

HIETOGRAMAS DE PROJECTO PARA A ANÁLISE DE CHEIAS BASEADA NO MODELO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

Maria Manuela PORTELA

Professora Auxiliar. IST. DECivil, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa,

+351 218418142, mps@ist.utl.pt

Pedro MARQUES

Engº Civil. Aqualogus, Rua da Tóbis Portuguesa, Lote 10 - Escritório 3, 1750-292, Lisboa,

+351 217520190, aqualogus@mail.telepac.pt

Francisco Freire de CARVALHO

Engº Civil. Aqualogus, Rua da Tóbis Portuguesa, Lote 10 - Escritório 3, 1750-292, Lisboa,

+351 217520190, aqualogus@mail.telepac.pt

Resumo: Justifica-se a necessidade de associar hietogramas com intensidade da precipitação não uniforme às precipitações intensas que, na frequente ausência de registos hidrométricos, permitem a análise de cheias em bacias hidrográficas.

Mediante o recurso ao hidrograma unitário sintético do *Soil Conservation Service*, analisam-se os efeitos de diferentes modelos de hietogramas nos caudais de ponta de cheia relativos a quatro bacias hidrográficas localizadas em Portugal continental e caracterizadas por diferentes tempos de concentração.

O estudo efectuado com base em tais bacias evidencia que a consideração de hietogramas com intensidade da precipitação não uniforme conduz a caudais de ponta de cheia superiores aos que decorrem da hipótese de uniformidade temporal da intensidade daquela precipitação. Verifica-se, também, que a adopção de precipitações com duração superior ao tempo de concentração de cada bacia hidrográfica, *tc*, pode conduzir a caudais de ponta de cheia superiores aos que resultam de precipitações com durações iguais a esse tempo, desde que se atribuam hietogramas com intensidade não uniforme às precipitações com duração superior a *tc*.

Apresentam-se, por fim, critérios a ter em conta no estabelecimento de hietogramas para precipitações com durações iguais e triplas dos tempos de concentração por forma a alcançar estimativas mais elevadas dos correspondentes caudais de ponta de cheia.

Palavras-chave: Caudais de ponta de cheia, hidrograma unitário sintético, hietograma da precipitação, blocos decrescentes, blocos crescentes e blocos alternados.

1. INTRODUÇÃO. ENQUADRAMENTO DO ESTUDO

Devido ao muito menor número de estações hidrométricas, comparativamente com o número de postos udométricos, a análise de cheias requerida por estudos hidráulicos e hidrológicos de índole diversa tem de ser desenvolvida muito frequentemente com base em registos de precipitações intensas. Nalgumas situações é conveniente associar a tais precipitações diagramas que traduzam a sua variação ao longo do tempo.

De facto, quando os acontecimentos pluviométricos com relevância para a análise de cheias têm muito curta duração (1 h ou menos) podem ser descritos, sem significativa perda de rigor, pelas respectivas intensidades médias da precipitação, i , ou seja, pelos quocientes entre as precipitações, P , e as correspondentes durações, t ($i = P/t$) (PONCE, 1989, p. 14). À medida que aquela duração aumenta, espera-se que seja progressivamente maior a imprecisão de admitir que as intensidades da precipitação permanecem sensivelmente constantes, tornando-se importante estabelecer modelos que, de algum modo, traduzam a possibilidade de variação temporal da intensidade da precipitação.

O estabelecimento de tais modelos assume particular relevância na caracterização de cheias afluentes a uma albufeira que promova o amortecimento de ondas de cheias. De facto, a caracterização em causa requer frequentemente a consideração de precipitações com durações que, por serem múltiplas do tempo de concentração da bacia hidrográfica dominada pela barragem que cria aquela albufeira, facilmente excedem a dezena de horas. Intervalos de tempo desta ordem de grandeza dificilmente se adequam à hipótese de uniformidade temporal da intensidade da precipitação.

No presente artigo analisa-se a influência da consideração de precipitações intensas com intensidade não uniforme nos caudais de ponta de cheia dos hidrogramas de cheia que se obtêm por aplicação do modelo do hidrograma unitário (HU)¹. Para descrever a não uniformidade daquelas precipitações ao longo das respectivas durações utilizaram-se unicamente modelos baseados em curvas intensidade-duração-frequência (IDF). A obtenção de hidrogramas de cheia foi efectuada mediante a aplicação do hidrograma unitário sintético do *Soil Conservation Service* (SCS), com recurso ao programa HEC-1 (SCS, 1972 e 1985, e U. S. Army Corps of Engineers, 1990).

Regista-se que o trabalho subjacente ao presente artigo teve por principal objectivo contribuir para sistematizar algumas das indefinições que, em termos práticos, se poderão colocar no âmbito da análise de cheias baseada em precipitações intensas. Por tal motivo, aplicaram-se apenas metodologias acessíveis, de ampla divulgação e de utilização indispensável na caracterização de cheias.

2. HIETOGRAMAS DE PROJECTO BASEADOS EM CURVAS IDF

A discretização temporal de um acontecimento pluviométrico é fornecida por meio de diagramas cronológicos dos sucessivos valores da precipitação. Tais diagramas podem ser contínuos ou discretos, designando-se, neste último caso, por hietogramas da precipitação – **Figura 1**.

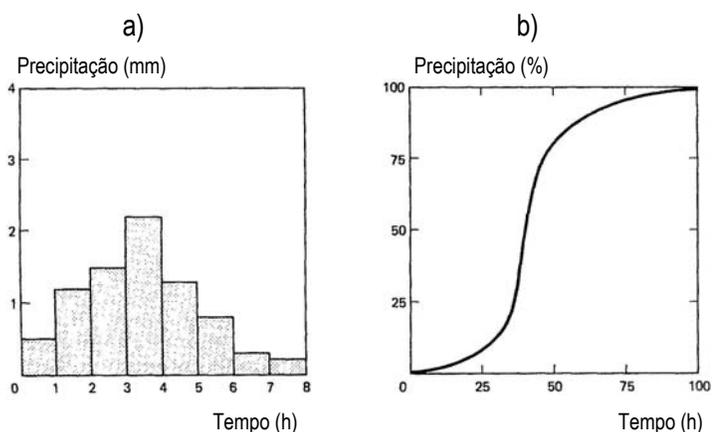


Figura 1 - a) Hietograma da precipitação e b) distribuição temporal adimensional da precipitação (curva cumulativa da precipitação).

¹ O hidrograma unitário com duração D , (HUD), é o hidrograma do escoamento directo provocado numa secção de um curso de água por uma precipitação efectiva, considerada unitária, com intensidade constante no tempo e aproximadamente uniforme sobre toda a bacia hidrográfica e com duração D .

Em BRANDÃO, 1995, p.26 a 66, é apresentada uma vasta síntese bibliográfica sobre modelos para a distribuição temporal da precipitação associada a acontecimentos pluviométricos intensos.

Pelo seu carácter geral, destacam-se os modelos utilizados no trabalho objecto do presente artigo, baseados em curvas intensidade-duração-frequência, IDF, (ou, equivalentemente, em linhas de possibilidade udométrica). Nestes modelos são determinados os incrementos ou parcelas da precipitação que, de acordo com uma dada curva intensidade-duração-frequência, ocorrem em sucessivos intervalos de tempo, com duração constante, Δt . Tais parcelas de precipitação são, seguidamente, reorganizadas numa sequência temporal, estabelecida de acordo com um padrão de variação preestabelecido. À parcela da precipitação total, ΔP_t , que ocorre num intervalo de tempo, Δt , entre dois instantes genéricos t e $t+\Delta t$ atribuiu-se a designação de *bloco de precipitação*.

Um dos padrões de reorganização dos sucessivos incrementos de precipitação é normalmente designado por *padrão de blocos alternados* e admite que a maior quantidade de precipitação no incremento de tempo considerado, Δt , ocorre sensivelmente a meio da duração do acontecimento pluviométrico. As restantes parcelas de precipitação em Δt são ordenadas por ordem decrescente e dispostas sequencialmente e de modo alternado em torno daquele bloco central.

A reorganização temporal das parcelas de precipitação pode também ser concretizada com recurso a *padrões de blocos decrescentes* ou de *blocos crescentes* baseados, os primeiros, na ordenação decrescente das sucessivas parcelas de precipitação em Δt e, os segundos, na ordenação crescente das mesmas parcelas - **Figura 2**.

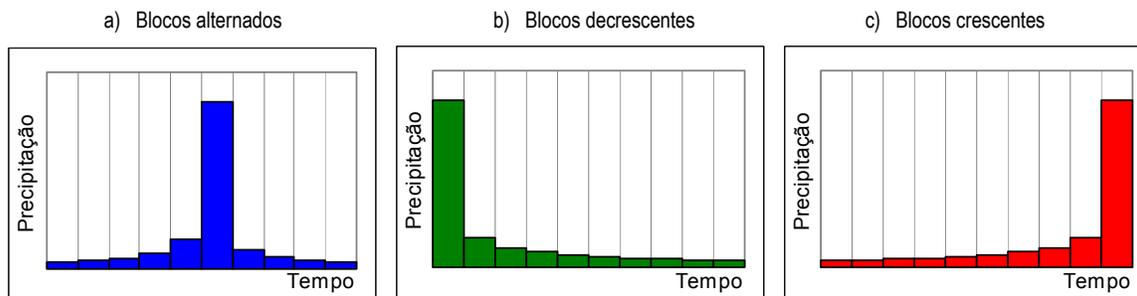


Figura 2 – Hietogramas da precipitação de blocos a) alternados, b) decrescentes e c) crescentes.

Anota-se que a precipitação que, de acordo com qualquer dos modelos da **Figura 2**, resulta da acumulação de blocos contíguos, em que se inclui necessariamente o bloco com precipitação máxima, para um qualquer intervalo de tempo, t^* , múltiplo de Δt ($t^* \geq n \Delta t$, com $n \geq 1$) iguala a precipitação que se obtém da curva intensidade-duração-frequência, para o mesmo intervalo de tempo t^* .

A **Figura 3** ilustra em que medida a consideração de modelos de precipitação com intensidade não uniforme ao longo da respectiva duração pode influenciar os resultados do modelo da análise de cheias. Na **Figura 3 a)** representam-se os hidrogramas de cheias decorrentes da aplicação de um modelo de hidrograma unitário a precipitações com intensidade constante e durações igual, dupla e tripla do tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, t_c . De acordo com esta figura, concluiu-se que, não obstante o aumento do volume da onda de cheia com o aumento da duração da precipitação, o caudal de ponta de cheia diminui por diminuição da intensidade média da precipitação associada ao acontecimento pluviométrico.

O anterior resultado seria também o esperado se a análise de cheias se baseasse num modelo do tipo da fórmula racional que apenas fornecesse caudais de ponta de cheia a partir das intensidades médias da precipitação. Por tal motivo, a bibliografia da especialidade sugere frequentemente que na avaliação de caudais de ponta de cheia com dados períodos de retorno se adoptem como *precipitações*

críticas ou de projecto as precipitações correspondentes àqueles períodos de retorno e com durações iguais aos tempos de concentração das respectivas bacias hidrográficas (*durações críticas*) (CHOW *et al.*, 1988, p. 497, p. 9.15, PONCE, 1989, p. 120, PILGRIN e CORDERY, 1992, VIESSMAN e LEWIS, 1996, p. 360).

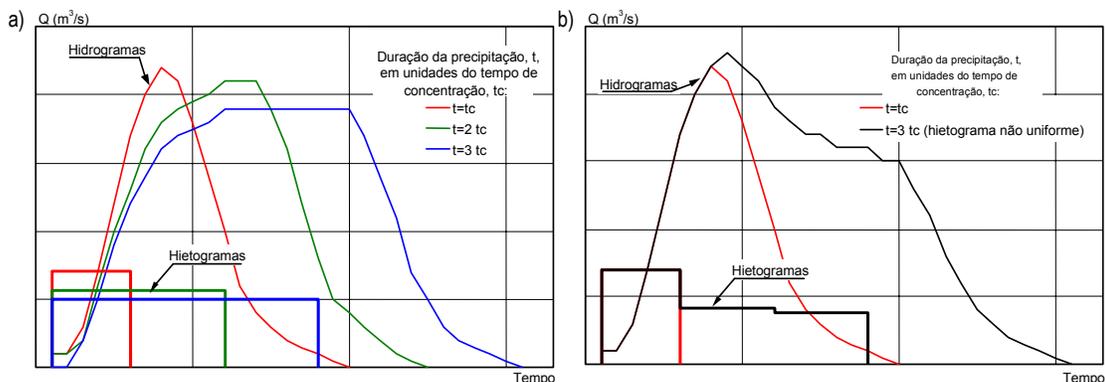


Figura 3 - Hidrogramas de cheia para precipitações com durações igual e múltiplas do tempo de concentração e intensidades a) uniforme e b) não uniforme ao longo do tempo.

Na **Figura 3 b)** representa-se, em simultâneo com a reprodução do hidrograma de cheia da **Figura 3 a)** para precipitação com intensidade uniforme e duração de t_c , o hidrograma de cheia obtido por aplicação do mesmo modelo de hidrograma unitário à precipitação com duração tripla de t_c , mas discretizada ao longo do tempo por um hietograma não uniforme de três blocos decrescentes, estabelecidos de acordo com uma linha de possibilidade udométrica, para incremento de tempo igual a t_c ($\Delta t = t_c$). A linha de possibilidade udométrica aplicada foi a relativa ao posto da Covilhã (BRANDÃO e RODRIGUES, 1998).

A anterior figura evidencia que a associação de um hietograma com intensidade não uniforme à precipitação com duração tripla de t_c pode conduzir a um caudal de ponta de cheia superior ao caudal para duração da precipitação de t_c . Deste modo, constata-se que o critério habitual de projecto de adoptar *precipitações críticas* com duração igual ao tempo de concentração tendo em vista a obtenção de caudais de ponta de cheia poderá conduzir a estimativas por defeito de tais caudais.

Regista-se que a associação de um hietograma com intensidade não uniforme à precipitação com duração de t_c poderia resultar num caudal de ponta de cheia superior ao representado na **Figura 3** para aquela duração.

3. DURAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EFECTIVA ASSOCIADA A HIDROGRAMAS UNITÁRIOS. HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SOIL CONSERVATION SERVICE, SCS

No estabelecimento, com base numa curva intensidade-duração-frequência, do hietograma a associar a uma dada precipitação de projecto – *hietograma de projecto* – colocam-se, normalmente, as seguintes duas questões: que discretização temporal, Δt , e que reorganização dos blocos de precipitação devem ser consideradas por forma a que o modelo aplicado conduza a cheias mais críticas, designadamente, com maiores caudais de ponta.

A obtenção de caudais de ponta de cheia para precipitações com intensidade não uniforme utiliza basicamente o modelo do hidrograma unitário (HU) pelo que a fixação da duração de cada bloco do hietograma de projecto tem de ser adequada ao formalismo daquele modelo.

De facto e como sistematizado no seguimento da apresentação do trabalho objecto deste artigo, a duração, D , da precipitação efectiva subjacente a um hidrograma unitário tem limitações. Tais limitações podem condicionar, por sua vez, a discretização temporal do acontecimento pluviométrico a que o modelo do hidrograma unitário é aplicado, pois a convolução do HU com um hietograma de projecto pressupõe a definição de tal hietograma em sucessivos blocos com duração constante, Δt , e igual à duração D ($\Delta t = D$).

Não existe, contudo, uma indicação precisa quanto à duração, D , da precipitação efectiva associada à definição do hidrograma unitário. Na medida em que as ordenadas do hidrograma unitário são normalmente discretizadas de D em D , tal duração deve ser suficientemente pequena por forma a permitir descrever com algum pormenor aquele hidrograma. Uma duração D suficientemente pequena possibilita também mais rigor na descrição temporal dos hietogramas de projecto a que o hidrograma unitário vai ser aplicado tendo em vista a obtenção de hidrogramas de cheia.

HIPÓLITO, p. 5.2.2., 1987, refere que, na dedução de hidrogramas unitários a partir de chuvadas intensas e isoladas que produzem hidrogramas de cheia simples, a duração D deve ser aproximadamente um quinto do tempo de subida do hidrograma do escoamento directo correspondente. LINSLEY *et al.*, p. 213, 1988, sugerem como “geralmente satisfatória” uma duração D de cerca de um quarto do tempo de atraso ou de *lag* da bacia hidrográfica.

PILGRIN e CORDERY, 1992, p. 9.27, indicam que a duração D não deve exceder um quarto do tempo de subida do hidrograma unitário. QUINTELA, 1996, p. 10.36, citando outros autores (LINSLEY e *at.*, 1982, e DUME e LEOPOLD, 1978), sistematiza que a duração D da precipitação efectiva não deve exceder um quinto a um quarto do tempo de *lag* ou de atraso da bacia hidrográfica, ou um quarto a um terço do tempo de concentração de tal bacia. RIBEIRO, 1987, p. 157, sugere um limite máximo da duração D expressa em função do tempo de concentração diferente do precedente: um quinto a um terço daquele tempo.

Por fim, VIESSMAN e LEWIS, 1996, p. 191, fixam a duração D da precipitação efectiva entre aproximadamente 10 e 30% do tempo de atraso ou de *lag* da bacia hidrográfica. De acordo com estes autores (p. 184 e 185), este tempo pode ser avaliado com base na seguinte equação, desenvolvida por Snyder a partir de estudos efectuados na região das montanhas Apalachianas:

$$t_i = C_t (L_{cg} L^*)^{0,3} \quad (1)$$

em que são

- t_i tempo de *lag* ou de atraso (h),
- L_{cg} distância, medida ao longo do curso de água principal, entre a secção que define a bacia hidrográfica e a secção à menor distância possível do centro de gravidade da bacia hidrográfica (milhas),
- L^* comprimento do curso de água principal, desde a secção que define a bacia hidrográfica até à secção extrema de montante, acrescido da distância entre esta última secção e o limite da bacia hidrográfica (milhas),
- C_t coeficiente adimensional representando variações de tipo e de localização dos cursos de água.

O coeficiente C_t inclui os efeitos decorrentes do declive e do armazenamento na bacia hidrográfica. Com base na região em que os estudos foram desenvolvidos, concluiu-se que C_t , variava entre 1,8 e 2,2, correspondendo os menores valores a bacias com maiores declives (VIESSMAN e LEWIS, 1996, p. 184).

A utilização do modelo do hidrograma unitário na caracterização de cheias em secções da rede hidrográfica que não disponham de registos hidrométricos só é possível mediante o recurso a hidrogramas unitários sintéticos (HUS). Tais hidrogramas são estabelecidos a partir de características fisiográficas das

bacias hidrográficas, mensuráveis unicamente com base nas cartas topográficas das bacias. De entre os HUS distinguem-se os que utilizam:

- Fórmulas empíricas que relacionam aquelas características fisiográficas com propriedades geométricas dos hidrogramas unitários, como os respectivos tempos de base, os caudais de ponta de cheia ou as formas dos hidrogramas (ex.: HUS Snyder).
- Hidrogramas unitários adimensionais (ex.: HUS do *Soil Conservation Service*, SCS).
- Modelos de armazenamento de água nas bacias hidrográficas (ex.: HUS de Clark).

Também para os diferentes hidrogramas unitários sintéticos são por vezes sugeridas durações máximas para as precipitações efectivas unitárias associadas à sua definição.

Por ter sido o modelo utilizado no presente artigo, dada a sua usual aplicação na análise de cheias em Portugal continental, sistematizam-se, seguidamente, algumas características do hidrograma unitário sintético do SCS (SCS, 1972 e 1985). O HUS do SCS é um hidrograma curvilíneo adimensional – **Figura 4** – em que os sucessivos caudais de cheia e instantes de ocorrência são apresentados como fracções, respectivamente, do *caudal de ponta de cheia do hidrograma*, q_p , e do tempo relativo à ocorrência de q_p , ou seja, do *tempo para a ponta*, t_p .

O hidrograma unitário curvilíneo pode ser aproximado pelo hidrograma unitário triangular, também representado na **Figura 4**, com um menor *tempo de base*, t_b , ($8/3 t_p$ em vez de $5 t_p$) e que, à semelhança do hidrograma curvilíneo, apresenta 37,5% do volume da cheia no ramo ascendente. A duração do ramo descendente do hidrograma triangular, ou seja, o correspondente *tempo de descida*, t_d , é de $5/3$ de t_p .

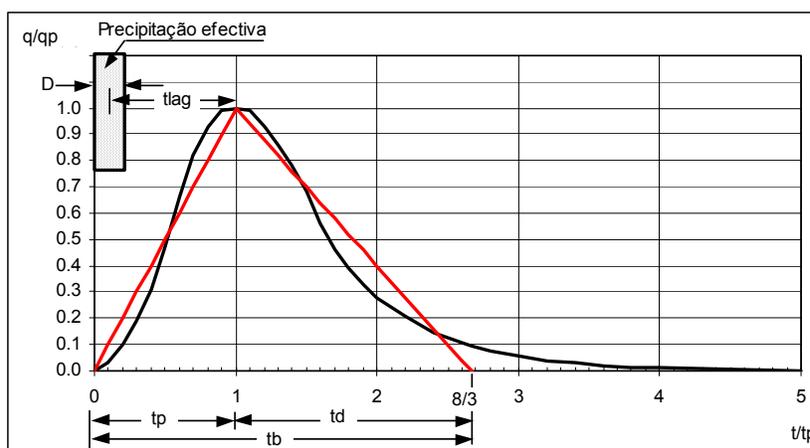


Figura 4 – Hidrograma unitário sintético do Soil Conservation Service, SCS.

O caudal de ponta de cheia do hidrograma unitário, q_p (m^3/s), é definido pela seguinte equação:

$$q_p = \frac{c A}{t_p} \tag{2}$$

em que A é a área da bacia hidrográfica (km^2) e t_p , o tempo para a ponta (h). Tendo em conta a igualdade entre o volume do escoamento directo subtendido pelo HUS e o volume da precipitação efectiva unitária P (mm) associada à definição daquele HUS, obtém-se para a constante c

$$c = \frac{P}{4,8} \tag{3}$$

Para a precipitação efectiva unitária de 1 mm a equação (2) transforma-se em

$$q_p = \frac{0,2083 A}{t_p} \quad (4)$$

O tempo para a ponta, t_p , obedece à seguinte relação

$$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag} \quad (5)$$

em que para o tempo de lag , t_{lag} , é sugerida a adopção de 60% do tempo de concentração da bacia hidrográfica, t_c (SCS, 1972 e 1985)

$$t_{lag} = 0,6 t_c \quad (6)$$

Para a duração D da precipitação efectiva unitária associada à definição do HUS é aconselhada a adopção de $0,2 t_p$, não devendo D exceder $0,25 t_p$. Combinando estas indicações relativas a D com as expressões (5) e (6) obtém-se, aliás em conformidade com os limites propostos por VIESSMAN e LEWIS, 1996, p. 191, anteriormente referidos,

$$\begin{cases} D \approx 0,20 t_p \\ D < 0,25 t_p \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} D \approx 0,122 t_{lag} \\ D < 0,286 t_{lag} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} D \approx 0,133 t_c \\ D < 0,171 t_c \end{cases} \quad (7)$$

As indicações precedentes relativas a D introduzem, em termos práticos, alguma indefinição pelo facto de fazerem depender D do tempo de concentração da bacia hidrográfica, t_c , tempo este que, para uma dada bacia hidrográfica, pode apresentar valores consideravelmente distintos consoante as expressões utilizadas na sua estimação.

Quando a aplicação do modelo do hidrograma unitário do SCS é efectuada com base no programa HEC-1 (U. S. Army Corps of Engineers, 1990) a duração da precipitação efectiva associada ao HUS é fixada interna e automaticamente pelo programa, independentemente da discretização temporal adoptada pelo utilizador na definição dos hietogramas de projecto. Para o efeito, o programa atribui à duração em causa o intervalo de tempo indicado pelo utilizador para a apresentação das sucessivas ordenadas dos hidrogramas de cheia a calcular.

4. RESULTADOS DO ESTUDO

Tendo em vista analisar os efeitos nos hidrogramas de cheia da associação de diferentes hietogramas às precipitações de projecto seleccionaram-se as quatro bacias hidrográficas identificadas no **Quadro 1** a que correspondem os tempos de concentração também aí especificados. Na estimativa destes tempos utilizaram-se as fórmulas de Giandotti, de Temez (TEMEZ, 1978) e do NERC (National Environment Research Council, 1975), tendo-se adoptado um tempo próximo da média arredondada dos três tempos assim obtidos.

O estabelecimento das precipitações de projecto utilizou curvas intensidade-duração-frequência (IDF). Para o efeito e para cada bacia hidrográfica, seleccionou-se, de entre os postos udométricos objecto de recente definição de IDF com diferentes expressões consoante a duração da precipitação (BRANDÃO e RODRIGUES, 1998), um posto que, situando-se tão próximo quanto possível daquela bacia, pudesse ser considerado representativo do regime de precipitações intensas sobre a mesma.

No **Quadro 1** identificam-se os postos assim seleccionados, bem como os parâmetros das correspondentes curvas intensidade-duração-frequência para o período de retorno de 1 000 anos, que por ser frequentemente requerido na análise de cheias, especialmente no âmbito do dimensionamento dos órgãos de descarga de barragens, foi adoptado nos estudos.

Quadro 1 – Bacias hidrográficas analisadas. Características e dados gerais.

Bacia hidrográfica		Área (km ²)	Tempo de concentração, tc (h)
Curso de água	Secção de referência		
Ribeira dos Poios Brancos	Barragem da Cova do Viriato	2,3	1,5
Ribeira da Toulica	Barragem de Toulica	26,0	5,0
Ribeira do Lavre	Lavre	260,5	10,0
Vala da Amieira	Confluência com o estuário do rio Tejo	449,0	14,0

Bacia hidrográfica		Curva intensidade-duração-frequência para T=1000 anos ⁽¹⁾				Precipitação para duração:	
Curso de água	Secção de referência	Posto udométrico	Intervalo de Aplicação (h)	Parâmetros		Igual a tc (mm)	Tripla de tc (mm)
				a	b		
Ribeira dos Poios Brancos	Barragem da Cova do Viriato	Covilhã	0,0 a 0,5	482,36	-0,5619	57,7	93,4
			0,5 a 6,0	488,35 ⁽²⁾	-0,5813 ⁽²⁾		
			6,0 a 48,0	1432,2	-0,7657		
Ribeira da Toulica	Barragem de Toulica	Portalegre	0,0 a 0,5	361,99	-0,3873	82,9	123,6
			0,5 a 6,0	1275,5	-0,7614		
			6,0 a 48,0	473,11	-0,5955		
Ribeira do Lavre	Lavre	Évora – Cemitério	0,0 a 0,5	394,6	-0,3765	115,6	149,1
			0,5 a 6,0	1582,1	-0,7689		
			6,0 a 48,0	1432,2 ⁽³⁾	-0,7657 ⁽³⁾		
Vala da Amieira	Confluência com o rio Tejo	S. Julião do Tojal	0,0 a 0,5	579,58	-0,5728	191,2	235,6
			0,5 a 6,0	447,56	-0,4786		
			6,0 a 48,0	3186,9	-0,8098		

- (1) Curva definida por $i = a t^b$ em que i é a intensidade da precipitação (mm/h) e t , a respectiva duração (min).
 (2) Entre as 0,5 h e as 6 h aplicou-se a expressão relativa ao intervalo de tempo entre as 0,0 h e as 0,5 h.
 (3) Entre as 6,0 h e as 48,0 h aplicou-se a expressão relativa ao intervalo de tempo entre as 0,5 h e as 6,0 h.

O anterior quadro contém ainda a indicação das precipitações de projecto para durações, quer iguais aos tempos de concentração das bacias hidrográficas consideradas, quer triplas destes tempos, geralmente intervenientes no dimensionamento de albufeiras destinadas ao amortecimento de ondas de cheias. Pelo facto de não ter muita influência no objectivo do estudo, consideraram-se nulas as perdas de precipitação, pelo que as precipitações do **Quadro 1** foram entendidas como efectivas.

Observa-se que as curvas intensidade-duração-frequência relativas aos postos da Covilhã e de Évora-Cemitério apresentam descontinuidades (a que correspondem decréscimos da precipitação total) em transições entre trechos contínuos definidos por expressões distintas, designadamente, nas 0,5 h, no caso da Covilhã, e nas 6,0 h, no caso de Évora-Cemitério. Em consequência de tais descontinuidades, quando da construção, com base naquelas IDF, de hietogramas com intensidade não uniforme para pequenos incrementos de tempo, surgiram blocos de precipitação com precipitações negativas. Por tal motivo e como assinalado no **Quadro 1**, aplicaram-se as expressões propostas para as IDF nos intervalos de tempo imediatamente anteriores, ou seja, entre as 0,0 e as 0,5 h e entre as 0,5 e as 6,0 h, respectivamente.

Nos estudos efectuados admitiram-se hietogramas com intensidade da precipitação tanto uniforme como não. Nas **Figuras 5 e 6** exemplificam-se alguns dos hietogramas com intensidade não uniforme utilizados, constituídos por três, seis, quinze e trinta blocos de precipitação. A **Figura 5** respeita à bacia hidrográfica da barragem da Cova do Viriato e contém hietogramas de blocos alternados para duração da precipitação igual ao tempo de concentração (1,5 h). Na **Figura 6**, relativa à bacia hidrográfica da ribeira de Lavre na secção com o mesmo nome, são apresentados hietogramas de blocos decrescentes para duração da precipitação de 30 h, ou seja, tripla do respectivo tempo de concentração.

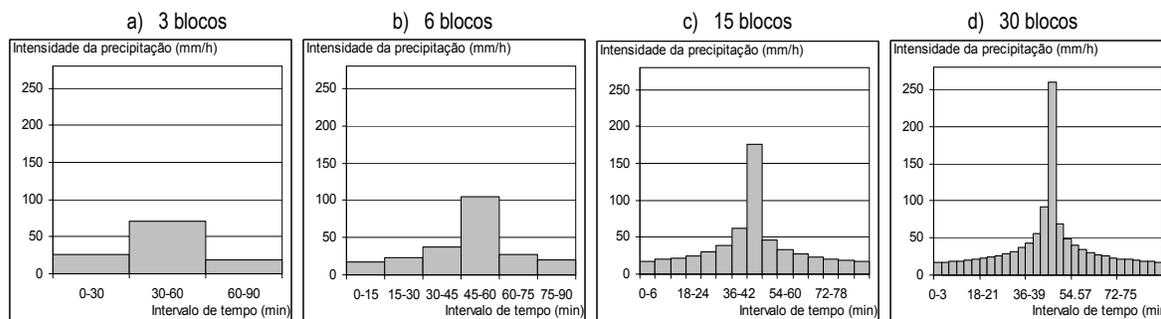


Figura 5 – Bacia hidrográfica da barragem da Cova do Viriato. Hietogramas de blocos alternados para a precipitação com duração igual ao tempo de concentração de 1,5 h (precipitação de 57,7 mm em 1,5 h).

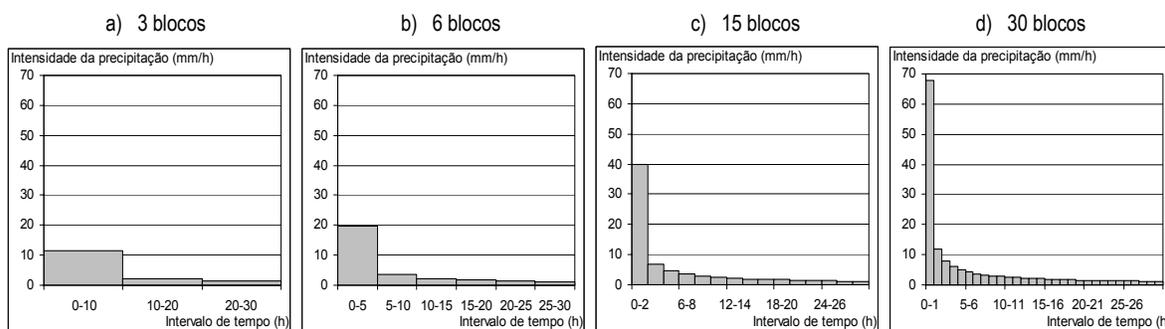


Figura 6 – Bacia hidrográfica da ribeira de Lavre na secção de Lavre. Hietogramas de blocos decrescentes para a precipitação com duração tripla do tempo de concentração (precipitação de 149,1 mm em 30 h).

A obtenção dos hidrogramas de cheia foi efectuada mediante o recurso ao programa HEC-1 por aplicação do hidrograma unitário sintético do SCS.

Como referido, o programa HEC-1 adopta para duração, D , da precipitação efectiva unitária subjacente à definição daquele hidrograma unitário sintético o incremento de tempo indicado pelo utilizador para a apresentação dos sucessivos caudais dos hidrogramas de cheia a calcular. Deste modo, na fixação deste incremento e, conseqüentemente, da duração, D , atendeu-se, não só às durações que decorrem das equações do sistema (7) (que, recorde-se, devem ser entendidas como indicações dada a indefinição que resulta de dependerem dos tempos de concentração), mas também à vantagem de adoptar um incremento de tempo que permitisse uma leitura adequada dos hidrogramas de cheia resultantes da aplicação do programa.

Tendo em conta os anteriores aspectos, no **Quadro 2** sistematizam-se as durações adoptadas para as precipitações efectivas unitárias associadas aos hidrogramas unitários sintéticos do SCS relativos às bacias hidrográficas analisadas. Indicam-se, ainda, os correspondentes tempos de *lag*, avaliados por aplicação de (6).

Quadro 2 – Bacias hidrográficas analisadas. Durações da precipitação efectiva unitária associada ao HUS do SCS.

Bacia hidrográfica		Tempo de concentração (h)	Tempo de lag (h)	Duração, D, da precipitação efectiva unitária associada ao HUS do SCS		
Curso de água	Secção de referência			De acordo com o sistema (7)		Adoptada (min)
		Aconselhada (min)	Máxima (min)			
Ribeira dos Poios Brancos	Barragem da Cova do Viriato	1,5	0,9	12,0	15,4	10
Ribeira da Toulica	Barragem de Toulica	5,0	3,0	40,0	51,4	30
Ribeira do Lavre	Lavre	10,0	6,0	80,0	102,9	60
Vala da Amieira	Confluência com o rio Tejo	14,0	8,4	112,0	144,0	100

Para cada bacia hidrográfica obtiveram-se os hidrogramas de cheia para os seguintes modelos de hietograma:

- a) Duração da precipitação igual ao tempo de concentração:
 - a1) hietograma para precipitação com intensidade uniforme (hietograma com 1 bloco);
 - a2) hietogramas com 2 blocos ordenados decrescente e crescentemente;
 - a3) hietogramas com 3, 4, 6, 9, 12, 15 e 30 blocos ordenados decrescente, crescente e alternadamente.
- b) Duração da precipitação tripla do tempo de concentração:
 - b1) hietograma para precipitação com intensidade uniforme (hietograma com 1 bloco);
 - b2) hietogramas com 3, 6, 9, 12, 15, e 30 blocos ordenados decrescente, crescente e alternadamente.

Na **Figura 6.1**, relativa às bacias hidrográficas das barragens da Cova do Viriato e de Toulica, e na **Figura 6.2**, referente às bacias hidrográficas da ribeira de Lavre e da Vala da Amieira, apresentam-se os hidrogramas de cheia para as precipitações com durações iguais aos tempos de concentração. Os hidrogramas de cheia relativos às mesmas bacias hidrográficas mas para as precipitações com durações triplas daqueles tempos são apresentados nas **Figuras 7.1 e 7.2**, respectivamente. Estas duas últimas figuras incluem, para comparação, os hidrogramas de cheia das **Figuras 6.1 e 6.2** para precipitações com intensidade uniforme.

No que respeita estritamente a caudais de ponta de cheia, a análise das **Figuras 6.1 e 6.2** evidencia o seguinte:

- a) A associação às precipitações com durações iguais aos tempos de concentração de hietogramas com intensidade não uniforme (hietogramas com 2 ou mais blocos) conduz a caudais de ponta de cheia sempre superiores aos caudais que decorrem de hietogramas com intensidade uniforme (hietogramas com 1 bloco).
- b) Para um número de blocos de precipitação fixo (igual ou superior a três), o caudal de ponta de cheia em cada uma das quatro bacias hidrográficas analisadas é progressivamente mais elevado consoante se considera um hietograma de blocos decrescentes ou de blocos crescentes ou de blocos alternados.
- c) Para qualquer daquelas bacias, verifica-se que, desde que os hietogramas não uniformes de um mesmo tipo (de blocos decrescentes, de blocos crescentes ou de blocos alternados) apresentem mais de 4, ou quanto muito, 3 blocos, se obtêm caudais de ponta de cheia iguais ou muito próximos dos caudais de ponta de cheia que resultam de hietogramas daquele mesmo tipo mas com maior número de blocos.

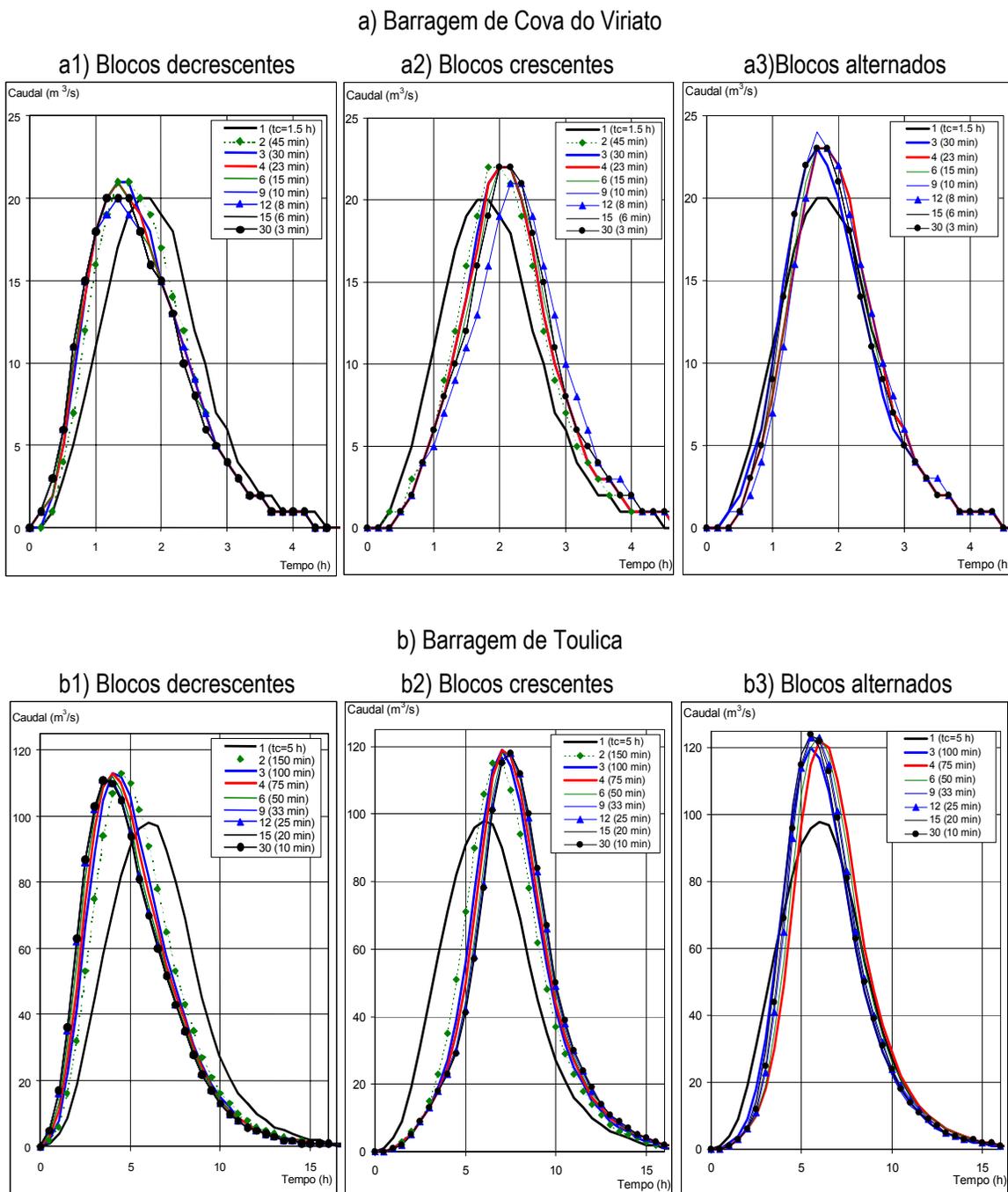


Figura 6.1 – Hidrogramas de cheia para precipitações com durações iguais aos tempos de concentração e diferentes tipos de hietogramas de projecto. Secções das barragens a) da Cova do Viriato e b) de Toulica (legenda com identificação do número de blocos dos hietogramas e da duração de cada bloco).

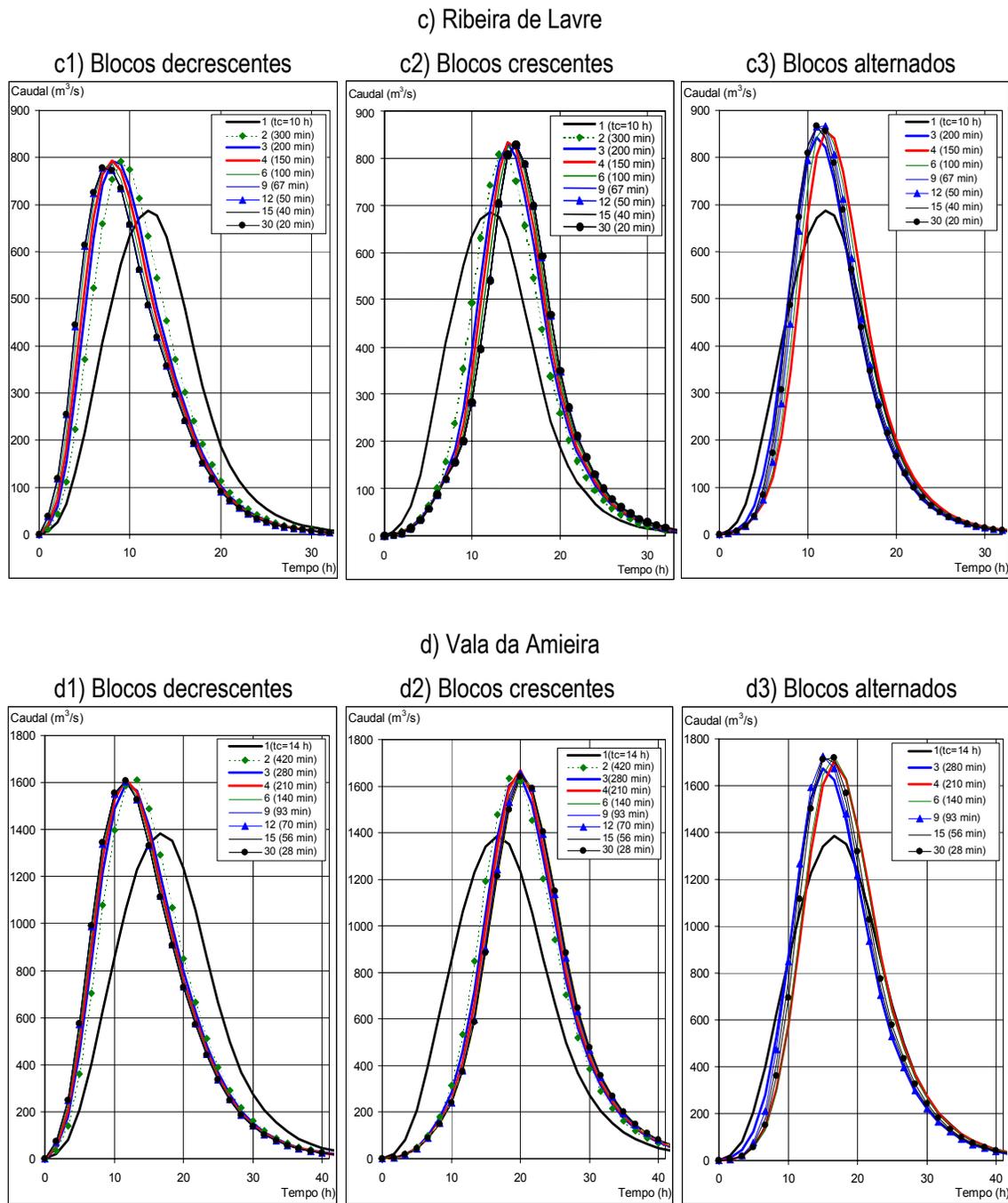


Figura 6.2 – Hidrogramas de cheia para precipitações com durações iguais aos tempos de concentração e diferentes tipos de hietogramas de projecto. c) Ribeira de Lavre e d) Vala da Amieira (legenda com identificação do número de blocos dos hietogramas e da duração de cada bloco).

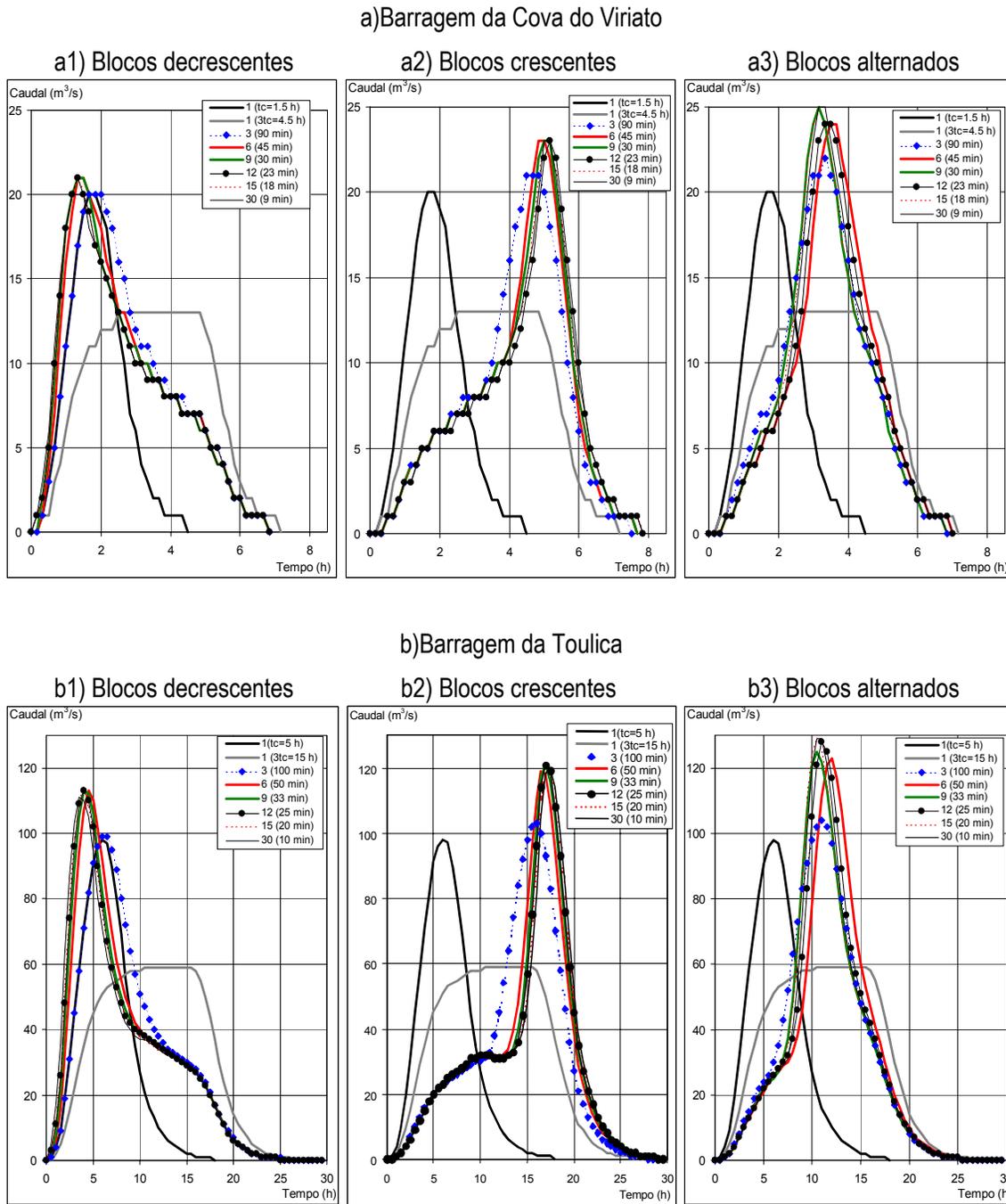
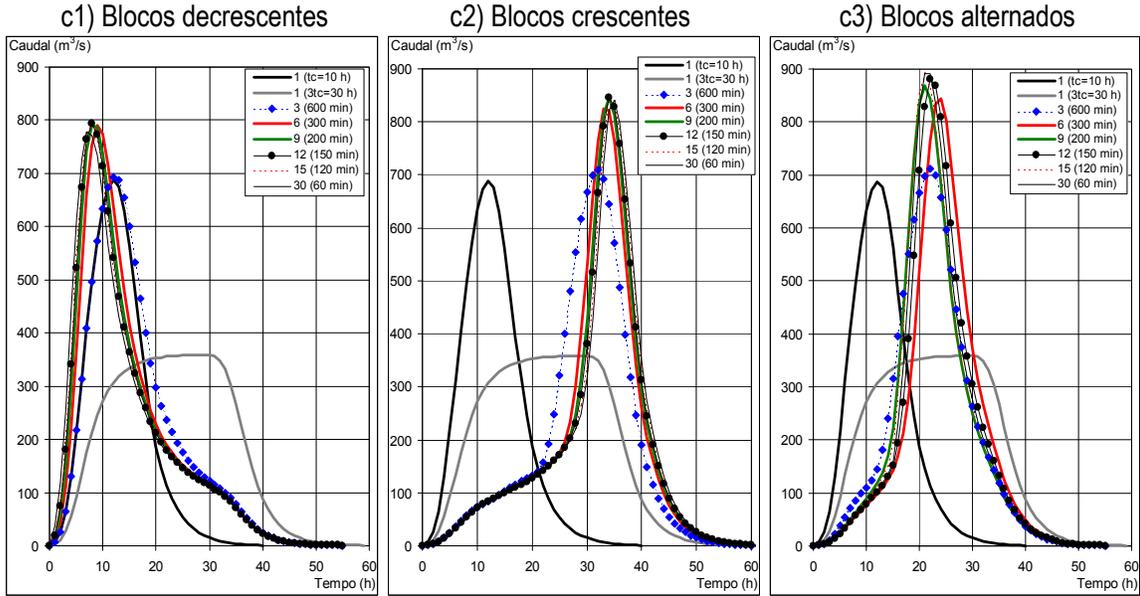


Figura 7.1 – Hidrogramas de cheia para precipitações com durações, quer iguais aos tempos de concentração e intensidades uniformes, quer triplas dos tempos de concentração e diferentes tipos de hietogramas de projecto. Secções das barragens a) da Cova do Viriato e b) de Toulica (legenda com identificação do número de blocos dos hietogramas e da duração de cada bloco).

c) Lavre



d) Amieira

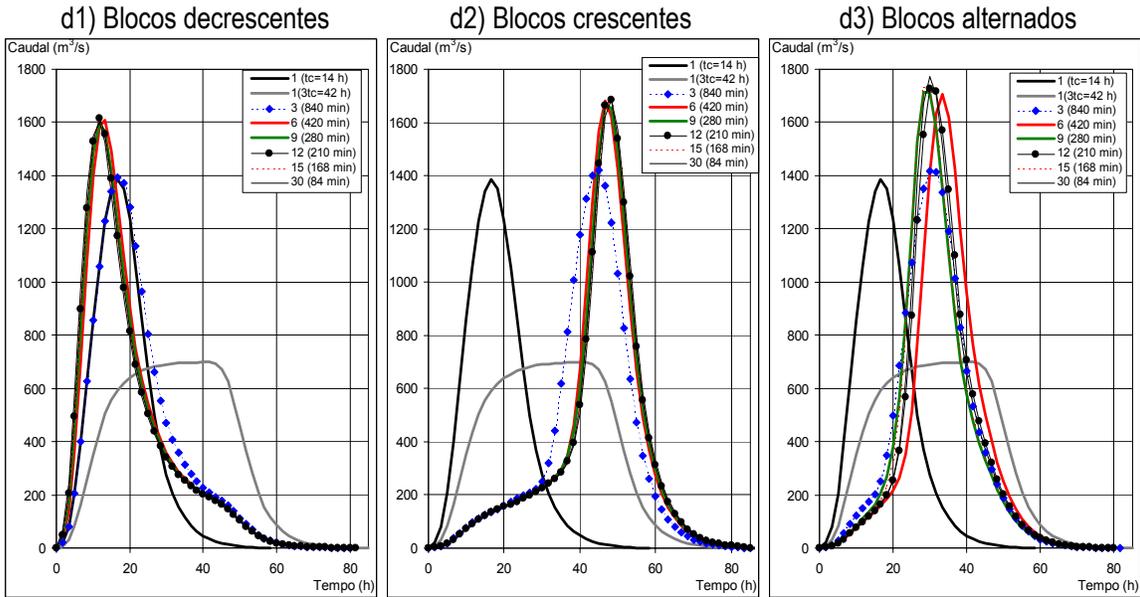


Figura 7.2 – Hidrogramas de cheia para precipitações com durações, quer iguais aos tempos de concentração e intensidades uniformes, quer triplas dos tempos de concentração e diferentes tipos de hietogramas de projecto. Secções c) de Lavre e d) da Amieira (legenda com identificação do número de blocos dos hietogramas e da duração de cada bloco).

Com base nas **Figuras 7.1 e 7.2** e também no que respeita apenas a caudais de ponta de cheia verifica-se que:

- a) O caudal de ponta de cheia que, para cada bacia hidrográfica, se obtém com base na precipitação com intensidade uniforme e duração tripla do tempo de concentração é muito inferior ao caudal de ponta de cheia que resulta da precipitação com duração igual ao tempo de concentração e intensidade uniforme ou não.
- b) O caudal de ponta de cheia que, para uma bacia hidrográfica, decorre da associação de um hietograma não uniforme com um número de blocos fixo (igual ou superior a três) à precipitação com duração tripla do tempo de concentração aumenta consoante se considera um hietograma de blocos decrescentes ou de blocos crescentes ou de blocos alternados. Este último tipo de hietograma conduz sempre às mais elevadas estimativas dos caudais de ponta de cheia.
- c) A associação de hietogramas não uniformes com 3 blocos (decrescentes, crescentes ou alternados) à precipitação com duração tripla do tempo de concentração conduz a caudais de ponta de cheia em cada bacia hidrográfica próximos, embora superiores, ao caudal de ponta que decorre da precipitação com intensidade uniforme e duração igual ao tempo de concentração.
- d) Para qualquer das bacias hidrográficas, verifica-se que, desde que os hietogramas não uniformes de um mesmo tipo (de blocos decrescentes, de blocos crescentes ou de blocos alternados) apresentem mais de 9, ou quanto muito, 6 blocos, se obtém caudais de ponta de cheia muito próximos dos caudais de ponta de cheia que resultam de hietogramas daquele mesmo tipo mas com maior número de blocos

No **Quadro 3** apresentam-se os caudais de ponta de cheia de alguns dos hidrogramas das **Figuras 6.1, 6.2, 7.1 e 7.2**.

5. CONCLUSÕES

Com base nas quatro bacias hidrográficas do **Quadro 1** e no modelo do modelo do hidrograma unitário sintético do SCS conclui-se, assim, que:

- A atribuição de hietogramas com intensidade da precipitação não uniforme à precipitação intensa com uma dada duração conduz a caudais de ponta de cheia sempre superiores ao caudal que decorre da hipótese de uniformidade temporal da intensidade daquela precipitação.
- Mediante a associação de hietogramas não uniformes à precipitação com duração tripla do tempo de concentração de uma bacia hidrográfica obtém-se caudais de ponta de cheia que podem exceder muito significativamente o caudal de ponta de cheia resultante da precipitação com intensidade uniforme e duração igual àquele tempo.
- Para precipitações com durações, quer iguais aos tempos de concentração, quer triplas destes tempos, obtém-se caudais de ponta de cheia progressivamente mais elevados consoante se adoptam hietogramas com intensidade não uniforme de blocos decrescentes ou de blocos crescentes ou de blocos alternados.
- Por forma a maximizar as estimativas dos caudais de ponta de cheia, julga-se recomendável a adopção de hietogramas de blocos alternados com 4 ou, no mínimo, 3 blocos, para precipitações com durações iguais aos tempos de concentração, e com 9 ou, no mínimo, 6 blocos, para precipitações com durações triplas dos tempos de concentração. Os acréscimos dos caudais de ponta de cheia que, por vezes, se verificam para um maior número de blocos são muito pouco significativos, tanto mais que a metodologia aplicada, não obstante a sua utilização muito frequente na análise de cheias em rios portugueses, é necessariamente aproximada.

- Nas condições especificadas no ponto precedente, obtêm-se caudais de ponta de cheia para precipitações com durações triplas dos tempos de concentração das bacias hidrográficas superiores aos caudais de ponta de cheia para precipitações com durações iguais àqueles tempos.

Quadro 3 — Caudais de ponta de cheia.

Duração da precipitação	Número de blocos do hietograma ⁽¹⁾	Bacia hidrográfica							
		Cova do Viriato				Touluca			
		U (m³/s)	D (m³/s)	C (m³/s)	A (m³/s)	U (m³/s)	D (m³/s)	C (m³/s)	A (m³/s)
Tc	3	20	21	22	23	98	113	119	120
	4		21	22	23		113	119	122
	6		21	22	23		112	118	124
	9		20	22	24		111	118	124
3 tc	6	13	20	21	22	59	99	103	104
	9		21	23	24		113	119	123
	12		21	23	24		113	121	128
	15		21	23	25		113	121	129
			21	23	25		113	121	129

Duração da precipitação	Número de blocos do hietograma ⁽¹⁾	Bacia hidrográfica							
		Lavre				Amieira			
		U (m³/s)	D (m³/s)	C (m³/s)	A (m³/s)	U (m³/s)	D (m³/s)	C (m³/s)	A (m³/s)
Tc	3	688	791	832	842	1385	1595	1646	1674
	4		793	833	857		1614	1668	1707
	6		786	828	868		1609	1665	1728
	9		776	827	865		1606	1665	1726
3 tc	3	359	693	709	711	699	1393	1400	1416
	6		791	825	844		1610	1681	1705
	9		791	846	869		1595	1663	1714
	12		793	846	880		1614	1687	1727
	15		791	842	892		1610	1686	1735

Nota: (1) – Para os hietogramas com intensidade da precipitação não uniforme, identificados por D, C e A.
 U – Hietograma com intensidade da precipitação uniforme (1 bloco).
 D – Hietograma de blocos decrescentes.
 C – Hietograma de blocos crescentes.
 A – Hietograma de blocos alternados.

Hietogramas recomendados

6. BIBLIOGRAFIA

- BRANDÃO, C e RODRIGUES, R. , 1998, *Precipitações intensas em Portugal continental para períodos de retorno até 1000 anos*. DSRH, INAG. Lisboa.
- CHOW, V. T., MAIDEMENT, D. R. e MAYS, L. M., 1988, *Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company. New York.
- DUME, T. e LEOPOLD, L. B., 1978, *Water in environmental planning*. W. H. Freeman and Company, EUA.
- HIPÓLITO, J. N., 1987, “Hietograma unitário” in *Hidrologia e Hidráulica de Pequenas Barragens*. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.

- LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A. e PAULHUS, J. L. H., 1982, *Hydrology for engineers, SI Metric Edition*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, EUA..
- LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A. e PAULHUS, J. L. H., 1987, *Hydrology for engineers, SI Metric Edition*. McGraw-Hill Book Company, International Edition, Singapore.
- Natural Environment Research Council, NERC, 1975. "Floods studies report in five volumes. Vol. 1. Hydrological studies". Londres, Inglaterra.
- PILGRIN, D. H. e CORDERY, I., 1992, "Flood runoff", in *Handbook of Hydrology*. Ed. David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p.9.1-9.42.
- PONCE, V. M., 1989, *Engineering Hydrology. Principles and practices*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- RIBEIRO, A. A., 1987, *Hidrologia. Águas superficiais*. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Laboratório de Hidráulica. Porto.
- QUINTELA, A. C., 1996, *Hidrologia e recursos hídricos*. Folhas de apoio à disciplina de Hidrologia e Recursos Hídricos. Associação de estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Soil Conservation Service, 1972, *National Engineering Handbook*, Sec. 4, Hydrology, U. S. Department of Agriculture. (*)
- Soil Conservation Service, 1985, *National Engineering Handbook*, Sec. 4, Hydrology, U. S. Department of Agriculture, disponível a partir de U. S. Government Printing Office, Washington D.C. (*)
- U. S. Army Corps of Engineers, 1990, *HEC-1. Flood hydrograph package. User's manual*. Hydrologic Engineering Centre. Davis, California.
- VISSMAN, W. e LEWIS, G. L., 1996, *Introduction to hydrology*. 4th edition. HarperCollins College Publishers. New York.

(*) Referência não consultada directamente