Para averiguar esta possibilidade, quantificar-se-ão os volumes esperados, de forma a determinar o volume máximo e a respectiva distância à PH, tendo como objectivo a avaliação da segurança dos órgãos de drenagem e possibilidade de ocorrência de inundações e não o dimensionamento da bacia de retenção. Assim, far-se-á variar o caudal de saída- q_s com a forma da bacia em consideração e corresponde em cada caso ao caudal que seria necessário escoar através da PH supondo que toda a área da bacia hidrográfica contribui para o escoamento na secção final.

Tal como no ponto anterior, adoptaram-se os valores e considerações definidas em 3.4, relativas à forma da bacia, coeficientes e velocidades de escoamento, bem como as características da linha de água e da zona impermeabilizada.

Neste caso, não poderá aplicar-se o Método Holandês para o cálculo dos volumes, uma vez que a condição de homogeneidade admitida no seu cálculo não é compatível com a existência de diferentes características de revestimento do solo consideradas neste estudo.

Deste modo, para ter em conta as variações de velocidades verificadas no percurso da água, os volumes retidos serão obtidos através da diferença entre os volumes afluente e efluente.

$$V_{\text{retido}} = V_{\text{afluente}} - V_{\text{efluente}} \quad (4.2)$$

em que:

$$V_{\text{afluente}} = CAat^b \quad (4.3)$$

$$V_{\text{efluente}} = q_s t \quad (q_s - \text{caudal de saída})$$

t - tempo de duração da chuvada

$$t = \frac{l}{v} \quad (l - \text{comprimento do percurso da água; } v - \text{velocidade de escoamento})$$

Procurou-se também averiguar qual o tempo de duração da chuvada para o qual ocorre o máximo volume retido, tanto no caso de toda a bacia hidrográfica contribuir para o escoamento como para as diferentes percentagens de áreas impermeabilizadas.

4.2.2 Apresentação dos resultados

A) Hipótese 1 - $C_2 = 0.50$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$

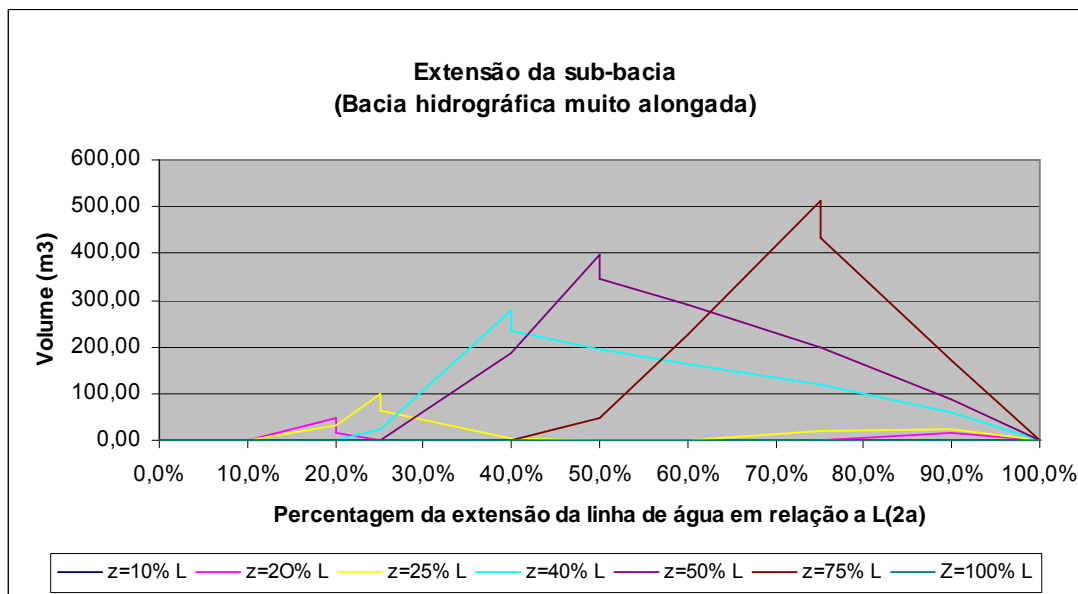


Fig.4.4A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.10$)

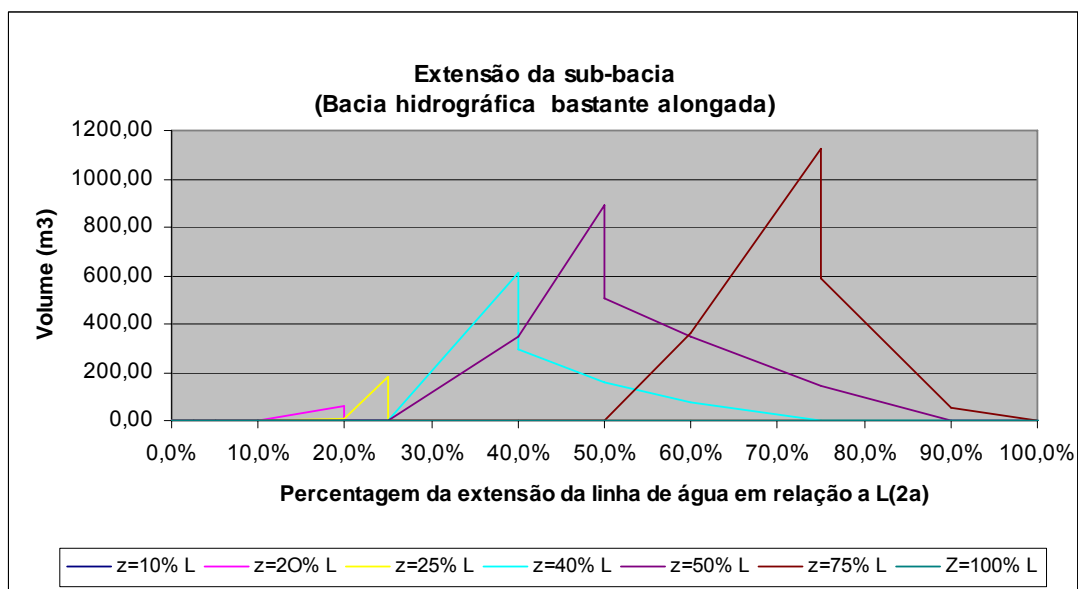


Fig.4.4B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.25$)

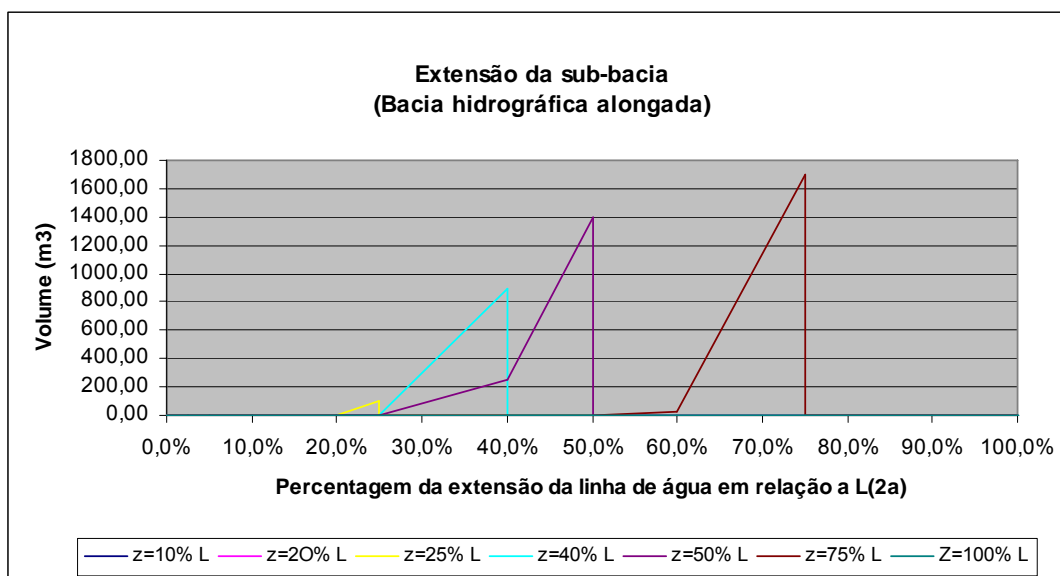


Fig.4.4C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.50$)

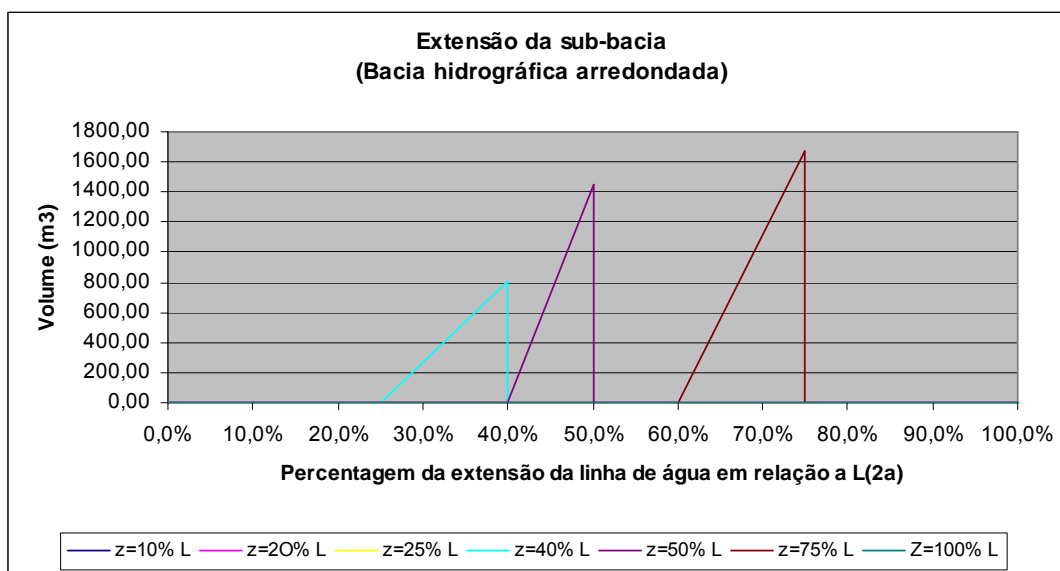


Fig.4.4D-Valores dos Volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.75$)

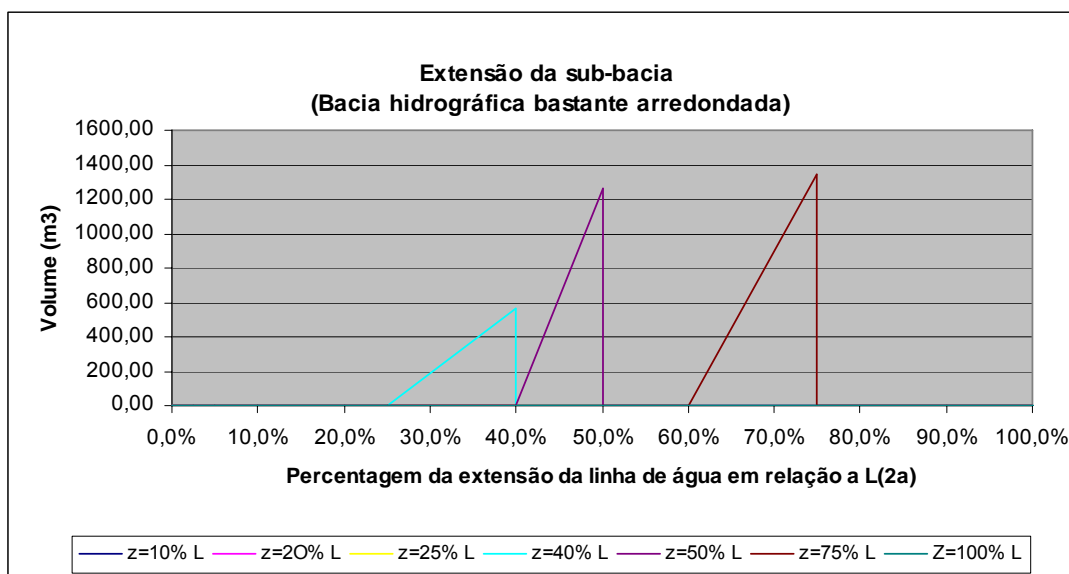


Fig.4.4E-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0.90$)

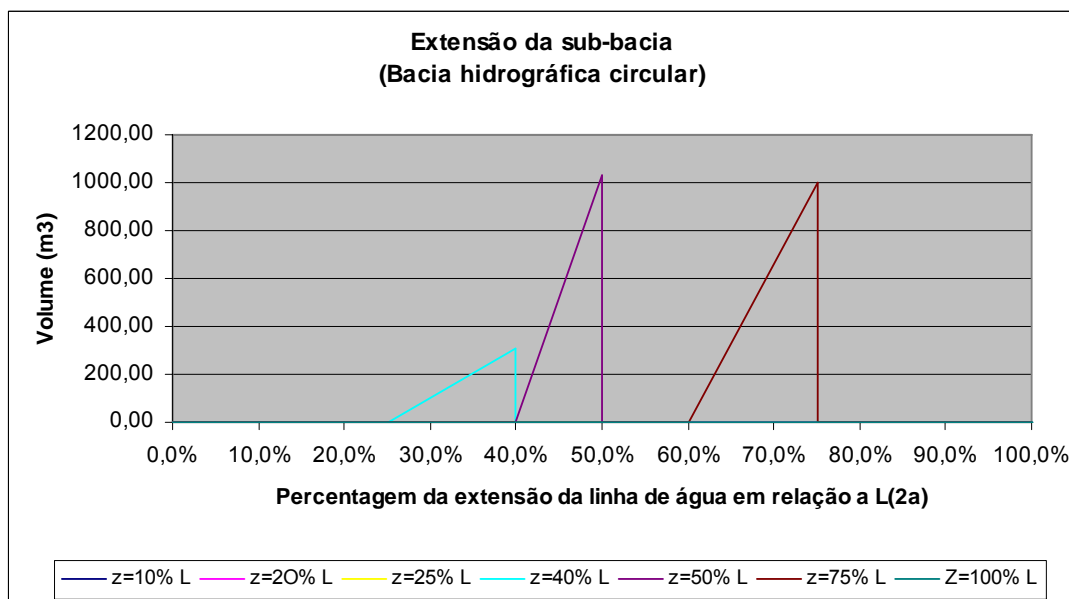


Fig.4.4F-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1.00$)

B) Hipótese 2 - $C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$

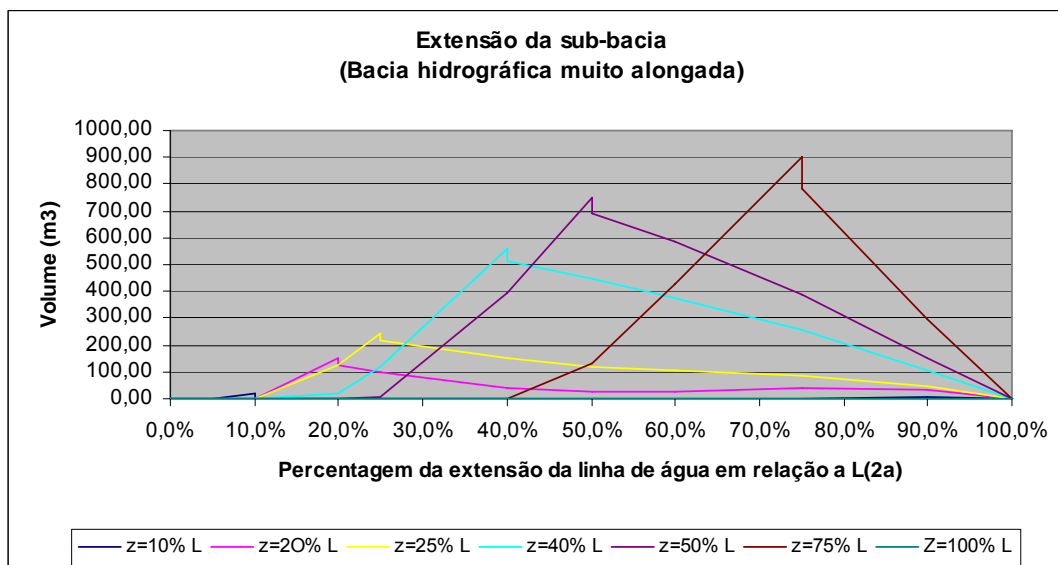


Fig.4.5A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,10$;))

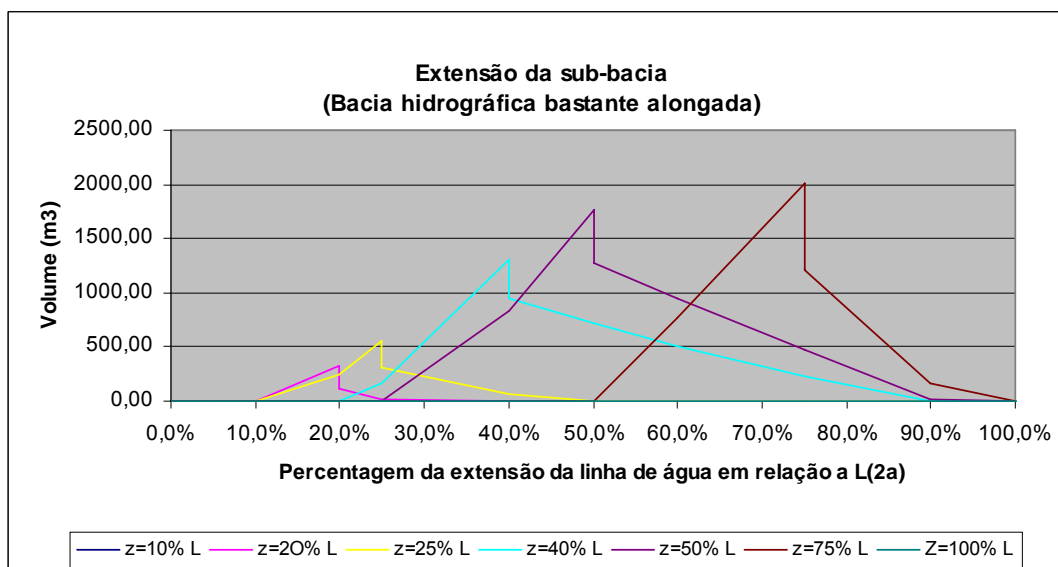


Fig.4.5B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,25$))

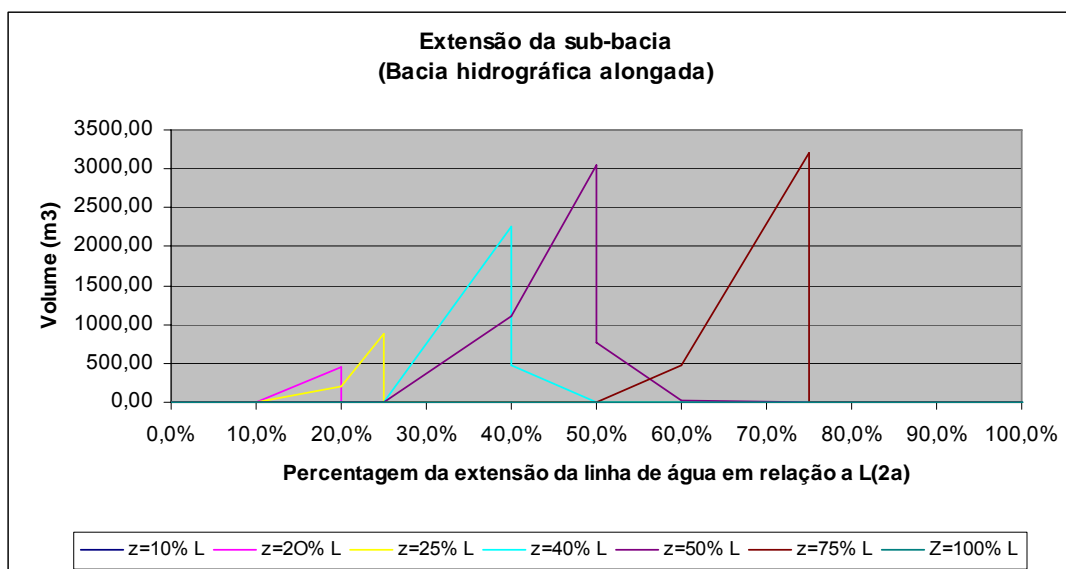


Fig.4.5C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,50$)

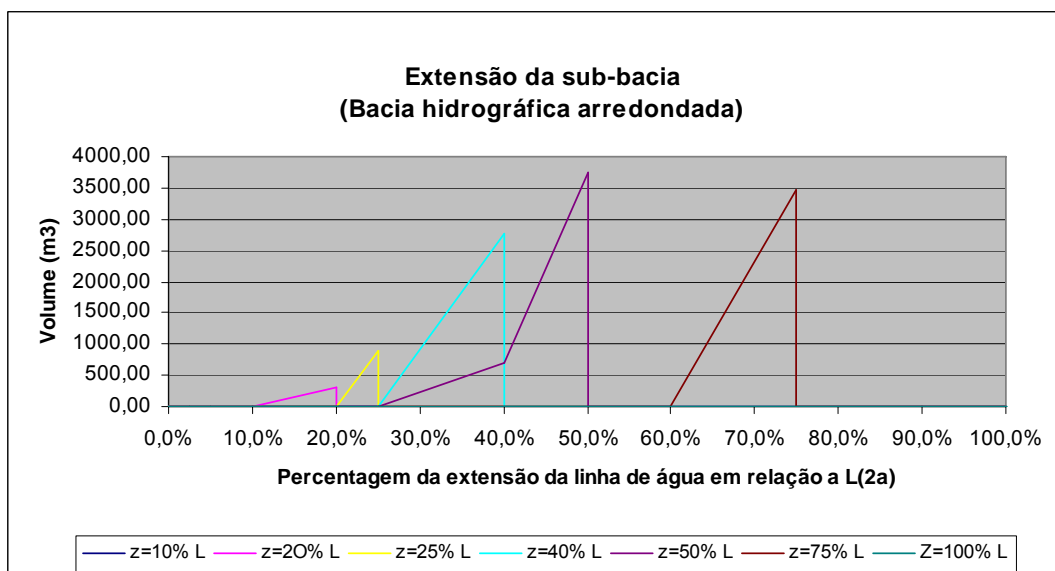


Fig.4.5D-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,75$)

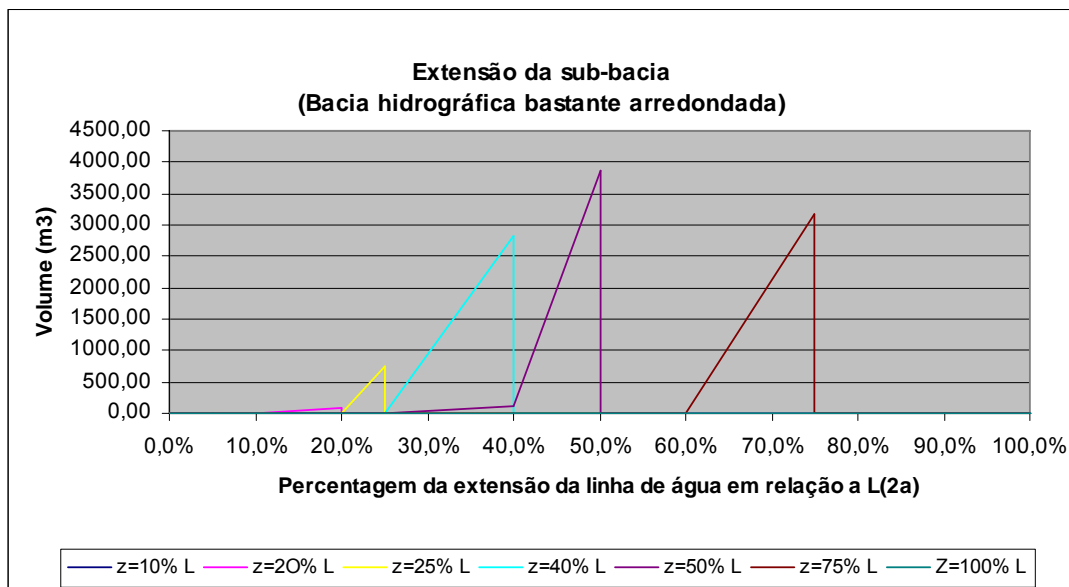


Fig.4.5E-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas (b/a=0,90)

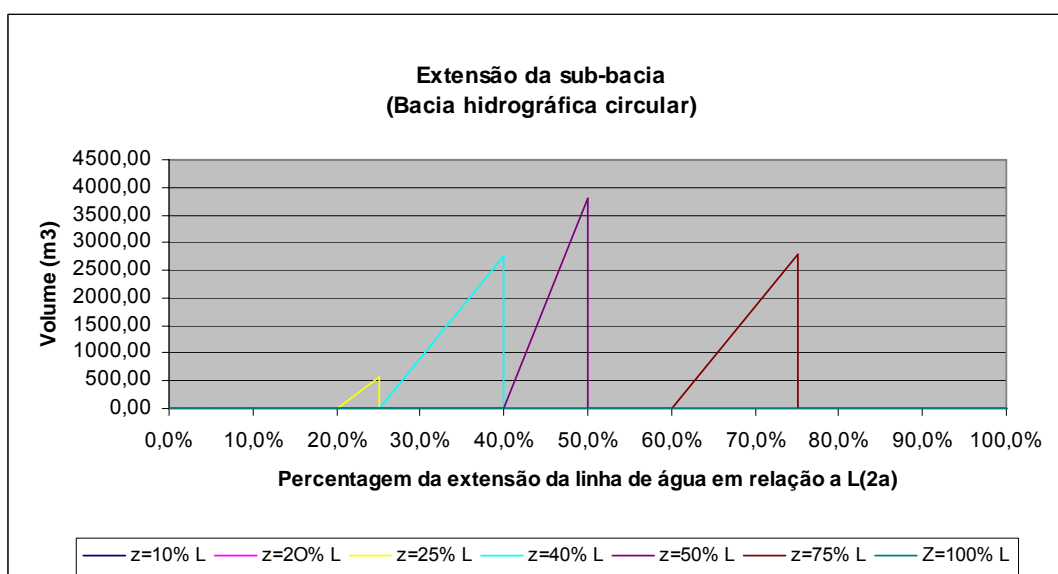


Fig.4.5F-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas (b/a=1.00)

C) Hipótese 3 - $C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 3.5\text{m/s}$

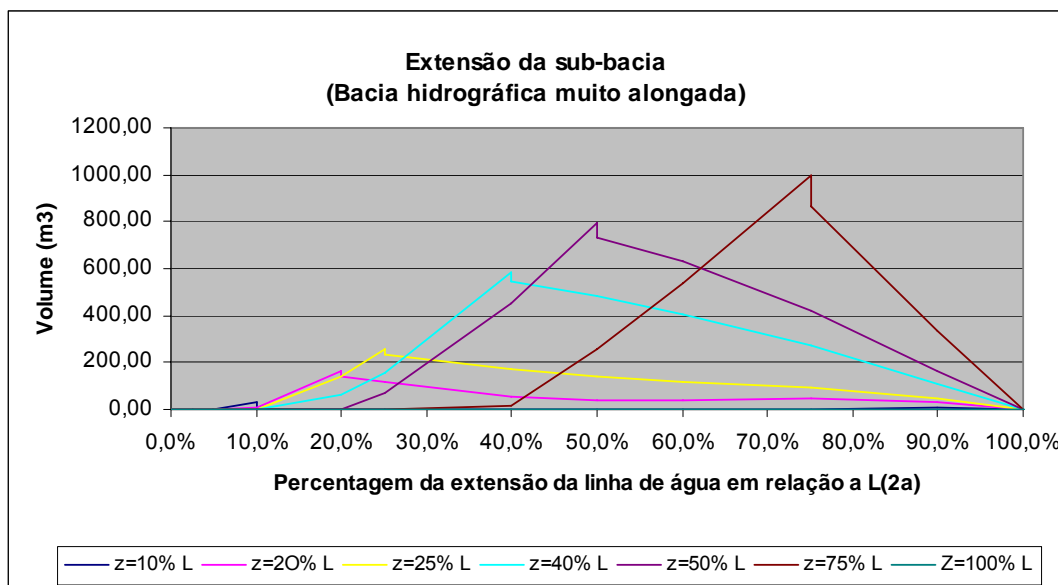


Fig.4.6A-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,10$;))

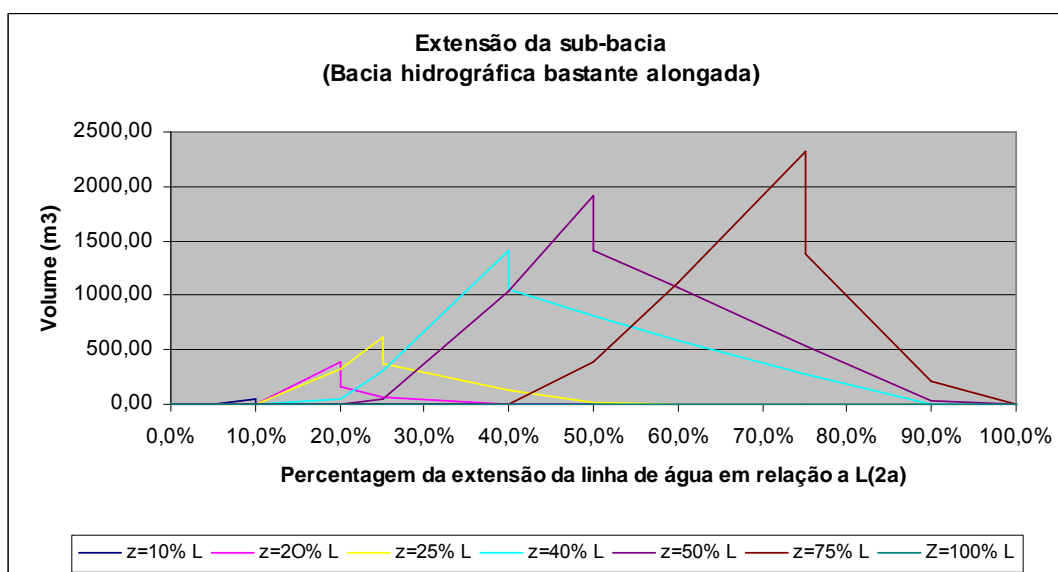


Fig.4.6B-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,50$)

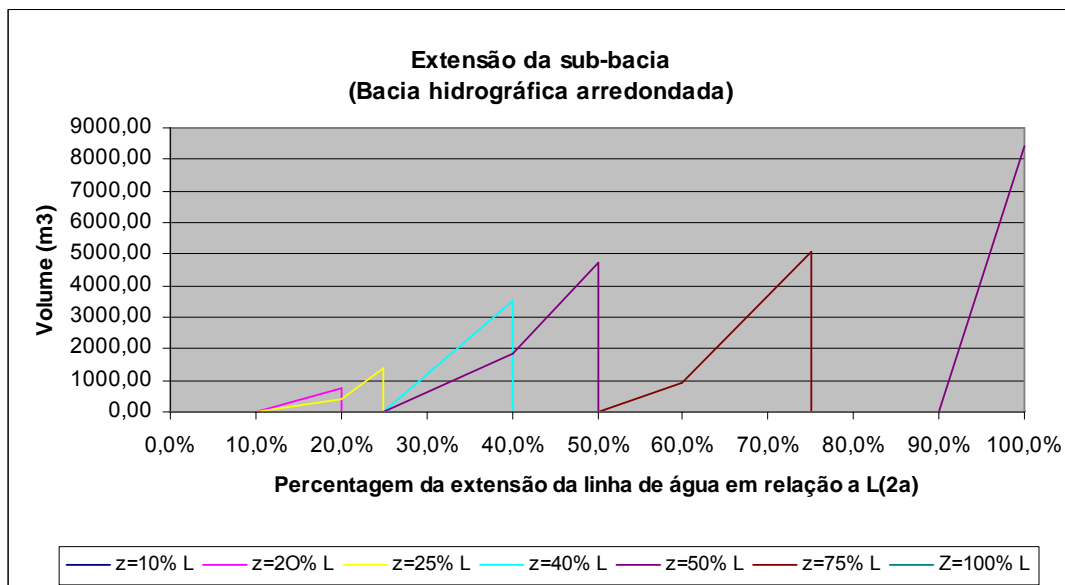


Fig.4.6C-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=0,75$)

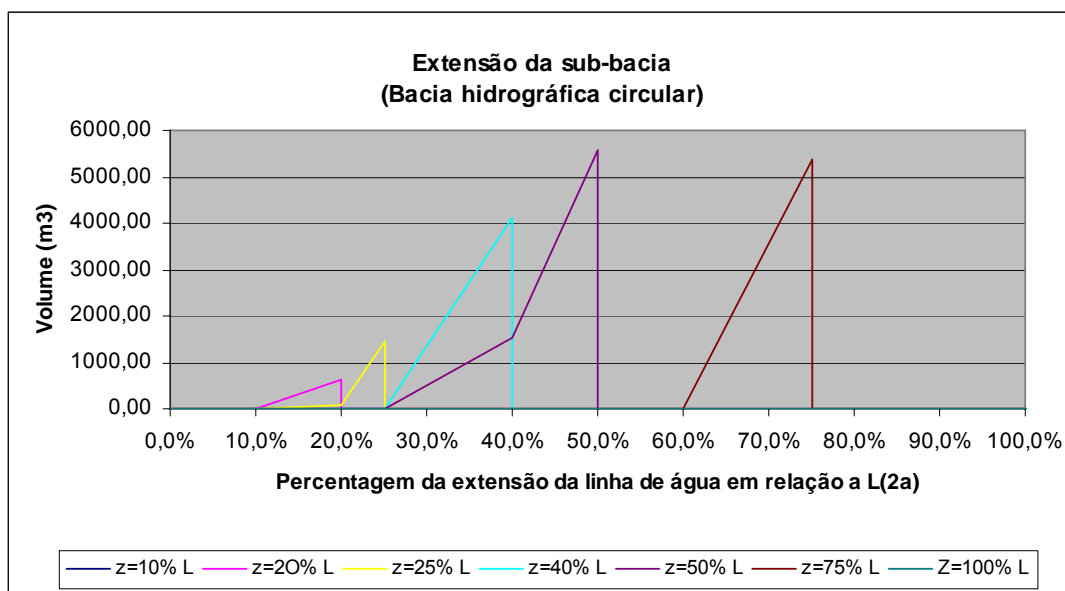


Fig.4.6D-Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias e para diferentes áreas impermeabilizadas ($b/a=1,00$)

D) Tempo de duração da chuvada correspondente ao volume máximo

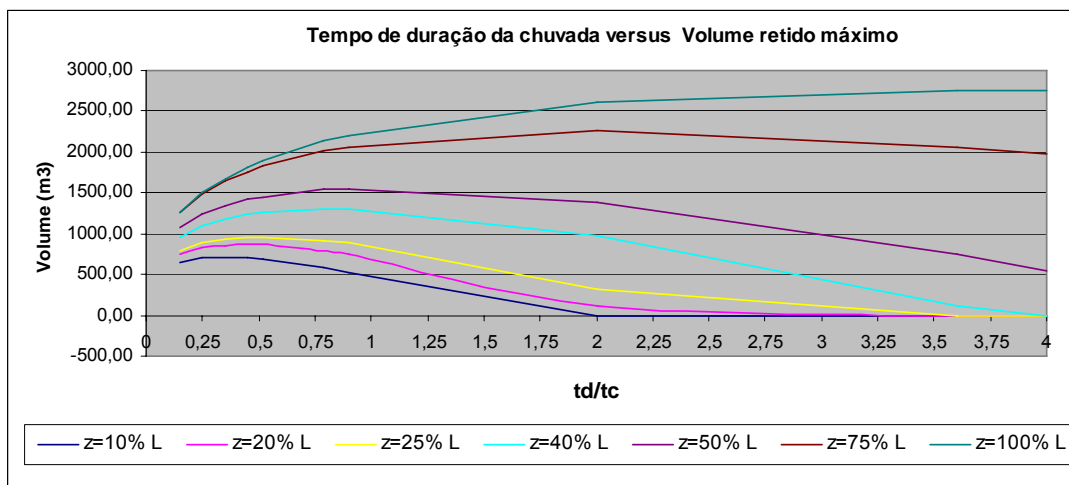


Fig.4.7-Valores dos volumes obtidos em função de t_c e para diferentes áreas impermeabilizadas ($L=2000m$; $b/a=0.10$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9m/s$; $v_2=2.6m/s$)

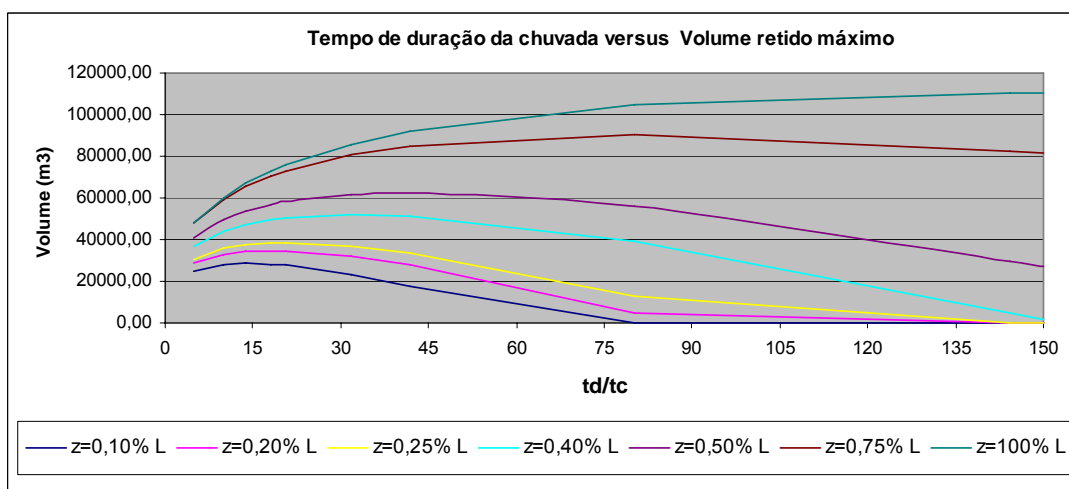


Fig.4.8-Valores dos volumes obtidos em função de t_c e para diferentes áreas impermeabilizadas ($L=2000m$; $b/a=1.00$; $C_2 = 0.50$; $v_1=0.9m/s$; $v_2=2.6m/s$)

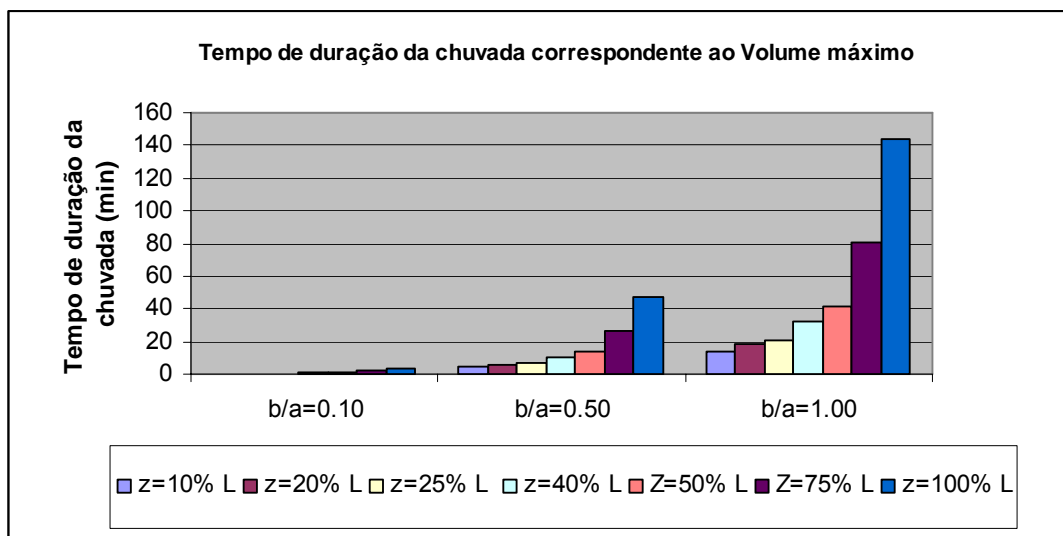


Fig.4.9-Valores dos tempos de duração de chuvada obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.50$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$)

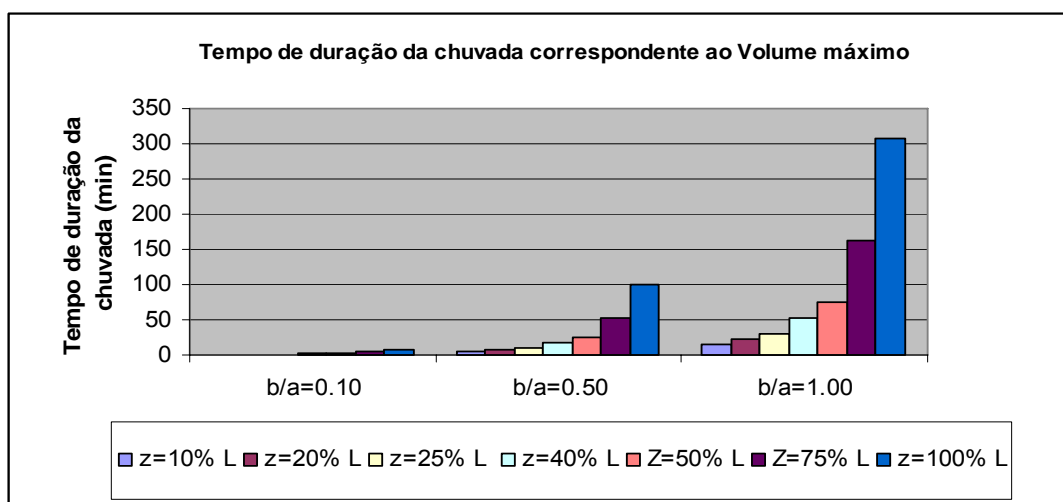


Fig.4.10-Valores dos tempos de duração de chuvada obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 2.6\text{m/s}$)

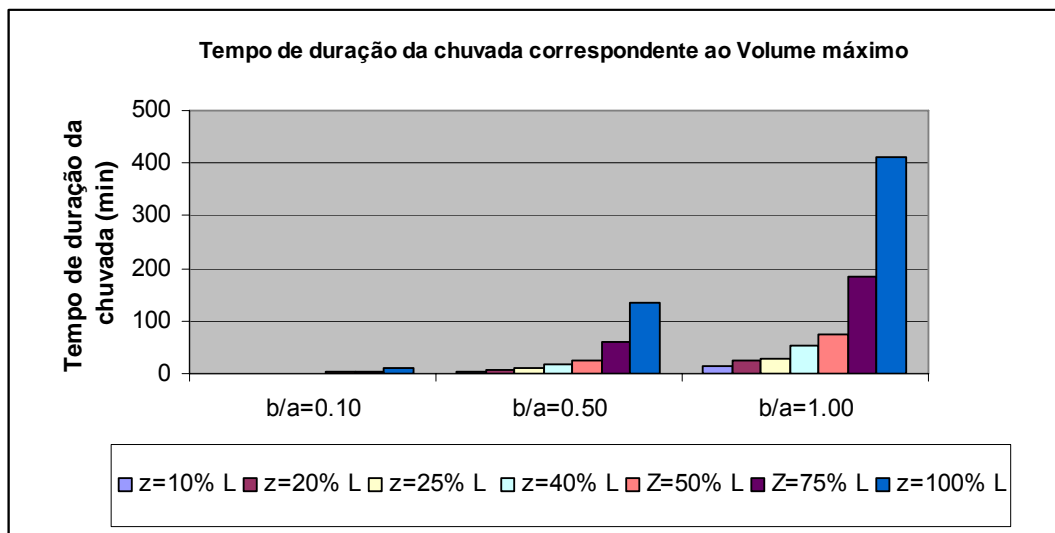


Fig.4.11-Valores dos tempos de duração de chuva obtidos para três tipos de bacias hidrográficas e para diferentes áreas impermeabilizadas ($C_2 = 0.80$; $v_1 = 0.9\text{m/s}$; $v_2 = 3.5\text{m/s}$)

4.2.3 Análise dos resultados

As hipóteses consideradas são exactamente as mesmas que se utilizaram para os caudais, variando entre a hipótese 1 e a 2 o coeficiente de escoamento da área urbanizada e entre a 2 e 3 a velocidade do escoamento para essa área.

- Quando $z=100\%$ L, ie quando toda a bacia está impermeabilizada, nunca se verifica retenção de água, pelo facto de se ter considerado o caudal de saída igual ao caudal esperado para $x=L$ e este coincidir com o caudal máximo.
- Para bacias alongadas ($b/a \leq 0.25$) e para $z \neq 100\%$ L ocorre sempre retenção, com excepção das bacias com forma correspondente a $b/a = 0.10$ e com coeficiente de escoamento e velocidade mais baixos ($C_2 = 0.50$ e $v_2 = 2.6\text{m/s}$).
- À medida que a bacia se aproxima da forma achatada ($b/a \geq 0.5$) a retenção de água verifica-se quando $0.25\% L \leq z \leq 100\% L$. Para valores de $b/a \geq 0.75$ esta situação ocorre para $0.40\% L \leq z \leq 100\% L$.
- Em todos os casos em que há retenção de água o máximo volume não ocorre quando toda a área da bacia hidrográfica está a contribuir para o escoamento. O valor mais elevado acontece para uma distância à PH igual ao comprimento da respectiva zona impermeabilizada.
- Esta situação é mais relevante quando se aumenta o coeficiente de escoamento e do mesmo modo para as velocidades.
- Da análise efectuada conclui-se que de um modo geral os cálculos hidrológicos, para avaliação da possibilidade de ocorrência de inundações, habitualmente realizados em bacias mais urbanizadas junto à PH poderão estar errados e não acautelam a segurança, pois, tal como no caso dos caudais, o máximo volume retido, normalmente, não ocorre para a chuva com tempo de duração igual ao tempo de concentração de toda a bacia hidrográfica.
- Os volumes aumentam com o aumento da velocidade e com o aumento do coeficiente de escoamento.

Da análise dos gráficos das Fig 4.3 a 4.7 conclui-se o seguinte:

- O tempo de duração da chuvada (t_d), para o qual é obtido o volume máximo, aumenta com o crescimento do parâmetro b da elipse, sendo mais significativo no caso das bacias achatadas.
- Quanto maior é a zona impermeabilizada maior é o volume gerado e, por conseguinte, maior é o tempo de duração da chuvada necessário para se verificar a ocorrência do volume máximo. Este crescimento é mais acentuado quando toda a bacia se encontra impermeabilizada ($z=100\% L$).
- Do mesmo modo, a duração da chuvada aumenta significativamente quando se alteram as características da zona impermeabilizada. O t_d é mais elevado para maiores valores do coeficiente de escoamento e velocidade da zona impermeabilizada.

CAPÍTULO 5

5.BACIAS DE RETENÇÃO - DESCRIÇÃO GENÉRICA DO SEU MODO DE FUNCIONAMENTO

5.1 Definições e constituição

Uma alternativa ao reforço, em pleno tecido urbano, dos colectores existentes será a criação, a jusante dos novos loteamentos, de reservatórios ou bacias de acumulação de águas pluviais, permitindo descarregar aí caudais que ultrapassem a capacidade de vazão da rede existente.

Uma bacia de retenção é uma estrutura que tem por objectivo a regularização dos caudais pluviais afluentes, permitindo a restituição a jusante de caudais compatíveis com um limite previamente fixado ou imposto pela capacidade de vazão de uma rede ou curso de água existente.



Fig.5.1-Bacia de retenção em Frescoule, França (STU 1994)

Independentemente do seu tipo, uma bacia de retenção, tem, em geral, a seguinte constituição:

- corpo da bacia – que inclui o fundo e bermas ou taludes laterais;
- dique de jusante – estrutura linear, cuja altura condiciona a altura máxima de retenção e onde, geralmente, se instalam os dispositivos de descarga em condições normais;
- dispositivos de descarga em condições normais – colectores, orifícios e válvulas;
- dispositivos de segurança (ou descarga em condições normais) – descarregador de superfície;

O dispositivo de descarga não permite o escoamento da totalidade dos caudais afluentes, em situações de forte pluviosidade, originando o armazenamento da água e consequente subida de seu nível dentro da bacia, que, por sua vez, aumenta o caudal descarregado. Com o tempo, a cheia dissipa-se e o caudal que se escoar é superior ao que entra, diminuindo o nível na bacia até que se atinja a situação de equilíbrio.

5.2 Utilidade

A finalidade de uma bacia de retenção é, predominantemente, *quantitativa ou hidráulica*, isto é, destina-se a regularizar os caudais, através de um armazenamento temporário, reduzindo os caudais de ponta para jusante, que terão que ser compatibilizados com o meio receptor.

Mas, este efeito de armazenamento atribui, também, à bacia uma função *qualitativa*, ao permitir melhorar a qualidade da água retida, principalmente, por efeito da decantação dos materiais sólidos suspensos.

A integração das bacias de retenção nos sistemas de drenagem, quando bem concebida, constitui, assim, uma mais valia para o meio urbano, contribuindo com os seguintes benefícios e utilidades:

- melhoria do comportamento do sistema de drenagem, através da capacidade de armazenamento e consequente diminuição dos riscos de inundação;
- criação de reservas de água para fazer face a necessidades agrícolas, ocorrência de incêndios e actividades industriais e municipais, como a limpeza de arruamentos e parques;
- custos de investimento, em regra, inferiores à ampliação da rede existente;
- construção mais rápida e simples;

- regularização dos caudais de ponta;



Fig.5.2-Bacias de retenção utilizadas para diferir os caudais

(a) Roissy, França (Renaudie 2005)



(b) IC 29 Espinho, Portugal 2006

- diminuição da poluição das águas pluviais através de diversos processos físicos, químicos e microbiológicos que permanentemente ocorrem na bacia e consequente melhoramento da qualidade da água;
- evita obras incómodas e dispendiosas de aumento da capacidade dos colectores de águas pluviais;
- recarga dos aquíferos por infiltração, quando a qualidade das águas pluviais não conduz a riscos para a qualidade da água subterrânea.

- criação de pólos de interesse recreativo e turístico, nomeadamente zonas para a prática de pesca e outros desportos náuticos;



Fig.5.3-Bacia de retenção com uso recreativo – Sarcelles, França (Renaudie 2005)

- embelezamento estético da paisagem através do efeito de espelho de água (no caso de bacias com nível de água permanente);



Fig.5.4-Bacia de retenção como exemplo do enriquecimento da paisagem – Thillay, França (Renaudie 2005)

5.3 Tipologias de bacias de retenção

As bacias de retenção podem classificar-se:

A) Quanto à sua localização relativamente ao colector ou canal de drenagem, em:

- bacias em série
- bacias em paralelo

B) Quanto à sua posição relativamente à superfície do solo, em:

- bacias a céu aberto
- bacias enterradas

C) Quanto ao seu comportamento hidráulico, as bacias a céu aberto podem ser:

- bacias secas
- bacias com nível de água permanente

5.3.1 Bacias em série e em paralelo

As bacias em série (*On-Line*) situam-se no alinhamento directo do colector ou canal de drenagem afluente, interceptando-o, e permitindo que todo o escoamento afluente passe pela bacia.

As bacias em paralelo (*Off-Line*) localizam-se paralelamente ao colector ou canal afluente. Neste caso, nem todo o escoamento aflui à bacia, sendo a passagem feita, geralmente, através de um descarregador lateral.

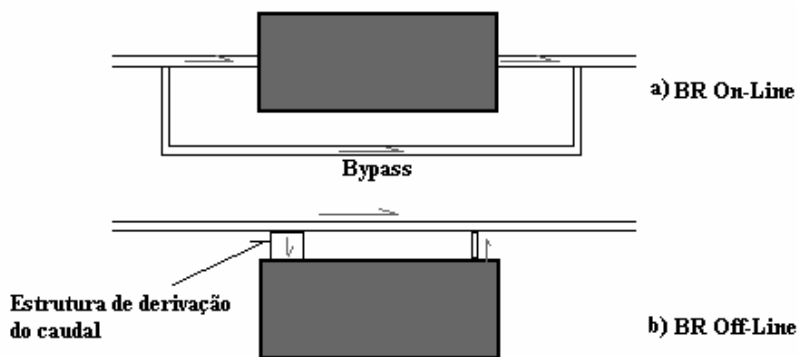


Fig 5.5-Bacia de Retenção: a) em série ou On-Line e b) em paralelo ou Off-Line
(Mata Lima; Silva; Raminhos -2006)

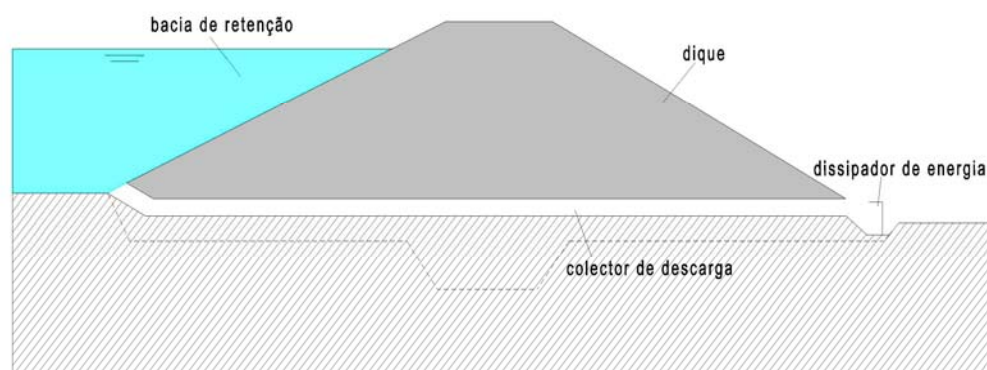


Fig.5.6-Perfil transversal de uma bacia em série



Fig.5.7-Perfil transversal de uma bacia em paralelo

As bacias de retenção em paralelo são, de uma forma geral, de menor dimensão e exigem menores custos de manutenção por serem menos afectadas pela acumulação de sedimentos.

Os hidrogramas de escoamento de entrada e saída são distintos nestes dois tipos de bacia.

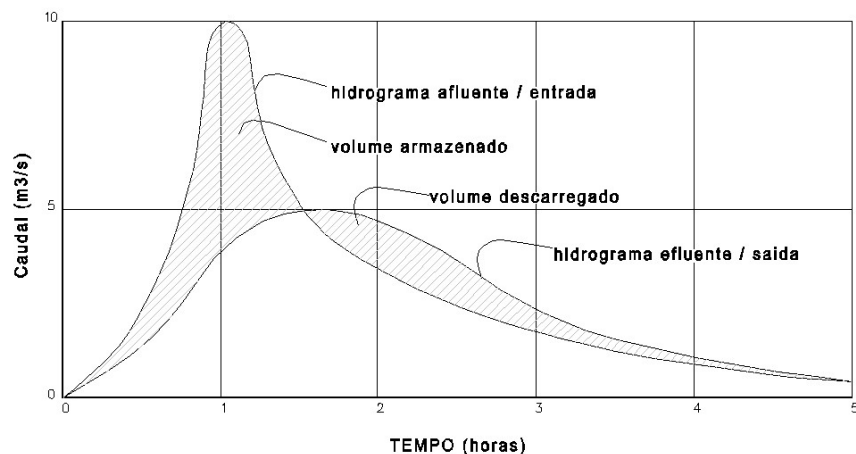


Fig.5.8-Hidrograma do escoamento afluyente e efluente de uma bacia em série (JAE 1998)

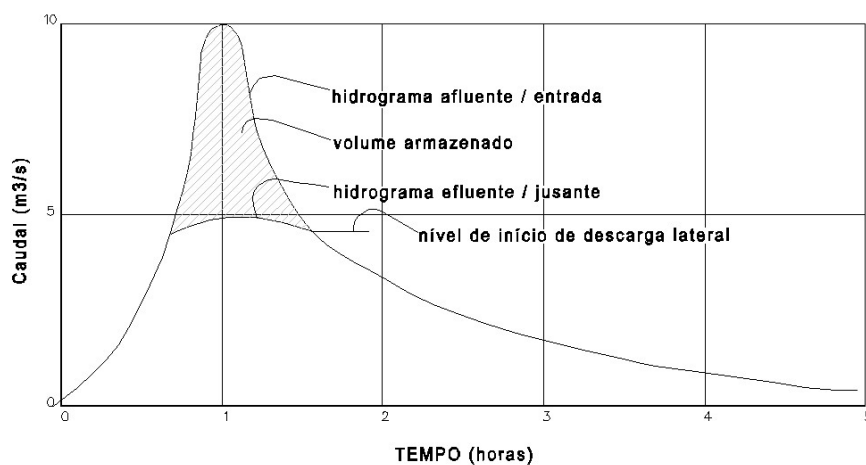


Fig.5.9-Hidrograma do escoamento afluyente e efluente de uma bacia em paralelo (JAE 1998)

5.3.2 Bacias a céu aberto e enterradas

As bacias a céu aberto são, geralmente, construídas em terra, com taludes reforçados ou diques de protecção lateral. Podem resultar da simples intercepção de uma linha de água em local de fisiografia favorável, através de uma pequena barragem ou açude, ou de zonas em depressão natural com solos de características adequadas.

Estão, frequentemente, ligadas a preocupações de integração paisagística e de valorização de áreas de lazer e tempos livres.

Podem ser em série ou em paralelo.

Quando não é possível recorrer a bacias a céu aberto, fundamentalmente, por indisponibilidade de terreno em áreas urbanas densamente ocupadas, ou onde o seu custo for elevado, usam-se as bacias enterradas.



Estas são estruturas, normalmente, construídas em betão, situadas abaixo do nível do solo que, por isso, tornam, praticamente indispensável o recurso a sistemas de bombagem para esvaziamento da bacia, após o período de chuvada.

Fig.5.10-Bacia de retenção enterrada – França (Renaudie 2005)

Podem estar subjacentes a áreas públicas, como parques de estacionamento ou zonas ajardinadas. São, em geral, bacias colocadas em paralelo.

5.3.3 Bacias a seco e com nível de água permanente

As bacias a seco são aquelas que permanecem com água apenas num período relativamente curto que sucede ao acontecimento pluviométrico (duração máxima da ordem de alguns dias).



Fig.5.11-Perfil Transversal de uma bacia a seco



Fig.5.12-Bacias de retenção a seco acessíveis ao público

(a) França (Renaudie 2005)



(b) França (Renaudie 2005)



Fig.5.13- Bacias de retenção a seco não acessíveis ao público
(a)Thilley-França
(Renaudie 2005)

(b)Thilley-França
(Renaudie 2005)

Ao contrário, as bacias com nível de água permanente são concebidas para terem sempre água, mesmo em períodos secos de longa duração.

Este tipo de solução implica custos de investimento e de exploração mais elevados, comparativamente com as bacias a seco, e está condicionada a uma alimentação de água por parte do aquífero subjacente.

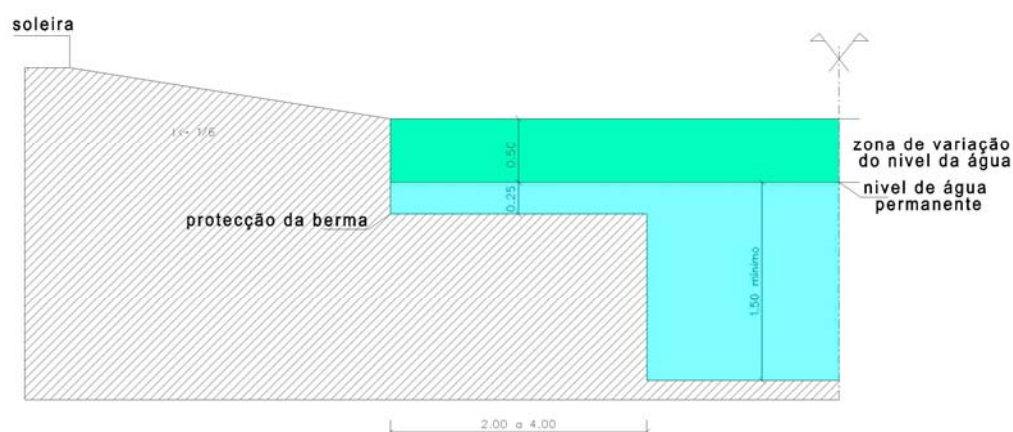


Fig.5.14-Perfil transversal de uma bacia com nível de água permanente



Fig.5.15-Bacia com nível de água permanente – Parc de la Courneuve, França (Renaudie 2005)

5.4 Escolha da bacia

5.4.1 Condicionantes da escolha

A escolha do tipo de bacia de retenção, entre “seca” e de “nível de água permanente” depende de vários factores, nomeadamente, o tipo de integração paisagístico que se pretende obter, o volume de armazenamento necessário, acessibilidades, custos, etc., mas existem condicionantes fundamentais, essencialmente referentes às características geológicas e hidrogeológicas do solo onde se pretende a sua instalação e das variações do nível freático local.

Para implantação de uma bacia seca é condicionante o nível máximo atingido pela toalha freática em períodos de chuva, o qual se deve encontrar abaixo da cota do fundo da bacia. Se o nível atingir esta cota corre-se o risco de criação de zonas pantanosas, com os inconvenientes resultantes da proliferação de insectos.

Um caso particular de bacias secas, são as designadas bacias de infiltração, cujo escoamento ocorre, como o próprio nome indica, por infiltração, através do fundo, das bermas ou dos taludes laterais da bacia.

A implantação deste tipo específico de bacias é aconselhável em situações onde não exista meio receptor ou a sua capacidade for bastante reduzida e quando os solos apresentem grande permeabilidade.

Na presença de meios aquíferos com potencialidades de exploração ou em zonas de captação de água para consumo humano, cuja qualidade deve ser preservada, é desaconselhável o uso deste tipo de bacias, de forma a evitar a contaminação da mesma.

Pelo contrário, no caso de se pretender a existência permanente de água, o nível freático em tempo seco deve situar-se a uma cota superior ao fundo da bacia, tendo, no entanto, em consideração o balanço entre as influências (escoamento superficial afluente, alimentação da toalha freática, fontes, etc) e efluências do escoamento (evaporação, infiltração, escoamento para jusante), por forma a garantir-se de facto a existência de um nível de água permanente e satisfatório sob o ponto de vista quantitativo e qualitativo.

Alternativamente, poderá ser necessário dispor de uma bacia com fundo impermeável, natural ou artificialmente.



Fig.5.16-Bacia de retenção com fundo e bermas impermeáveis – França (STU 1994)

Nos casos excepcionais, de bacias com fundo e bermas impermeáveis, criadas independentemente do nível freático e alimentadas exclusivamente pelas águas pluviais, deve dar-se particular atenção à contabilização das perdas por evaporação e ao teor em oxigénio dissolvido.

Bacias deste tipo não devem ser executadas sem se tomarem as devidas precauções, prevendo-se dispositivos eficazes de protecção e, eventualmente, meios artificiais de arejamento ou mesmo alimentação em período seco.

As bacias com presença de água permanente são, devido à sua natureza atractiva, melhor recebidas pelo público, comparativamente com as bacias secas. Estas são consideradas buracos no solo, como zonas mortas e inanimadas.

Quando as condições hidrogeológicas e de nível freático não forem satisfeitas, para um destes tipo de bacia, a localização previamente definida deve ser ponderada, estudando-se alternativas de instalação mais favoráveis.

5.5 Disposições técnicas

Conforme o tipo de bacia escolhida, será necessário garantir alguns aspectos na sua forma e concepção, para garantir maior eficiência e segurança do seu funcionamento.

5.5.1 Bacias secas

- a) inclinação do fundo - $\geq 5\%$ (para evitar zonas pantanosas)
- b) inclinação das bermas - $\leq 1/6$ em bacias acessíveis ao público
- $\leq 1/2$ em bacias não acessíveis ao público

5.5.2 Bacia com nível de água permanente

- a) altura permanente de água em tempo seco – 1,5 metros (para evitar o desenvolvimento de plantas aquáticas e garantir a vida piscícola, que é importante para a estabilidade do equilíbrio ecológico no ecossistema formado pela bacia).

No caso da bacia se situar numa zona acessível ao público, será, ainda, necessário assegurar:

- b) uma variação do nível de água, com limite de 0,5 metros, para a precipitação do período de retorno escolhido;
- c) o tratamento convenientemente das bermas:
 - talude relvado de pequena inclinação no corpo da bacia;

- paramento vertical de 0,75m ao longo do qual se manifestam as flutuações do nível da água e que é, usualmente, construído em material rígido (betão) ou semi-flexível (gabiões), envolvendo a periferia da bacia;
- passadeira horizontal de 2 a 4m de largura, no topo do paramento vertical, concebida, fundamentalmente, por razões de segurança e protecção.

5.6 Fases do projecto

A necessidade de garantir as condicionantes descritas implica que o projecto de bacias de retenção seja elaborado de acordo com as seguintes etapas sequenciais.

✓ 1ª - Estudos e recolha de dados

- Estudo hidrológico, hidráulico e hidrogeológico

O estudo hidrológico/hidráulico tem como finalidade principal o conhecimento dos caudais afluentes e caudais de estiagem do meio receptor, situação e flutuação do lençol freático, e do funcionamento global do sistema de drenagem.

- Caracterização do meio receptor e rede de drenagem

A caracterização do meio receptor – objectivos de qualidade, caudais de estiagem, indicadores do estado físico, biológico e ecológico – permitirá identificar os débitos de chegada de água tolerados e os níveis admissíveis de qualidade das descargas de águas pluviais.

- Conhecimento da rede de drenagem

O conhecimento da localização e capacidade dos colectores existentes permitirá definir qual o papel da bacia de retenção nessa rede de drenagem - se em série ou paralelo, e também, a sua posição relativamente à zona de risco – se a montante ou a jusante.

✓ 2ª - Identificação preliminar dos locais potenciais de implantação

A identificação preliminar de locais potenciais de implantação das bacias de retenção pressupõe a conjugação dos aspectos técnicos definidos nas etapas anteriores com outros, não menos importantes, de natureza ambiental, integração paisagística e exequibilidade sócio-económica.

A análise de viabilidade de execução e de precisão do tipo de bacia a implantar nos locais definidos preliminarmente deve ser complementada com dados mais detalhados,

nomeadamente: topográficos, geológicos e geotécnicos, pedológicos e outros de natureza sociológica e patrimonial.

✓ **3ª - Dimensionamento hidráulico**

Depois de feita a opção relativamente ao tipo de bacia, em função dos objectivos e análise de dados, poderá iniciar-se a 1ª fase do dimensionamento hidráulico, que consiste em estimar o volume necessário da retenção, associado à precipitação de determinado período de retorno, por forma a restituir a jusante um caudal que não ultrapasse um valor pré-definido.

✓ **4ª - Dimensionamento da secção e forma da bacia**

O conhecimento do volume necessário à retenção permitirá definir a secção e forma da bacia de acordo com o espaço disponível e demais condicionantes pré-estabelecidos.

CAPÍTULO 6

6. AS BACIAS DE RETENÇÃO EM ZONAS URBANAS – PROBLEMAS ESPECÍFICOS

6.1 Generalidades

O meio onde se inserem as bacias de retenção influencia o seu acondicionamento.

Os factores que devem ser considerados na implantação e execução das bacias de retenção, assim como os seus efeitos no ambiente, variam conforme se trate de meio rural, urbano ou peri-urbano.

Na verdade, os critérios sociais, arquitectónicos e naturais determinam várias orientações relativas à sua disposição.



Fig 6.1-Bacia de retenção em meio peri-urbano (EPA, Abril 2002)

Contrariamente às bacias localizadas em meio rural, inseridas num contexto que se poderá designar por “normal”, as bacias em zonas urbanas, situam-se num ambiente rígido e artificial, particularmente constrangido, provocado pela presença das edificações e infra-estruturas.

Estas especificidades, acrescidas de outras inerentes a estes espaços e não menos importantes, como sejam a presença e circulação de pessoas, e a existência simultânea de diferentes habitats (habitação, serviços e não raras vezes indústrias) e os custos do terreno determinam o local e as condições a adoptar na implantação da bacia.

As características da bacia (seca ou com nível de água permanente), integração paisagística, vegetação, etc devem ter em conta a confrontação destas diferentes vivências.

A implantação das bacias de retenção nas zonas urbanas apresenta, assim, alguns problemas específicos, nomeadamente:

- necessidade de espaço, que normalmente escasseia nas cidades já consolidadas;
- pelo facto deste tipo de infra-estrutura ocupar áreas consideráveis, a sua concepção e implementação deve ser estudada em simultâneo com o planeamento do território (nem sempre possível no caso de situações existentes);
- exigência de manutenção cuidada e mais frequente (dispositivos de limpeza);
- custos do terreno e especulação imobiliária;
- tipo de vegetação;
- dispositivos de vedação e segurança.

6.2 Questão da integração paisagística das bacias a céu aberto

As bacias a céu aberto constituem um elemento importante na paisagem, principalmente quando inseridas no meio urbano.



Fig 6.2-Bacia de retenção em meio urbano - Orgement, França (Renaudie 2005)

Dependendo da sua dimensão e características (tamanho, nível de água, etc) pode não ser possível integrá-las em espaços de lazer ou em infraestruturas de valorização do ambiente. Neste caso, constituirão elementos de perturbação; então será necessário prever meios de segurança e formas que permitam a fluidez e continuidade do equilíbrio do tecido do território.

De todo o modo, quaisquer que sejam as suas características deverão ser sempre objecto de estudo arquitectónico e paisagístico de forma a constituírem espaços de lazer atractivos. Assim sendo, e em consequência, os problemas associados serão solucionados.

A integração na paisagem, na topografia do terreno tem que ser cuidada de forma a não impedir o desenvolvimento adequado dos aglomerados urbanos.

CAPÍTULO 7

7. EVENTUALIDADE DO RE-APROVEITAMENTO DA ÁGUA. DESPOLUIÇÃO DOS EFLUENTES PLUVIAIS URBANOS

7.1 Introdução

Pressupondo que estamos perante um sistema separativo, as bacias de retenção são dimensionadas apenas para armazenar águas pluviais.

Apesar disso, e contrariamente ao conceito tradicional, as águas pluviais são poluídas, essencialmente, devido à acção erosiva do solo e da “lavagem” das superfícies impermeabilizadas ou terraplenadas, com preponderância nas que resultam das primeiras chuvadas.

Se não forem tomadas medidas no sentido de remover o excesso de poluentes antes do escoamento pluvial atingir as linhas de água, os efeitos adversos serão consideráveis.

7.2.Elementos constituintes da água residual e os seus inconvenientes

São diversas as origens dos poluentes constituintes da água pluvial, mas têm um papel relevante no agravamento da poluição os escorrimentos provenientes das áreas urbanas, das estradas e das actividades industriais e agrícolas.

De uma forma geral, a água residual (água pluvial poluída) pode ser constituída por:

- matéria mineral sólida decantável (argilas em suspensão coloidal, areias, etc.);
- matéria orgânica decantável ou não, cujo processo de decomposição implica consumo de oxigénio dissolvido, que é quantificado pela demanda bioquímica de oxigénio (DBO₅);
- sais minerais dissolvidos;
- óleos;
- gorduras;
- hidrocarbonetos;
- eventuais elementos tóxicos ;
- corpos flutuantes de maior ou menor dimensão;
- vírus e bactérias patogénicas.

Estes elementos apresentam efeitos negativos consideráveis:

- o principal inconveniente da matéria orgânica é a diminuição da secção dos colectores devido à sua possível deposição. Note-se que, a partir de velocidades da ordem dos 0,3m/s poderá ocorrer deposição das argilas, sendo que para as areias essa possibilidade verificar-se-á para velocidades a partir de 0,6m/s.

Acresce, ainda, o facto dos sólidos em suspensão contribuírem para a turbidez da água, produzindo uma imagem e efeito desagradável, principalmente, quando se verifica em bacias com fins turísticos e/ou recreativos.

- a decomposição da matéria orgânica consome oxigénio a par da demanda em oxigénio das plantas aquáticas (no período nocturno) e dos animais aquáticos (moluscos, insectos e peixes).

Este cenário de desoxigenação é particularmente prejudicial aos peixes, uma vez que apresentam sensibilidade ao défice de oxigénio, podendo mesmo morrer.

Além disso, as condições de vida anaeróbica originam a formação de sulfídrico que provoca um odor desagradável.

- os metais pesados são, entre os elementos dissolvidos, os mais significativos, principalmente o zinco e o chumbo. Apesar de não terem uma contribuição significativa a curto prazo, representam um inconveniente quando se acumulam no fundo, ajudando à toxicidade das espécies vivas.

- os óleos e hidrocarbonetos, bem como a matéria sólida que flutua à superfície, apresentam como principal inconveniente o aspecto estético desagradável que dão à superfície.

- podem ainda ocorrer danos biológicos, como sejam a contaminação da toalha freática pelos germes patogénicos, a proliferação dos mosquitos junto às bermas nas zonas mais paradas e o aparecimento de ratos que sobem as bermas e invadem os colectores.

7.3 O papel das bacias de retenção na despoluição das águas pluviais

Inicialmente as bacias de retenção eram usadas apenas para controlar o escoamento e a quantidade de água afluente. Actualmente, contribuem, também, para a despoluição das águas pluviais.

7.3.1 Mecanismos de despoluição

As bacias de retenção melhoram, significativamente, a qualidade das águas pluviais, através de transformações de natureza física, química e microbiológica que ocorrem no seu interior.

7.3.1.1 Processo Físico

A sedimentação dos sólidos em suspensão, e a consequente diminuição da turbidez da água constitui o principal efeito de ordem física.

Este efeito pode, contudo, ser afectado se as características da água favorecerem o crescimento intenso de algas.

7.3.1.2 Processo Químico

O aumento do teor em oxigénio dissolvido é conseguido à custa da difusão do oxigénio da atmosfera e, principalmente, pela actividade fotossintética das espécies vegetais. Ao fim de algum tempo de armazenamento, a actividade bacteriana de biodegradação diminui, significativamente, a demanda bioquímica de oxigénio.

Também neste caso as algas, através da sua decomposição, podem contrariar este benefício.

7.3.1.3 Processo microbiológico

O armazenamento da água contribui para a diminuição do número de coliformes, através da sedimentação e de uma série de condições nomeadamente, a temperatura da água, alterações químicas, a competição biológica, o consumo de bactérias por certos organismos como protozoários microscópicos e a acção microbicida da luz solar nas camadas superiores de retenção.

7.4 Dinâmica dos poluentes na bacia de retenção

✓ O assentamento e deposição dos sólidos suspensos ocorrem devido à diminuição de velocidade da entrada da água provocada pela resistência hidráulica da vegetação e do solo existentes na bacia de retenção. Dependem, contudo, de diversos factores, nomeadamente pelo tamanho dos sedimentos, regime hidrológico, velocidade de escoamento, tempo de retenção e frequência da precipitação.

✓ Os nutrientes são removidos, libertados e transformados nas bacias de retenção através de vários mecanismos (*Nichols, 1983; Nixon and Lee, 1985; Mitsch and Gosselink, 1986*). No caso particular do fósforo, a remoção verifica-se por sedimentação. De acordo com *Richardson e al, 1978*, significativas quantidades de fósforo dissolvido podem ser removidas pela vegetação na estação de crescimento, no entanto, também podem ser libertadas na época de decadência das plantas.

Atendendo a *Lee e al, 1975*, o fósforo dissolvido pode participar nos fenómenos de precipitação, adsorção e outras complexas reacções.

✓ Os metais pesados constituintes do escoamento superficial urbano ocorrem de forma solúvel e outras formas particulares.

Nas bacias de retenção, a precipitação, troca de iões e remoção através das plantas constitui o principal mecanismo de eliminação destes metais solúveis, como é o caso do zinco.

Outros metais, como o chumbo, tende a ser adsorvido aos sedimentos e outras partículas sendo, deste modo, transportados juntamente com os sólidos. Quando a velocidade da água baixa acumulam-se nos sedimentos no fundo da bacia de retenção, podendo tornarem-se tóxicos para os peixes e outras vidas aquáticas no caso de fazerem parte da cadeia alimentar.

✓ Os coliformes fecais são um indicador da presença de organismos patogénicos na água. Segundo *Bott, 1973*, estes poluentes tendem a associar-se aos sedimentos e outras partículas. Deste modo, a concentração dos coliformes fecais na bacia de retenção pode ser reduzida através do assentamento físico das partículas, tal como nos sólidos.

Podem também ser eliminados quando submetidos a baixas temperaturas ou através das plantas.

7.5 Manutenção das bacias de retenção

Para que as bacias de retenção cumpram, eficazmente, as funções a que se destinam, nomeadamente a constituição de espaços de lazer e recreio e melhoramento da qualidade das águas pluviais, será imprescindível garantir a respectiva manutenção, que consistirá, basicamente, na realização das seguintes tarefas:

- Verificação e controle da afluência à bacia, de águas não pluviais (águas residuais domésticas ou industriais);
- Recolha frequente dos corpos sólidos flutuantes;
- Limpeza dos dispositivos do tipo desarenadores ou grelhas existentes a montante de acesso á bacia;
- Protecção, tratamento e limpeza das bermas e taludes;
- Controlo da qualidade das águas pluviais, no que se refere à turbidez e presença de óleos ou hidrocarbonetos e eventual realização de campanhas de medição periódicas de determinados elementos (sólidos em suspensão, oxigénio dissolvido, pH, carência bioquímica de oxigénio, etc);
- Verificação das condições de estabilidade e de estanquidade das bermas;
- Limpeza do canal de fundo.

O grau de tratamento e a frequência da sua realização dependem do nível de utilização da bacia, das características das águas que a alimentam e das disponibilidades técnicas e económicas.

7.6 Descrição sucinta de alguns aspectos do processo de monitorização

7.6.1 Objectivo da monitorização

A qualidade água precipitada tende a ser extremamente variável. A intensidade de precipitação varia frequentemente e de forma irregular. Estas variações afectam a quantidade de escoamento superficial, a proporção de poluentes largados e transportados, a deposição e suspensão de sedimentos e outros fenómenos que conjuntamente determinam a concentração e forma dos poluentes observados num dado local e num determinado momento. Também contribuem para esta variação, as diferenças verificadas no intervalo de tempo entre precipitações, a natureza imprevisível e de transição de certas

fontes ou mecanismos de poluição, como por exemplo, a actividade de construção, escoamento de terrenos agrícolas e lavagem de veículos. Como resultado a concentração de poluentes e outras características do escoamento pluvial superficial proveniente de áreas urbanas e industriais têm um potencial significado como fonte de poluição.

Atendendo ao carácter variável das características da água pluvial e ao efeito de despoluição que se pretende alcançar com a implantação das bacias de retenção, é conveniente que a jusante desta estrutura se proceda à monitorização do seu funcionamento.

A monitorização tem como objectivo a verificação e análise dos parâmetros obtidos e estudo da eficiência da bacia de retenção no melhoramento da qualidade da água.

Estes estudos são conduzidos para ajudar a responder às seguintes questões:

- Qual o grau do controle de poluição e de eficiência da qualidade que a bacia de retenção providencia em condições normais?
- Como é que a eficiência varia de poluente para poluente e com a variação da frequência e intensidade da precipitação?
- Como a eficiência evolui ao longo do tempo (se melhora, piora ou mantém-se)?

7.6.2 Desenvolvimento do programa de monitorização da qualidade da água pluvial

O principal desafio que se coloca na implantação de um programa de monitorização é a grande variação temporal e espacial do escoamento das águas pluviais e da concentração de poluentes.

A qualidade das águas pluviais num dado local varia consideravelmente, quer entre precipitações quer durante uma determinada precipitação, e um pequeno número de amostras não são suficientes para providenciar uma correcta indicação da qualidade das águas pluviais num dado sítio ou do efeito da bacia de retenção. Portanto, geralmente, é necessário um conjunto de amostras para caracterizar correctamente a qualidade da água pluvial num determinado local e a eficiência da bacia de retenção.

Obter um número elevado de amostras para responder com elevado nível de confiança a muitas das questões comuns em relação á eficiência das bacias de retenção é, em geral, caro e requer muito tempo.

Antes de iniciar o programa de monitorização é fundamental identificar os objectivos e definir prioridades tendo em conta os recursos disponíveis.

Um programa de monitorização mal definido pode originar conclusões e decisões erradas, resultando numa má administração e perda de recursos (tempo com pessoal, credibilidade, etc.).

O desenvolvimento e implantação do programa de monitorização, para avaliação da eficiência da estrutura de retenção, envolvem uma série de procedimentos que se podem agrupar em quatro fases:

- 1ª Fase - Determinar os objectivos do programa de monitorização
- 2ª Fase - Desenvolvimento do plano de motorização relativamente aos objectivos definidos
- 3ª Fase - Implementação do plano de motorização
- 4ª Fase - Avaliar e registar os resultados da monitorização

Cada uma destas fases engloba diversas actividades mais ou menos complexas, mas cujo conteúdo não se considera relevante no âmbito do presente trabalho. Referir-se-ão, apenas os aspectos relacionados com a análise dos poluentes, por se julgarem essenciais para melhor percepção do funcionamento das bacias de retenção na despoluição da água pluvial.

7.6.3 Consideração dos parâmetros de medição

Deve ser feita a análise e controle periódicos dos constituintes do escoamento superficial urbano, que dependendo da sua concentração, podem contribuir para a deterioração da qualidade da água e prejudicar as formas de vida que, directa ou indirectamente, dependem do seu uso.

O “Nationwide Urban Runoff Program (NURP)” adoptou os seguintes constituintes como poluentes tipo (EPA 1983):

- SSC: Concentração de sólidos suspensos
- BOD: Demanda bioquímica do oxigénio
- COD: Demanda química do oxigénio
- CU: Cobre
- Ph: Chumbo
- Zn: Zinco
- TP: Fósforo Total
- SP: Fósforo solúvel
- TKN: Nitrogénio “Kjeldahl” Total
- $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$: Nitrato + Nitrito

7.6.4 Importância do período de recolha e análise das amostras

O período em que se realizam as análises usadas na monitorização é de extrema importância, na medida em que existe a possibilidade de variação das características dos poluentes ao longo do tempo.

Por exemplo, pode não ser de grande utilidade para o estudo a observação e análise de alguns metais pesados, como é o caso do mercúrio, durante um período curto, quando o efeito deste constituinte é, geralmente, expressivo após longo tempo (depois da acumulação aos sedimentos).

Da mesma forma, alguns parâmetros como a temperatura, BOD, DO, pH, TSS e outros metais, podem ter impacto significativo quase de imediato ou num curto espaço de tempo.

Por esta razão, as amostras devem ser recolhidas em diferentes espaços de tempo e durante diferentes estações do ano.

Este procedimento permite avaliar o desempenho da retenção ao longo do tempo com a variação de determinados factores, como por exemplo o clima, e determinar o potencial impacto que um dado poluente terá no local de recepção da água, quando sujeitos a condições específicas.

No quadro seguinte apresentam-se alguns constituintes da água pluvial e os respectivos períodos relevantes de monitorização.

Quadro 7.1 – Escala do tempo para análise versus constituinte da água pluvial (EPA,2002)

Escala de tempo para análise	Elemento constituinte da água
Prazo curto	BOD, DO
Prazo longo	Elementos orgânicos
Prazo curto e prazo longo	Matais, TSS, Nitrogénio, Fósforo, temperatura, pH e pesticidas

CAPÍTULO 8

8.APLICAÇÃO PRÁTICA

Pretende-se com o dimensionamento de situações existentes demonstrar a aplicabilidade dos resultados constatados nos estudos efectuados nos capítulos 3 e 4.

Para tal, analisaram-se duas bacias hidrográficas do Concelho da Maia, situadas na zona Nascente, próximo do limite com o Município de Valongo..



Fig.8.1-Localização geográfica das bacias hidrográficas

Para o cálculo do caudal usaram-se as fórmulas (3.6) e (3.7). No caso do volume recorreu-se às fórmulas (4.1) e (4.2) para a bacia homogénea e heterogénea respectivamente.

O caudal effluente foi calculado, em cada caso, para escoamento com secção cheia do aqueduto existente e corresponde ao máximo caudal que é possível escoar em função da carga a montante.

Bacia Hidrográfica A:

Esta bacia hidrográfica situa-se na Freguesia de São Pedro Fins, a nascente do Concelho no limite com o Município de Valongo. Tem uma forma alongada ($b/a \cong 0.25$) e uma área de 150325m^2 .

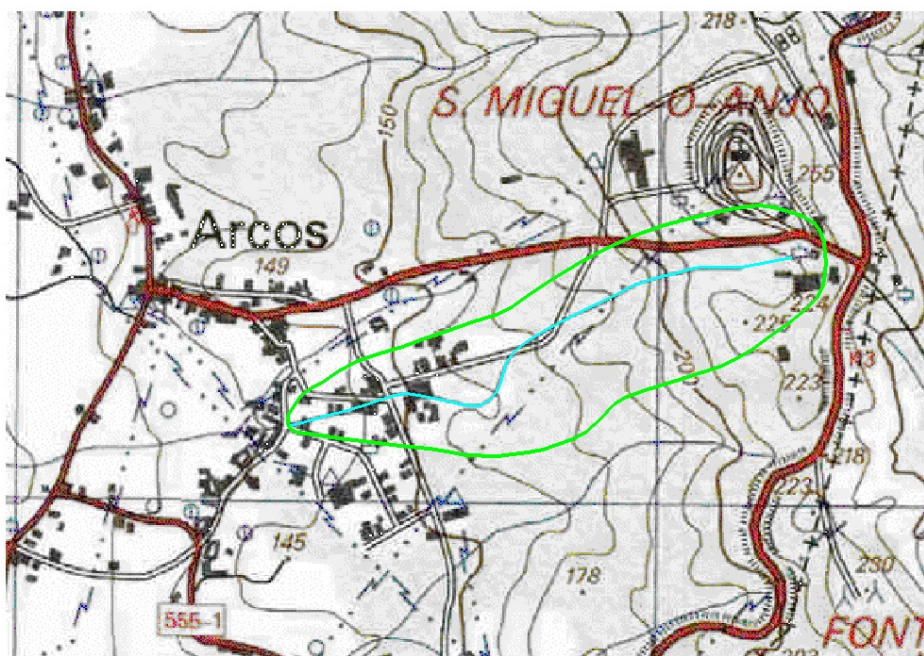


Fig.8.2-Delimitação da bacia hidrográfica da Bacia A

A linha de água principal tem 870m de comprimento e a PH existente uma secção de $0.70 \times 0.70\text{m}^2$ à qual corresponde um caudal máximo de 1.3 m/s.

Numa fase inicial apenas faziam parte da sua área algumas construções dispersas que não alteravam significativamente a permeabilidade da bacia hidrográfica. No final da década de oitenta foi construído um loteamento anexo à PH, impermeabilizando parcialmente a área ocupada.

Actualmente, a urbanização encontra-se quase toda ocupada com construções induzindo uma impermeabilização elevada do solo.



Fig.8.3-Crescimento da zona urbanizada

a) Planta topográfica anterior a 1991



b) Planta topográfica de 1991



c) Planta topográfica de 2006

- 1ª Fase - bacia no seu estado natural, sem áreas urbanizadas significativas (anterior a 1991)

⇒ Dados:

$$A_z = 0 \text{ m}^2$$

$$z = 0.00 \text{ m}$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.0$$

$$v_1 = 0.9 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0.0 \text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=870)} = 0.59 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=870) = 0.00 \text{ m}^3$$

- 2ª Fase – bacia com área impermeabilizada junto à PH (1991)

⇒ Dados:

$$A_z = 51\,223 \text{ m}^2 (\cong 34\% \text{ da área total})$$

$$z = 325.00 \text{ m} \cong 35\% L$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.5$$

$$v_1 = 0.9 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.6 \text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=325)} = 1.51 \text{ m}^3/\text{s} ; Q_{(x=870)} = 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=325) = 34.37 \text{ m}^3 ; V_a(x=870) = 0.00 \text{ m}^3$$

- 3ª Fase - bacia com área impermeabilizada junto à PH, mas com a urbanização mais densa (2006)

Relativamente à fase anterior, neste caso apenas altera o coeficiente de escoamento correspondente à área impermeabilizada C_2 que passa a ter o valor de 0.8.

⇒ Dados:

$$A_z = 51\,223 \text{ m}^2$$

$$z = 325.00 \text{ m}$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.8$$

$$v_1 = 0.9 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.6 \text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=325)} = 2.41 \text{ m}^3/\text{s}; Q_{(x=870)} = 1.42 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=325) = 184.42 \text{ m}^3; V_a(x=870) = 86.81 \text{ m}^3$$

Quadro 8.1 – Resumo dos resultados obtidos para a bacia A

Fase	Q (m ³ /s)		V _a (m ³)	
	(x = z = 325m) z ≅ 35% L	(x = L = 870m) z ≅ 35% L	(x = z = 325m) z ≅ 35% L	(x = L = 870m) z ≅ 35% L
1ª (anterior a 1991)	–	0.59	–	0.00
2ª (1991)	1.51	1.06	34.37	0.00
3ª (2006)	2.41	1.42	184.42	86.81

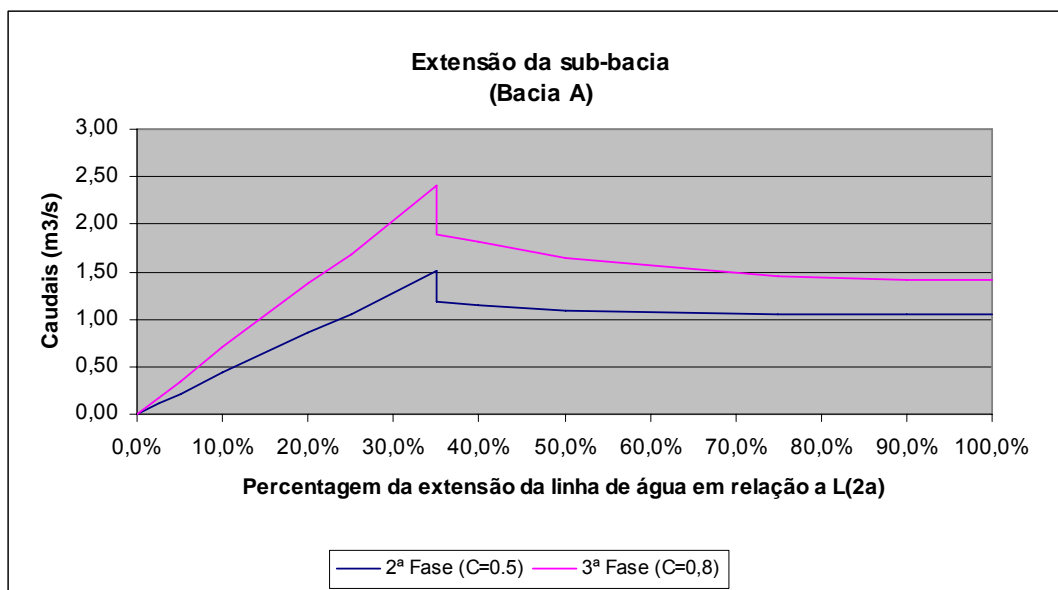


Fig.8.4—Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias (Bacia A)

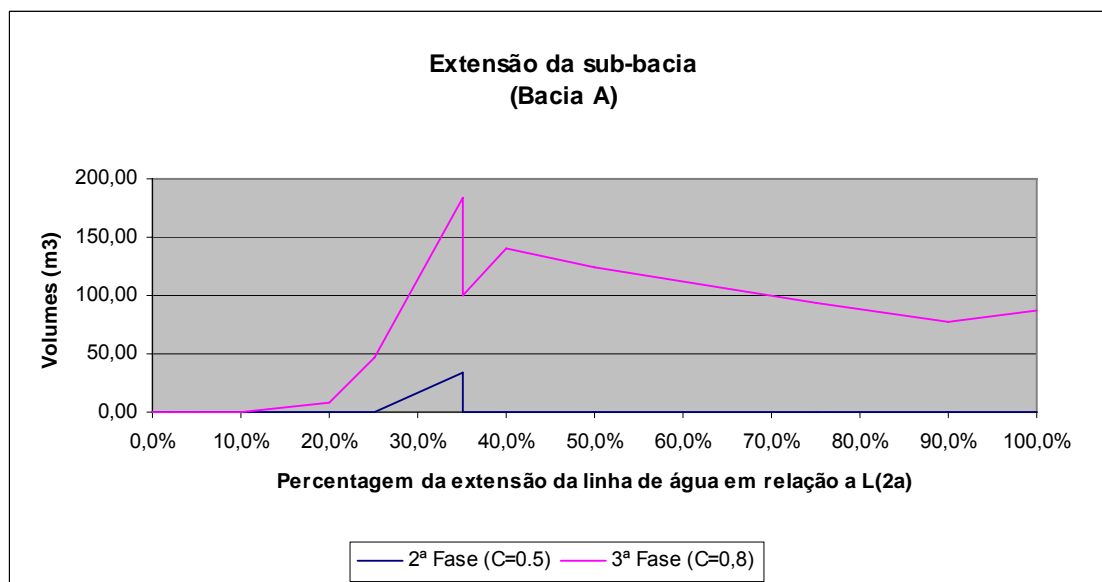


Fig.8.5—Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias (Bacia A)

Note-se que:

- Para as segundas e terceiras fases, quer para caudais como para os volumes, as situações mais desfavoráveis ocorrem para as chuvadas de duração correspondente ao tempo de concentração da sub-bacia impermeabilizada e, naturalmente, para a respectiva área (cerca de 35% da área total).

- O maior volume retido a montante, 184.42 m^3 , não é muito relevante, dado que as dimensões da PH são significativas face à relativa pequenez da bacia hidrográfica ($\cong 15$ há).

Esta situação pode facilmente agravar-se se existir uma obstrução parcial da PH ocasionada por corpos sólidos e detritos acumulados em chuvadas precedentes.

Se, por obstrução da conduta, a secção se reduzir à metade superior, o caudal efluente poderá ser diminuído para $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$, induzindo um V_a de 325.46 m^3 e 707.78 m^3 para $x=325 \text{ m}$ e $x=870 \text{ m}$ respectivamente.

Os resultados dos caudais obtidos permitem concluir que a sub-bacia correspondente à zona impermeabilizada junto à PH, origina um caudal maior do que a totalidade da bacia hidrográfica, logo o dimensionamento hidráulico terá que ser realizado atendendo a este valor.

O caudal afluente excede a capacidade da passagem hidráulica em ambas as situações de impermeabilização da zona urbanizada, verificando-se a existência de volume acumulado.

À semelhança dos caudais, o valor mais desfavorável para o volume acumulado, verifica-se para a sub-bacia já referida, para o qual será dimensionada a estrutura de retenção.

Solução a adoptar:

Para evitar a ocorrência de inundações poderá recorrer-se à implantação de uma bacia de retenção que, no caso presente devido por falta de espaço a montante da PH, terá que ser enterrada.

Bacia Hidrográfica B:

A bacia B localiza-se um pouco mais a sul, também na freguesia de São Pedro Fins. Tem uma forma aproximadamente circular ($b/a \cong 1.00$) e uma área de $70\,685\text{m}^2$.

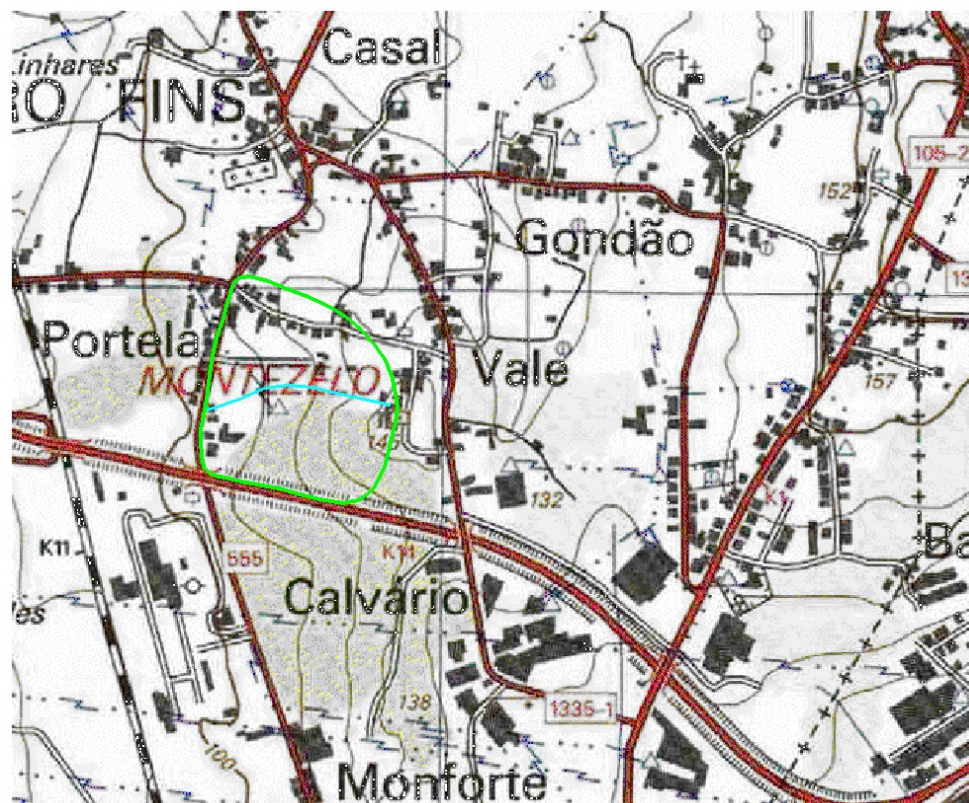
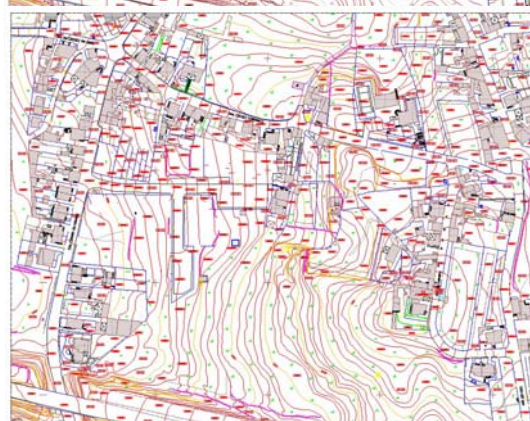
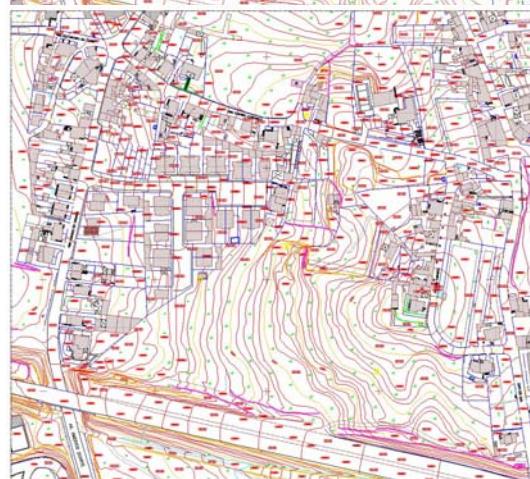


Fig.8.6-Delimitação da bacia hidrográfica B

A linha de água principal tem o comprimento de 300m e a PH está executada com uma secção circular de 500mm de diâmetro correspondendo-lhe um caudal de saída de $0.31\text{m}^3/\text{s}$.

Do mesmo modo que a bacia A, numa primeira fase as construções existentes na bacia não condicionaram a sua característica de permeabilidade.

No ano de 1995 foi construído um loteamento na zona adjacente à PH impermeabilizando parcialmente a área ocupada, situação que foi progressivamente agravada com o aumento das respectivas construções.

**Fig.8.7-Crescimento da zona urbanizada****a) Planta topográfica (anterior a 1995)****b) Planta topográfica (1995)****c) Planta topográfica (2006)**

- 1ª Fase - bacia no seu estado natural, sem áreas urbanizadas significativas (anterior a 1991)

⇒ Dados:

$$A_z = 6\,015\text{m}^2$$

$$z = 42.00\text{ m}$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.5$$

$$v_1 = 0.9\text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.6\text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=42)} = 0.20\text{ m}^3/\text{s}; Q_{(x=300)} = 0.72\text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=42) = 0.00\text{ m}^3; V_a(x=300) = 249.32\text{ m}^3$$

- 2ª Fase – bacia com área impermeabilizada junto à PH (1991)

⇒ Dados:

$$A_z = 54\,214\text{ m}^2$$

$$z = 215.00\text{ m}$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.4$$

$$v_1 = 0.9\text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.6\text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=215)} = 1.45\text{ m}^3/\text{s}; Q_{(x=300)} = 1.41\text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=215) = 154.02\text{ m}^3; V_a(x=300) = 195.07\text{ m}^3$$

- 3ª Fase - bacia com área impermeabilizada junto à PH, mas com a urbanização mais densa (2006)

Relativamente à fase anterior, neste caso apenas altera o coeficiente de escoamento correspondente à área impermeabilizada C_2 que passa a ter o valor de 0.8.

⇒ Dados:

$$A_z = 54\,214 \text{ m}^2$$

$$z = 215.00 \text{ m}$$

$$C_1 = 0.2$$

$$C_2 = 0.65$$

$$v_1 = 0.9 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.6 \text{ m/s}$$

⇒ Resultados:

$$Q_{(x=215)} = 2.36 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{(x=300)} = 2.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_a(x=215) = 276.38 \text{ m}^3; \quad V_a(x=300) = 330.71 \text{ m}^3$$

Quadro 8.2 –Resumo dos resultados obtidos para a bacia B

Fase	Q (m ³ /s)		V _a (m ³)	
	(x = z) ^(a)	(x = L = 300m)	(x = z) ^(a)	(x = L = 300m)
1ª (anterior a 1991)	0.20	0.72	0.00	101.30
2ª (1991)	1.45	1.41	154.02	195.07
3ª (2006)	2.36	2.18	276.38	330.71

(a) $z=42\text{m} \cong 15\% L$ na 1ª Fase e $z=215\text{m} \cong 75\% L$ nas 2ª e 3ª fases

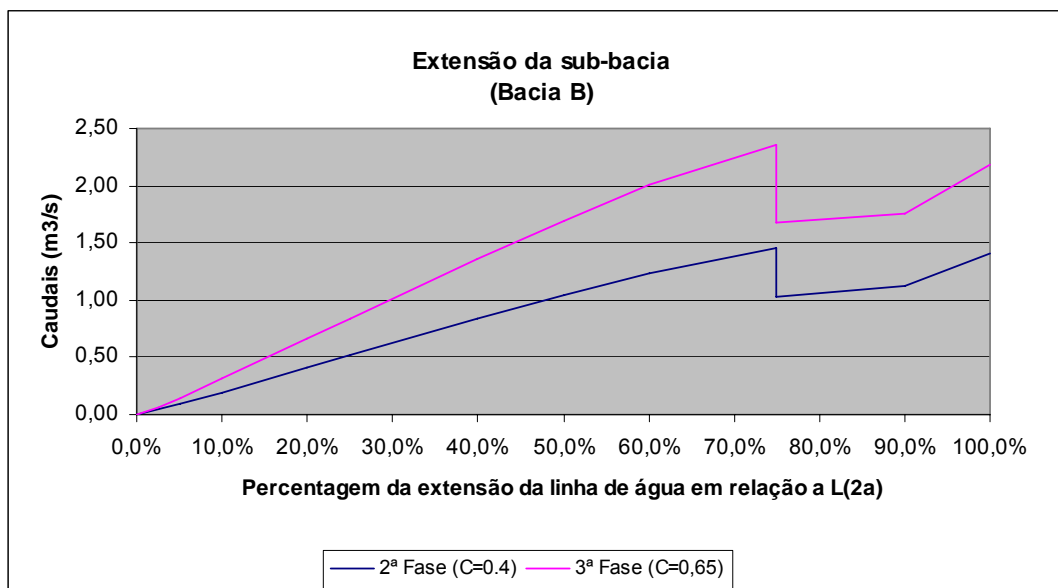


Fig.8.8—Valores dos caudais obtidos nas sub-bacias (Bacia B)

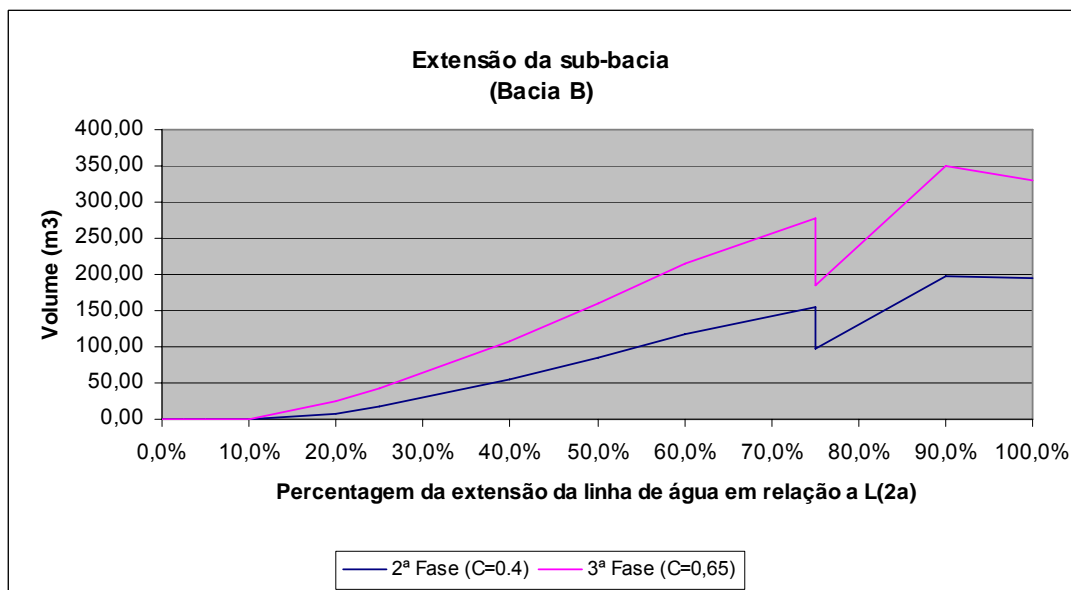


Fig.8.9—Valores dos volumes obtidos nas sub-bacias (Bacia B)

Note-se que:

- Para as segundas e terceiras fases, os caudais mais desfavoráveis ocorrem para as chuvadas de duração correspondente ao tempo de concentração da sub-bacia impermeabilizada e, naturalmente, para a respectiva área (cerca de 35% da área total).

- No caso dos volumes, este facto não se verifica. No entanto a situação mais desfavorável não ocorre para a totalidade da bacia hidrográfica, mas sim para outra sub-bacia com comprimento igual a 90% L., conforme se verifica no gráfico da Fig.8.9.

Em todas as fases calculadas a capacidade da passagem hidráulica é excedida verificando-se volume acumulado a montante da mesma.

Do mesmo modo que a Bacia anterior, esta situação facilmente se agravará se existir obstrução parcial da PH provocada por detritos acumulados em chuvadas precedentes.

Se, por obstrução da conduta, a secção se reduzir à metade superior, o caudal efluente poderá ser diminuído para $0.05\text{m}^3/\text{s}$, induzindo um V_a de 311.40 m^3 e 376.76 para $x=215\text{m}$ e $x=300\text{m}$ respectivamente.

Os resultados dos caudais obtidos permitem concluir que a sub-bacia correspondente à zona impermeabilizada junto à PH, origina um caudal maior do que a totalidade da bacia hidrográfica, logo o dimensionamento hidráulico terá que ser realizado atendendo a este valor.

O caudal afluente excede a capacidade da passagem hidráulica em ambas as situações de impermeabilização da zona urbanizada, verificando-se a existência de volume acumulado.

Solução a adoptar:

Também nesta situação o problema da incapacidade da passagem hidráulica poderá ser solucionado com a execução de uma bacia de retenção imediatamente a montante do arruamento. Poderá adoptar-se uma bacia em paralelo e a céu aberto.

CAPÍTULO 9

9. CONCLUSÃO

O escoamento superficial, mais precisamente a sua quantidade, qualidade e origem, constituem a questão principal da drenagem urbana.

O crescimento progressivo das cidades e consequente impermeabilização do solo alteram consideravelmente este escoamento, agravando os caudais gerados na bacia hidrográfica.

Este facto é consequência directa das práticas de planeamento, uso do solo e de drenagem habitualmente usadas em Portugal, mas já há muito ultrapassadas noutros países como França, Canadá ou Estados Unidos.

O inevitável aumento dos caudais tem como resultado a ocorrência de cheias com consequências trágicas e perdas elevadas, nomeadamente em vidas humanas.

No caso de bacias hidrográficas heterogéneas, mais urbanizadas junto à PH, este aumento implica o aparecimento de sub-bacias cuja área origina caudais mais agravados do que a totalidade da área da bacia hidrográfica em que se inserem.

Este efeito é reflectido nos volumes retidos de uma forma ainda mais acentuada.

Em face destas constatações, e para o tipo de bacias hidrográficas consideradas, conclui-se que, de um modo geral, os cálculos hidrológicos usados para dimensionamento dos órgãos de drenagem poderão não estar correctos, uma vez que raramente os caudais mais desfavoráveis acontecem quando toda a área da bacia hidrográfica está a contribuir para o escoamento final.

Uma das soluções possíveis para evitar as cheias será a utilização de bacias de retenção, como forma de diluir os caudais, aproveitando simultaneamente as suas mais valias acrescidas, nomeadamente a reutilização da água retida para outros fins, como sejam rega ou lavagem de espaços públicos, prioritariamente em períodos de escassez de água.

Assim, no processo de drenagem em zonas urbanas, importa considerar os seguintes aspectos:

- planear as cidades tendo presente a importância da água e do escoamento superficial;
- implantar soluções e medidas sustentáveis que contribuam para a diminuição do escoamento superficial e a sua diluição no tempo;

- adoptar estruturas de retenção de água, não só com o objectivo de evitar as cheias mas, também, como forma de armazenar a água para outros fins contribuindo para o equilíbrio do meio ambiente.
- no dimensionamento de órgãos de drenagem ou estruturas de retenção, no caso de bacias heterogéneas, deve ter-se em consideração os caudais gerados pelas sub-bacias urbanizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, Maria Rafaela Pinto (1983) – “Contribuição para o estudo da drenagem de águas pluviais em zonas urbanas”. Volume 1 e 2 S.290, LNEC. Lisboa, Portugal.
- ASCE (1983) – “Design and construction of urban stormwater management systems”. EUA.
- BARBOSA, Ana Celeste; LEITÃO, Teresa Eira (2000) – “As estradas e os recursos hídricos: Necessidades de novas tecnologias” 1ª Congresso Rodoviário Português. Portugal.
- BERNARDINO, Rita; RODRIGUES, Susana; RAFAEL, Maria Teresa; ALVES, Maria Helena (2000) – “Análise comparativa da qualidade ecológica das águas superficiais nacionais tendo como base os planos da bacia hidrográfica.” Portugal.
- BOLETIM Nº16 LISBOA URBANISMO (2001)–“Estruturas ecológicas e componentes ambientais.” Lisboa, Portugal.
- CAMPANA, N; TUCCI, C.E.M. (1994) – “Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas” – Caderno de recursos hídricos. Brasil.
- COMITÉ ECOMÓMICO E SOCIAL EUROPEU (2004), Comunicação da comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das regiões – “Gestão dos riscos de inundação, protecção contra as cheias e inundações, sua prevenção e mitigação.” Portugal.
- COSTA, E.Sousa; GONÇALVES, Ivone^(**) – “A regularização fluvial e o domínio hídrico.” Portugal.

(*) Referência não consultada directamente

(**) Referência de data desconhecida

- DAVIS, Allen P.; SHOKUHAN, Mohammad; NI, Shubei (2001) – “Loading estimation of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources”. Pergamon, Maryland, EUA.
- DECRETO Regulamentar N°23/95 de 23 de Agosto (1995): “Regulamento Geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de águas e de drenagem de águas”. Portugal.
- FHWA ^(**) – Federal Highway Administration (Environmental Technology Brie) : “Is highway runoff a serious problem?” EUA.
- FCTH (Fundação do Centro Tecnológico de Hidráulica) (1999) – “Directrizes básicas para projectos de drenagem urbana no Município de São Paulo.” Prefeitura do Município de São Paulo, Brasil.
- FRANÇA, Adalberto Q.S. (2002) – Apontamentos da cadeira de Projecto de Estradas do Mestrado em Vias de Comunicação, FEUP, Portugal.
- GALVÃO, Ana Fonseca; VALÉRIO, Pedro Dinis; MATOS, José Saldanha (2000) – “Gestão integrada de águas pluviais em meio urbano – soluções de controlo na origem.” Lisboa, Portugal.
- JAE (1998) – “Manual de drenagem superficial em vias de comunicação”. Tomo 1, versão provisória. Junta Autónoma de Estradas. Direcção de serviços de projectos, Portugal.
- LENCASTRE, A; FRANCO, F.M.(1992) – “Lições de hidrologia.2 Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.
- LENCASTRE, Armando (1996) – “Hidráulica Geral”. Edição do Autor. Lisboa, Portugal.

(*) Referência não consultada directamente

(**) Referência de data desconhecida

- LEOPOLD, L.B (1968) – “ Hidrology for urban planning – A guide book on the hidrologic effects on urban land use”. USGS^(*)
- LUNDBERG, Karin; CARLING, Maria; LINDMARK, Per (1999) – Treatment of highway runoff: a study of three detention ponds. Elsevier, Suécia.
- MARH-Ministério do Ambiente e Recursos Hídricos (1990) – Manual de saneamento básico. Direcção Geral dos Recursos Naturais. Portugal.
- MATA-LIMA, Herlander; SILVA, Evaristo; RAMINHOS, Cristina (2006) – “Impactes de projectos de Engenharia Civil na hidrologia de bacias de drenagem. Como gerir o Excesso de escoamento.” Portugal.
- MATIAS, Gorete Barata (2006) – “ Bacias de retenção. Estudo de Métodos Dimensionamento. Dissertação apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre. Portugal.
- MARTINS, F.J.P (2004) – “Hidrologia de superfície, cálculo de caudais de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas” – Elementos de apoio à disciplina de hidrologia e sistemas de drenagem. Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Departamento de Engenharia Civil, Viseu. Portugal.
- MARTINS, F.J.P (2000) - “Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais”. Dissertação em hidráulica e recursos hídricos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Portugal.
- MATOS, R. (1999^a) - Controlo na origem de águas pluviais in curso: “ Estratégias para a reabilitação e beneficiação de sistemas públicos de drenagem de águas residuais” FUNDEC. Portugal^(*).

(*) Referência não consultada directamente

(**) Referência de data desconhecida

- MAYS, LARRY W.; D, PH; PE; PH (2001) - "Stormwater collection systems design handbook." Blacklick, OH, EUA.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES -Secretaria Nacional de saneamento ambiental (2003) – "A questão da drenagem urbana no Brasil – elementos para a formulação de uma política nacional de drenagem urbana." Brasil.
- N.Aires; MAH . Yerre; M.Chabanel ^(**) – "Dimensionnement hydraulique d'ouvrages de dépollution: influence des modes de représentation de la pluie." França.
- N.Aires; MAH . Yerre; M.Chabanel ^(**) – "Dépollution des effluents urbains de temps de pluies en bassins de stockage décantation." França.
- OLIVEIRA, Rodrigo (1996) – "Determinação de hidrogramas de cheia em pequenas bacias hidrográficas." Curso sobre drenagem de águas superficiais em vias de comunicação. LNEC, Portugal.
- PONTIER, H; WILLIAMS; MAY, E (2003) – "Progressive changes in water and sediment quality in wetland system for control of highway runoff." Elsivier, Inglaterra.
- PINTO, Luiza Helena; PINHEIRO, Sérgio Avelino (2006)– " Orientações básicas para drenagem urbana." Fundação estadual do meio ambiente. Belo Horizonte, Brasil.
- PORTELA, Maria Manuela; SILVA, Ana Teresa; MELIN, Carla Patrícia (2000) – "O efeito da ocupação urbana nos caudais de ponta de cheias naturais em pequenas bacias hidrográficas". 5º Congresso da água- A água e o desenvolvimento sustentável. Desafios para o novo século." Portugal.
- PORTELA, Maria; DIAS, Ana Teresa ^(**) – "Regionalização de caudais de cheia em Portugal Continental." Portugal.

(*) Referência não consultada directamente

(**) Referência de data desconhecida

- REINELT, Lorin E.; HORNER, Richard R. (1995) – “Pollutant removal from stormwater runoff by palustrine wetlands based on comprehensive budgets”. Elsevier, EUA.
- RENANDIE, Serge (2005) – “L’eau, element structurant de la trame urbaine, enjeu du renouvellement et de la valorisation du patrimoine urbain.” França.
- SOARES, Adelino M. Silva ^(**) – “Contribuição para o estudo de drenagem de águas pluviais em zonas urbanas” (Seminário 290). Portugal.
- TELES, Gonçalo Ribeiro (1998) – “Um novo desenho urbano”. Lisboa Urbanismo. Portugal.
- TENTÚGAL VALENTE, José; TOMÁS, Maria Teresa (2005) – Hidráulica urbana e ambiental – Apontamentos da cadeira da licenciatura em Engenharia Civil, FEUP, Portugal.
- TOMÁS, Maria Teresa (2005) – Sistemas de drenagem urbana – Apontamentos da cadeira da licenciatura em Engenharia Civil, FEUP, Portugal.
- TUCCI, Carlos E.M. (2003) -Drenagem Urbana, Porto Alegre. Brasil.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-EPA; AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS-ASCE (2005) – “Urban Stormwater BMP Performance Monitoring. A guidance manual for meeting the national stormwater BMP database requirements.” EUA.
- WILLIAM, F.Hunt (1999) – “Urban waterways/ urban stormwater structural best management Practices (BPMS).” College of agriculture and life Sciences. Department of Biological and Agricultural Engineering North Carolina State University. EUA.

(*) Referência não consultada directamente

(**) Referência de data desconhecida

SITES CONSULTADOS**Data**

http://www.agua.bio.br	12/1/2006
http://cienciacultura.php	12/1/2006
http://wwwcienciacultura.bus.br	12/1/2006
http://www-cm-maia.pt	05/4/2006
http://www.cosmo.br	14/1/2006
http://www.cpa-fac.embrapa.br	12/1/2006
http://www.daee.sp.gov.br	13/1/2006
http://www.dha.lnec.pt	12/1/2006
http://www.inag.pt	14/1/2006
http://paginas.terra.com.br	20/1/2006
http://www2.portoalegre.rs.gov.br	12/3/2006
http://www.serla.rj.gov.br	09/1/2006
http://ulisses.c.m.lisboa.pt	1 /3/2006

ANEXOS

Quadro 2– Valores do coeficiente de escoamento para áreas permeáveis em função do tipo do solo (classificação do SCS) e do declive.

Declive	Solo Tipo A	Solo Tipo B	Solo Tipo C	Solo Tipo D
plano < 1%	0,04 - 0,09	0,07 - 0,12	0,11 - 0,16	0,15 - 0,20
médio, de 1 a 6%	0,09 - 0,14	0,12 - 0,17	0,16 - 0,21	0,20 - 0,25
inclinado > 6%	0,13 - 0,18	0,18 - 0,24	0,23 - 0,31	0,28 - 0,38

em que:

Solo tipo A: Solo dando origem a um escoamento superficial muito baixo por apresentar permeabilidade muito elevada. Inclui, essencialmente, areias profundas com muito pouco limo ou argila e também *loess* profundo muito permeável.

Solo tipo B: Solo menos permeável do que o do tipo A dando origem a um escoamento superficial razoavelmente baixo. Inclui, essencialmente, solos arenosos menos profundos do que os de tipo A e *loess* menos profundo e menos agregado do que o do tipo A. Estes solos apresentam, no entanto, permeabilidade superior à média.

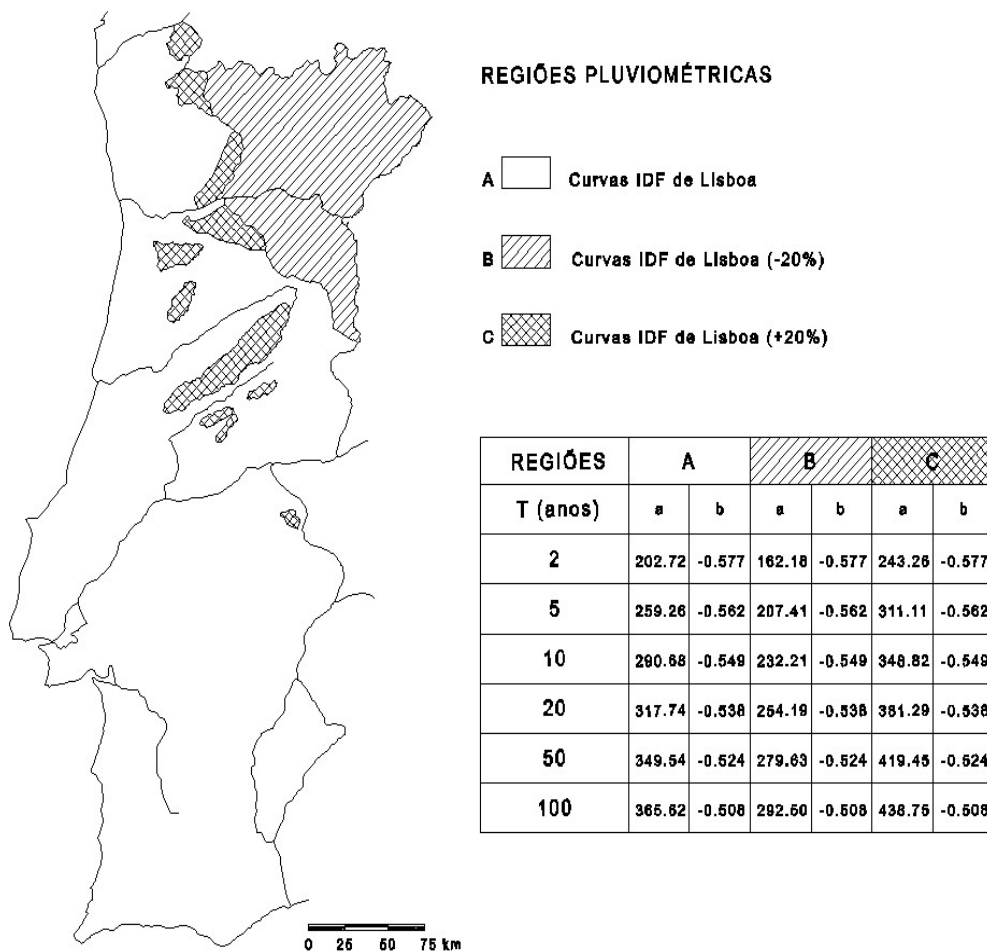
Solo tipo C: Solo dando origem a um escoamento superficial moderado, superior à média e superior a qualquer das situações anteriores. Inclui, essencialmente, solos pouco profundos e solos com quantidades apreciáveis de argila, se bem que menos do que os solos tipo D.

Solo tipo D: Solo dando origem a um escoamento superficial elevado por apresentar baixa permeabilidade. Inclui, essencialmente, argilas pouco expansivas e alguns solos pouco profundos com sub-horizontes quase impermeáveis.

**Quadro 3- Parâmetros a e b das curvas I-D-F para diversos postos udográficos nacionais
(Matos, M.R – métodos de análise e de cálculo de caudais pluviais em sistemas
de drenagem urbana – Tese de Especialista do LNEC, Fevereiro de 1987)**

POSTOS	T(Anos) →	2	5	10	20	50	100
LISBOA (1860-1983)	a	202,72	259,26	290,68	317,74	349,54	365,62
	b	-0,577	-0,562	-0,549	-0,538	-0,524	-0,508
BRAGANÇA	a	165,01	199,94	228,16	253,14	283,10	304,23
	b	-0,586	-0,575	-0,573	-0,571	-0,568	-0,566
VILA REAL	a	176,38	284,23	353,25	416,59	495,54	553,04
	b	-0,576	-0,619	-0,634	-0,644	-0,653	-0,658
PORTO	a	209,89	268,6	303,74	334,95	372,82	399,66
	b	-0,606	-0,613	-0,617	-0,619	-0,622	-0,624
PENHAS DOURADAS	a	134,52	170,81	205,95	239,52	282,55	314,54
	b	0,456	-0,415	-0,422	-0,429	-0,437	-0,442
VISEU	a	377,31	460,01	500,67	532,12	565,65	586,47
	b	-0,756	-0,415	-0,754	-0,750	-0,745	-0,745
FONTE NOVA	a	180,84	222,9	251,87	278,64	310,56	332,88
	b	-0,601	-0,579	-0,577	-0,575	-0,572	-0,570
ÉVORA	a	198,68	198,71	277,24	374,00	531,55	670,22
	b	-0,601	-0,444	-0,491	-0,538	-0,595	-0,634
FARO	a	204,89	245,27	280,32	311,58	349,29	376,10
	b	-0,584	-0,555	-0,556	-0,557	-0,558	-0,559
PRAIA DA ROCHA	a	169,22	227,44	266,64	301,99	345,00	375,67
	b	-0,603	-0,598	-0,600	-0,601	-0,601	-0,602
V.R.SANTO ANTÓNIO	a	250,33	309,25	350,56	388,44	434,89	468,58
	b	-0,639	-0,630	-0,631	-0,633	-0,636	-0,638
S. CATARINA (Funchal)	a	193,12	228,63	248,7	265,72	285,72	299,45
	b	-0,517	-0,512	-0,508	-0,505	-0,502	-0,499
PORTO SANTO	a	268,17	328,67	359,72	385,91	417,06	438,66
	b	-0,643	-0,589	-0,560	-0,536	-0,511	-0,496
A.HEROISMO (Açores)	a	192,95	220,04	235,20	248,19	263,43	273,89
	b	-0,500	-0,477	-0,465	-0,456	-0,446	-0,440

A necessidade de uma utilização mais cómoda, principalmente na decisão de escolha dos parâmetros em áreas geográficas entre postos udográficos com dados conhecidos, levou á associação das curvas I-D-F, em regiões pluviométricas, com base em estudos de regionalização, da qual resultaram três regiões : A, B e C. (Fig 10.1).



$$I = at^b \quad (I \text{ em mm/h, } t \text{ em min})$$

Fig 10.1 - Curvas I-D-F para o território nacional (Matos e Silva)

Quadro 4 -Velocidades médias aproximadas de escoamento superficial(m/s)
(Texas Highway Department.Drainage Manual 1970)

Descrição do escoamento	Inclinação do terreno (%)			
	0-3	4-7	8-11	12-15
Escoamento não canalizado:				
Bosques e florestas	0 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,0	1,0 - ?
Pastos	0 - 0,8	0,8 - 1,0	1,0 - 1,3	1,3 - ?
Terrenos cultivados	0 - 0,9	0,9 - 1,4	1,4 - 1,7	1,7 - ?
Terrenos cultivados	0 - 2,6	2,6 - 4,1	4,1 - 5,2	5,2 - ?
Escoamento em canal:				
Canal natural mal definido	0 - 0,6	0,6 - 1,2	1,2 - 2,1	2,1 - ?
Canal bem definido	a calcular pela fórmula de Manning-Strikler			

Quadro 5 -Valores de K em função do período de retorno
(Model Drainage Manual, 1991, AASHTO)

Período de Retorno (Anos)	K
25	1,1
50	1,2
100	1,25