

3 NORMATIVA APLICABLE

Se desarrolla a continuación una breve descripción de la normativa aplicable según la legislación española para el análisis de rotura de presas, haciendo un resumen cronológico de la aparición de las distintas publicaciones y la relación que guardan entre ellas. Dichas publicaciones son:

- 1995 Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones [1]
- 1996 Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses [2]
- 1996 Guía Técnica para clasificación de Presas en función de su riesgo potencial [3]
- 2001 Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Emergencia de Presas [4]

También se incluye un resumen de las distintas normativas extrayendo de ellas exclusivamente aquello que el ingeniero que aborde el análisis de una rotura de presas necesita conocer sobre ellas: datos de partida, bases de cálculo, presentación de resultados, etc. Este resumen debe su interés al hecho de que muchos conceptos están repetidos en las distintas normativas y guías técnicas. Asimismo el análisis de inundaciones por rotura de presas se inscribe dentro de una tarea multidisciplinar que hace que en las distintas publicaciones aparezcan muchos conceptos que si bien son necesarios en el sentido de tener una visión global del trabajo que se está realizando, lo cual llevará a obtener un resultado acorde con las necesidades reales que se esperan de él, no son estrictamente necesarios para realizar una simulación de rotura de presa.

3.1 Introducción

El régimen extremo hidrológico de nuestro país, unido a la presencia de numerosas presas, hace muy importante la consideración del riesgo que comportaría la rotura de alguna estas y las medidas que podrían tomarse para minimizar las consecuencias de la misma.

Debido al nivel de desarrollo en que se encuentra nuestra sociedad debemos exigirnos no solo tener presas como elemento de regulación para tener reservas de agua y laminar avenidas, si no dar un paso más en materia de seguridad ciudadana y establecer esos riesgos y las medidas a adoptar ante ellos.

Todo ello, aunque en la norma de 1967 “Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas” [5] ya quedaba citado, ha sido encomendado hasta el día de hoy al buen juicio de todos los profesionales que han intervenido en la construcción y explotación de presas.

Mientras que las normativas más antiguas se limitaban a aplicar criterios de seguridad uniformes a todas las presas, recientemente se han comenzado a aplicar en diversos países criterios de seguridad más exigentes a aquellas

presas que, en caso de accidente, pudieran tener mayores consecuencias para la población situada aguas abajo. Esta aplicación de criterios selectivos exige clasificar las presas en función del riesgo potencial que pudiera derivarse de su posible rotura o de su funcionamiento incorrecto. Atendiendo a esta nueva filosofía se han desarrollado en los últimos años las normativas y guías de las cuales a continuación se realiza una breve introducción.

La primera norma donde se habla explícitamente de los riesgos que pudieran derivarse del funcionamiento incorrecto o de la rotura potencial de presas aparece en febrero de 1995 con la publicación de la Directriz [1].

El objeto de la Directriz [1] es establecer los requisitos mínimos que deben cumplir los correspondientes Planes Especiales de Protección Civil en cuanto a fundamentos, estructura, organización y criterios operativos de respuesta, para ser homologados e implantados en su correspondiente ámbito territorial, con la finalidad de prever un diseño o modelo nacional mínimo que haga posible, en su caso, una coordinación y actuación de los distintos servicios y Administraciones implicadas.

En dicha norma aparece la obligatoriedad de clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su posible rotura o funcionamiento incorrecto en tres categorías, en función de las posibles afecciones a la población, servicios esenciales y bienes materiales y medioambientales:

- Categoría A: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medio ambientales muy importantes.
- Categoría B: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medio ambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- Categoría C: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A o B.

Se establece la obligatoriedad de redactar un Plan de Emergencia de Presas para todas aquellas que resulten clasificadas como A o B en función del riesgo potencial en caso de rotura.

En 1996 aparece el Reglamento [2], que recoge los avances técnicos habidos hasta la fecha y recoge las modificaciones acaecidas en la legislación hidráulica.

El Reglamento [2] incluye en su ámbito de aplicación todas las fases de desarrollo y utilización de las presas y de los embalses, desde la fase de proyecto hasta la de su eventual puesta fuera de servicio, cubriendo de esta forma una laguna muy importante existente hasta la fecha en la legislación y

encomienda al titular de la presa la responsabilidad del estricto cumplimiento de las normas de seguridad en todas sus fases.

El Reglamento [2] es de aplicación a aquellas que se clasifiquen como “gran presa” y aquellas que se clasifiquen A o B en función de su riesgo potencial en caso de rotura según lo establecido en la Directriz, aún cuando no se clasifiquen como “gran presa”.

Según el Reglamento [2], se considera “gran presa” a la que cumpla, al menos, una de las siguientes condiciones:

- Altura superior a 15 metros, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentación hasta la coronación.
- Altura comprendida entre 10 y 15 metros, siempre que tengan alguna de las siguientes características:
 - Longitud de coronación superior a 500 metros.
 - Capacidad de embalse superior a 1.000.000 de metros cúbicos.
 - Capacidad de desagüe superior a 2.000 metros cúbicos por segundo.

Podrán clasificarse igualmente como «grandes presas» aquellas que, aun no cumpliendo ninguna de las condiciones anteriores, presenten dificultades especiales en su cimentación o sean de características no habituales.

Por tanto, la Directriz [1] y el Reglamento [2] suponen un avance en materia de legislación en cuanto a seguridad ante riesgo de inundaciones debidas a rotura de presas y embalses.

En 1996 aparece también la “Guía Técnica para clasificación de Presas en función de su riesgo potencial” [3].

Los criterios de clasificación definidos en la Directriz [1] tienen un carácter descriptivo y general. La Guía Técnica [3] desarrolla los criterios de clasificación de presas establecidos en la Directriz [1] y en el Reglamento [2] y plantea con carácter orientativo una metodología general de aplicación y el contenido mínimo de la información que ha de acompañar a las propuestas de clasificación, todo ello con la finalidad de que las resoluciones de clasificación de presas se preparen y se dicten de manera homogénea y coordinada.

En junio de 2001 aparece la “Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Emergencia de Presas” [4], que tiene la finalidad de establecer las recomendaciones, criterios y metodologías a seguir en la elaboración de los planes de emergencia de presas, teniendo en cuenta las singularidades que éstos presentan con respecto a la planificación general de emergencias ante inundaciones, de modo que se facilite la elaboración de unos planes homogéneos.

Un Plan de Emergencia de Presa debe consistir en un documento en el que se sistematicen las actividades que deban ser acometidas para la detección de las

situaciones de emergencia y para su tratamiento, de forma que se minimice la probabilidad de fallo o mal funcionamiento y los eventuales daños a ellos asociados.

Los Planes de Emergencia de Presas consisten en el establecimiento de la organización y planificación de los recursos humanos y materiales necesarios, en situaciones de emergencia para controlar los distintos factores de riesgo que puedan comprometer la seguridad de la presa, y con ello eliminar o reducir la probabilidad de la rotura o avería grave.

Asimismo, establecen un sistema de información y comunicación, con los correspondientes escenarios de seguridad y peligro, a las autoridades de Protección Civil competentes, para que se activen un conjunto de actuaciones preventivas y de aviso a la población para reducir o eliminar los daños potenciales en caso de rotura o avería grave de la presa. Para ello es necesario que en los Planes de Emergencia de presas se determine la zona inundable en caso de rotura, indicando los tiempos de propagación de la onda de avenida y efectuar el correspondiente análisis de riesgos.

3.2 Simulación hidráulica

En este apartado se recoge toda la información que aparece en las distintas normativas y guías técnicas ([1],[2],[3],[4]) necesaria para la realización de una simulación hidráulica.

El interés de este apartado reside en el hecho de que las normativas y guías están redactadas desde un punto de vista pluridisciplinar, hecho que provoca que haya mucha información no necesaria para la realización de una simulación hidráulica. Por otro lado hay conceptos que se repiten en dos o más normativas y de esta forma se tiene junta y ordenada toda la información que el ingeniero que deba abordar el estudio de rotura de una presa debe tener en cuenta.

3.2.1 Topografía necesaria

En general, la geometría del valle agua debajo de la presa se obtendrá de la topografía existente, realizándose únicamente reconocimientos topográficos en los casos en que sea estrictamente necesario, obteniéndose secciones transversales en los sitios más relevantes para el estudio de la propagación de la onda y para la evaluación de los daños potenciales.

Las características geométricas del cauce se establecerán a partir de su topografía, viniendo ésta caracterizada por su escala y equidistancia entre curvas de nivel.

Desde el punto de vista hidráulico, de avance de la onda, se considerará que la morfología general del cauce es sensiblemente constante en el tiempo, por lo que a este respecto serán válidas las topografías existentes independientemente de su fecha de realización. No ocurre obviamente lo

mismo desde los puntos de vista de la evaluación de daños y de características de elementos singulares (puentes y azudes, por ejemplo).

La topografía, existente u obtenida expresamente para la clasificación, estará realizada por restitución con apoyo de campo a partir de fotografía aérea. En ningún caso se considerarán válidas las restituciones expeditas (sin apoyo de campo). Por el contrario sí se considerará válida la definición geométrica mediante la obtención de perfiles (longitudinal y transversales) por topografía clásica y cuando se hayan seguido para su realización las normas establecidas por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

El criterio orientativo de validez que se adopta se basa en exigir que todos los perfiles utilizados en el análisis vengan definidos por un mínimo de tres curvas de nivel (2 equidistancias), lo que se traduce en los valores reflejados en el cuadro siguiente:

Escala mínima de trabajo según [3] y [4]:

Calado máximo de análisis (m)	Equidistancia máxima (m)	Escala asociada
1	0,5	1:500
2	1,0	1:1.000
4	2,0	1:2.000
10	5,0	1:5.000
20	10,0	1:10.000 (1:25.000)
40	20,0	(1:50.000)

(Los valores entre paréntesis se refieren a la cartografía oficial del Instituto Geográfico Nacional o del Servicio Geográfico del Ejército)

3.2.2 Rugosidad

El coeficiente de rugosidad se obtendrá generalmente de forma empírica con base en los datos bibliográficos y con inspección visual de los tramos, como por ejemplo el método propuesto por el U.S.S.C.S. [6] o los valores proporcionados por Ven Te Chow [7]. Si existen datos de propagación reales de avenidas podrá realizarse una calibración, aunque hay que tener en cuenta la variación de la rugosidad con niveles mayores de inundación.

También será conveniente el conocimiento de los valores adoptados en otros casos de simulación de roturas. En general se recomienda adoptar posiciones conservadoras aumentando los valores empleados tradicionalmente en la propagación de avenidas naturales. ([3])

3.2.3 Identificación de zonas de riesgo

La realización de un estudio de inundabilidad por rotura de una presa lleva consigo la necesidad de evaluar la afección que dicha rotura provoca a las diferentes zonas singulares (poblaciones, servicios, etc) existentes en el cauce o en las llanuras de inundación; para ello hay que identificar primero estas zonas atendiendo a la clasificación que a continuación se detalla, sin que la relación sea limitativa.

De manera paralela hay que identificar también puntos que puedan suponer una afección importante para el avance de la onda de rotura: estrechamientos, puentes, otras presas, etc.

- **Afecciones graves a núcleos urbanos:**

Núcleo urbano: Conjunto de al menos diez edificaciones, que estén formando calles, plazas y otras vías urbanas. Por excepción, el número de edificaciones podrá ser inferior a 10, siempre que la población de derecho que habita las mismas supere los 50 habitantes.

Afección grave a un núcleo urbano: afectar a más de 5 viviendas habitadas y que represente riesgo para las vidas de los habitantes, en función del calado y la velocidad de la onda.

Se han de identificar municipios cuyo ámbito territorial pueda verse afectado en un intervalo de tiempo de dos horas o inferior, contando desde el momento hipotético de la rotura, ya que éstos deberán de tener un plan de actuación en caso rotura de la presa.

- **Número reducido de viviendas:**

Se considera número reducido de viviendas el comprendido entre uno (1) y cinco (5) viviendas habitadas.

- **Pérdida incidental de vidas humanas:**

Presencia ocasional y no previsible, en el tiempo, de la persona en la llanura de inundación.

- **Servicios esenciales:**

Aquellos que son indispensables para el desarrollo de las actividades humanas y económicas normales del conjunto de la población.

Se considerará servicio esencial aquel del que dependan, al menos, del orden de 10.000 habitantes.

En cuanto a la tipología de los servicios esenciales, estos incluyen, al menos, las siguientes:

- Abastecimiento y saneamiento
 - Suministro de energía
 - Sistema sanitario
 - Sistema de comunicaciones
 - Sistema de transporte
- Daños Materiales:

Los daños materiales se evaluarán en función de las siguientes categorías:

- Daños a industrias y polígonos industriales
- Daños a las propiedades rústicas
- Daños a cultivos
- Daños a las infraestructuras

La evaluación de los daños materiales potenciales a efectos de clasificación estará en la práctica, en la mayor parte de las ocasiones, asociada a los restantes aspectos. Solamente en casos muy concretos y dudosos puede tener cierta relevancia para la clasificación.

- Daños medioambientales:

Se considerarán como elementos susceptibles de sufrir daño medioambiental únicamente aquellos elementos o territorios que gocen de alguna figura legal de protección a nivel estatal o autonómico (bien de interés cultural, parque nacional, parque natural, etc.).

- Obstrucciones en el cauce y fenómenos locales:

A partir del análisis de la geometría del valle y de la visita del terreno se localizarán las obras singulares que por su importancia pudieran producir obstrucciones significativas en el cauce o dar lugar a fenómenos hidráulicos de naturaleza local que pudieran incidir de manera muy importante en la propagación de la onda. Tal es el caso de terraplenes de infraestructuras viarias y de puentes. En cada caso se analizarán estas circunstancias y en general se considerará que estas estructuras rompen cuando el nivel de las aguas alcance la cota superior del tablero o la cota de coronación del terraplén, esto es, cuando se empiece a producir vertido sobre ellos.

Únicamente se considerará significativa la incidencia de la obstrucción en la onda cuando simultáneamente se presenten las dos circunstancias siguientes:

- Representa una obstrucción importante, que, expresada como relación de superficies obstruidas y total del cauce atravesado, es superior al 20%.
- Su obstrucción crea un embalse temporal de magnitud relativa importante, que, respecto al volumen de la onda de rotura de la presa, representa más del 5%.

Caso de no producirse alguna de estas circunstancias, podrá establecerse, en general, el régimen hidráulico sin considerar su existencia.

- Otras afecciones:

Aún cuando no están citadas expresamente en la definición de categorías, deben incluirse en los criterios de clasificación algunos elementos singulares cuya afección puede potenciar y agravar los efectos de la rotura de la propia presa, originando un efecto en cadena.

El caso más típico es el que se origina por la existencia agua debajo de la presa analizada de otras que pueden romper como consecuencia de la rotura de la primera. Se considerará que la presa situada agua abajo rompe como consecuencia de la rotura de la situada agua arriba si la onda que esta produce provoca en la primera el vertido sobre coronación. ([3],[4])

3.2.4 Selección del modelo

A continuación se detallan los criterios para la selección del modelo a elegir para llevar a cabo el estudio de la rotura de la presa que aparecen tanto en [3] como en [4].

Cabe destacar que en [3] tienen cabida métodos simplificados ya que en esta guía el objetivo del estudio de rotura se limita a la clasificación de la presa en función de riesgo potencial y ésta puede ser muy obvia si por ejemplo hay una población debajo de la presa que claramente se verá afectada por la rotura. No ocurre lo mismo en [4] , ya que en este caso el objetivo es un estudio detallado de inundabilidad y estimación de riesgos de una presa que será de clasificación A o B.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de analizar los criterios que aparecen en las distintas guías, debido a la rapidez con que avanza la aparición y mejora de los diferentes modelos numéricos de rotura de presas, es la fecha de redacción de las mismas. [3] se redactó en fecha noviembre de 1996 y [4] en fecha junio de 2001, siendo por tanto ésta última más actualizada.

- Selección del modelo según [3]:

- Introducción:

Para el análisis de las roturas de presas existen gran variedad de métodos, algunos de ellos todavía en proceso de investigación y desarrollo. En el estudio de la ICOLD (International commission on large dams) sobre “Dam Break Flood Analysis” [8] se presenta una descripción de los diferentes métodos y se describen 27 modelos existentes, de los que solo unos pocos están normalmente extendidos en la práctica.

Se recomienda en general el empleo de métodos hidráulicos de tipo completo, es decir, de métodos que se basan en las ecuaciones dinámicas del movimiento. Sin embargo hay que señalar que en casos de clasificaciones obvias, en los que el juicio ingenieril dispone de elementos suficientes para formular una propuesta de clasificación, podrá ser suficiente el empleo de aproximaciones alternativas, como por ejemplo los métodos simplificados existentes y que adicionalmente sirven para comprobar analíticamente la clasificación prevista y dotan de objetividad y consistencia a apreciaciones que pudieran ser subjetivas.

- Métodos para el estudio de la inundación consecuencia de la rotura de una presa:

Existen diversos métodos para el estudio de la formación y propagación de las ondas de rotura de presas, de las que se presentan cuatro tipos que ordenados de mayor a menor complejidad, son los siguientes:

- Método completo (modelos hidráulicos completos).
- Método simplificado de modelización.
- Método mixto hidrológico-hidráulico.
- Método simplificado de las curvas envolventes.

El método completo es el más preciso y el único que considera las características reales del movimiento en régimen variable de la propagación de la onda de rotura, así como los posibles efectos de las secciones hidráulicas agua abajo en la propagación agua arriba del movimiento. Por ello, en general, es el método recomendable para el análisis de la clasificación de presas. Sin embargo, en el caso de clasificaciones obvias y para sustentar el juicio ingenieril y dotarle de consistencia y objetividad, se recomienda el empleo de métodos y modelos simplificados. Sólo se admitirán propuestas de clasificación sin el empleo de ningún tipo de método de cálculo de la onda de rotura en casos de presas que resulten clasificadas en la categoría A, por tener agua abajo núcleos urbanos que claramente resulten afectados gravemente por una posible rotura de presa, sin que exista ningún tipo de duda sobre dicha afección. Incluso en este caso, la propuesta de clasificación debe estar documentada y justificada.

De entre los numerosos modelos existentes, se recomienda el empleo del modelo DAMBRK o de posibles versiones posteriores actualizadas, del National Weather Service (NWS) USA, por ser el modelo actualmente más versátil, experimentado, práctico y, también, el recomendado en normativas de otros países. Adicionalmente, estos modelos tienen la consideración de públicos.

Este método utiliza métodos paramétricos para el establecimiento y progresión de la brecha de rotura y métodos hidráulicos de análisis de régimen variable para el estudio del avance de la onda de rotura y la determinación de las áreas de inundación.

Proporciona directamente resultados en términos de cota máxima de lámina alcanzada y velocidad del agua, por lo que la determinación del área inundada y de las características de la inundación es directa.

Alternativamente, es preciso señalar que existen otros programas o procedimientos en el mercado con prestaciones al menos semejantes y cuya validez, por tanto, es obvia, si bien en estos casos será preciso documentar en la propia propuesta la justificación de la validez.

Los modelos antes citados son unidimensionales, por lo que en algunos casos extremos, caracterizados por secciones altamente irregulares, valles muy sinuosos con cambios muy bruscos en las secciones o llanuras de inundación, donde exista un flujo bidimensional acusado y sea necesario estudiar con más detalle las condiciones de propagación de la onda, puede ser necesario recurrir a modelos dinámicos bidimensionales o aproximaciones cuasi-bidimensionales.

No se ha considerado de interés incluir la descripción del resto de métodos simplificados y mixtos. Éstos pueden consultarse en detalle en [3].

- Selección del modelo según [4]:

En general el análisis de la propagación de la onda causada por la rotura será abordado mediante simulación numérica, si bien no se excluye la posibilidad de recurrir, en algunos casos especiales, a la utilización de modelos físicos. En principio será suficiente la utilización de modelos unidimensionales.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la propagación en las llanuras de inundación o a través de secciones muy irregulares, con cambios bruscos, o en cauces muy sinuosos, el tipo de flujo es muy complejo y pueden presentarse la siguientes circunstancias:

- Flujo variable marcadamente bidimensional, con llanuras de inundación alejadas del flujo principal.
- Aparición simultánea, en distintos tramos, de regímenes rápido y lento, con transición entre ambos que se modifica en el espacio a lo largo del tiempo.
- Coexistencia simultánea, en distintos tramos, de regímenes gradualmente y rápidamente variable, cuya posición evoluciona en el tiempo.

Dada la complejidad del problema no se puede plantear, en general, la elaboración de un modelo específico, su calibración y validación para cada caso concreto, siendo por tanto necesario recurrir a alguno de los modelos existentes.

Las circunstancias anteriores, que hacen que las simplificaciones que se puedan introducir sean completamente dependientes del caso concreto analizado, unidas a la constante evolución que se está produciendo en la modelística matemática hacen que no se recomiende ningún modelo concreto para su uso general. No obstante, como ayuda a la selección del modelo a

emplear se recomienda que se utilice el estudio [8], en el que se describen y evalúan 27 modelos existentes en la actualidad (ver tabla siguiente), de los cuales únicamente algunos están normalmente extendidos en la práctica y son accesibles comercialmente.

Nº	Agencia	Nombre del modelo
1	USA / National Weather Service	DAMBRK (original)
2	USA / National Weather Service	SMPDBK (Simplifield Dambreak)
3	BOSS International	BOSS DAMBRK
4	HAESTAD METHODS	HAESTAD DAMBRK
5	Binnic & Partners	UKDAMBRK
6	Department of Weather Affairs and Forestry Pretoria, South Africa	DWAF-DAMBRK
7	USA / COE Hydrologic Engineering Center	HEC-programs (HEC-RAS)
8	Tams	LATIS
9	IWHR, PR China	DBK 1
10	IWHR, PR China	DBK 2
11	Royal Institute of Technology, Stockolm	TVDDAM
12	Cemagref	RUBAR 3
13	Cemagref	RUBAR 20
14	Cemagref	CASTOR
15	Delf Hydraulics	SOBEK
16	Delf Hydraulics	DELFT 2 D
17	Consulting Engineers Reiter Ltd.	DYX 10
18	ANU-Reiter Ltd	DYNET ANUFLOOD
19	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	RECAS
20	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	FLOOD 2D
21	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	STREAM
22	Danish Hydraulic Institute	MIKE 11
23	Danish Hydraulic Institute	MIKE 21
24	ETH Zürich	FLORIS
25	ETH Zürich	2D-MB
26	EDF-Laboratoire National Hydraulique	RUPTURE
27	EDF-Laboratoire National Hydraulique	TELEMAC-2D

Figura 2.1 Modelos existentes (ICOLD [8])

Asimismo, como apoyo a la selección del programa a utilizar, a continuación se presenta un conjunto de consideraciones en relación con los aspectos fundamentales a tener en cuenta.

1. Tipo de modelo.

En general siempre en las presas clasificadas en categoría A, el modelo a utilizar será hidráulico, completo y dinámico. El modelo debe ser hidráulico en contraposición a hidrológico ya que esta última aproximación no puede considerarse suficiente en la mayoría de los casos para la estimación de niveles de agua, especialmente ante problemas del tipo aquí planteado, en los que el tipo de flujo es complejo y, por tanto, no son válidas las parametrizaciones de las simplificaciones utilizadas. El modelo será dinámico, es decir, teniendo en cuenta como variable el tiempo y en contraposición al análisis en régimen permanente o variado, ya que incluso en aquellos posibles casos (rotura de las compuertas del desagüe de fondo, por ejemplo) en que la previsión de niveles máximos pudiera abordarse mediante análisis más simples es preciso un análisis temporal, derivado de la necesidad de evaluar el tiempo de llegada de la onda. El modelo ha de ser completo en contraposición a simplificado, resolviendo directamente las ecuaciones dinámicas del movimiento, ya que, en general, la aproximación que representan estos modelos simplificados no puede considerarse suficiente para elaborar la zonificación territorial; como ejemplo cabe citar que comparaciones realizadas entre los resultados obtenidos por los modelos DAMBRK (completo) y SMPDBK (simplificado) del U.S National Weather Service, probablemente los más clásicos de ambos tipos, permiten afirmar que presentan diferencias medias del 10-20 % en términos de caudal en los casos sencillos, sin secciones de control. Como consecuencia de lo expuesto, en general únicamente pueden considerarse como válidos aquellos modelos que resuelven las ecuaciones de Saint Venant de movimiento gradualmente variable mediante métodos numéricos suficientemente contrastados y validados.

2. Tipo de régimen.

En general, en el análisis hidráulico de la onda de rotura coexisten simultáneamente tramos en los que los regímenes son subcrítico y supercrítico alternativamente, no manteniéndose constante en el tiempo la posición espacial de la transición. Como consecuencia, el modelo permitirá el análisis simultáneo de los regímenes subcrítico y supercrítico con transición no fija, salvo en casos muy especiales en que pueda establecerse a priori que no existe cambio de régimen o que éste se asocia a una sección determinada, constante en el tiempo.

3. Tratamiento del cauce seco.

En algunas situaciones será preciso analizar casos en que la situación inicial corresponde a cauce seco o desaguando un caudal varios ordenes de magnitud inferior al caudal punta final, lo que da lugar bien a la necesidad de tratar una singularidad (llenado de un cauce seco), bien a problemas numéricos de convergencia que no todos los programas existentes son capaces de resolver. Respecto a esta cuestión no es posible establecer un criterio fijo de requisitos a cumplir por el modelo ya que mientras que en muchas ocasiones es suficiente suponer, sin disminución

sensible de la calidad de los resultados, la existencia de un caudal base inicial ficticio suficientemente pequeño para no incidir en los resultados y suficientemente grande para evitar los problemas numéricos, en otros puede no ser válida la hipótesis anterior.

4. Tipo de flujo.

En general, serán preferibles los modelos unidimensionales o los bidimensionales, ya que aquellos proporcionan precisión suficiente mientras que éstos, aparte de introducir una gran complejidad adicional, no sólo modelística sino también de disponibilidad de datos básicos (topografía, rugosidades direccionales, etc.), suelen obligar a simplificaciones adicionales para tener en cuenta la segunda dimensión.

En muchas ocasiones aparece en el análisis unidimensional la necesidad de tomar en consideración, aun cuando sea de manera aproximada, efectos bidimensionales. Los programas actuales suelen abordar este problema mediante dos técnicas diferentes: la consideración específica de llanuras de inundación y las denominadas aproximaciones quasibidimensionales.

La consideración de llanuras o zonas de inundación, que en la mayor parte de los casos puede ser una aproximación suficiente, implica la asunción de la existencia de determinadas áreas que únicamente son capaces de almacenar agua sin participar en el movimiento y que se relacionan únicamente con un tramo del cauce.

Por su parte, las aproximaciones quasibidimensionales, que en general representan una mayor exactitud en el análisis, implican el establecimiento de distintas conexiones unidimensionales simplificadas que reducen el fenómeno bidimensional a otro unidimensional pero con estructura mallada y con distintas simplificaciones para evaluar el flujo circulante a través de las conexiones de la malla distintas de las asociadas al cauce.

La selección de la aproximación a adoptar es completamente dependiente del caso a analizar, si bien, en términos generales, puede considerarse suficiente la consideración de llanuras de inundación, señalándose que la consideración de aproximaciones quasibidimensionales obliga a realizar un esfuerzo adicional en la definición topográfica del territorio.

5. Tratamiento de régimen rápidamente variable.

Típicamente, en los casos de análisis de rotura rápida de presas (presas bóveda y gravedad), el frente de la onda de rotura está caracterizado por un régimen rápidamente variable en contraposición al gradualmente variable que se expresa mediante las ecuaciones de Saint Venant. Existen asimismo otros casos en que se presenta el régimen rápidamente variable, en general asociados a fenómenos locales (estructuras transversales al cauce o estrechamientos muy bruscos de éste).

Los modelos recientes más extendidos ya incorporan el tratamiento de la onda de choque en su formulación, si bien en algunos de ellos su tratamiento lleva consigo un riesgo de inestabilidad numérica.

Como consecuencia de lo anterior, en general, se recomienda emplear programas que lleven incorporado un tratamiento específico de las ondas de choque, salvo que pueda justificarse que su no consideración no introduce errores significativos.

6. Tratamiento del lecho móvil.

Aún cuando la consideración de los procesos de erosión-sedimentación asociados a la onda de rotura debe representar una mayor aproximación al análisis hidráulico respecto a la consideración de un análisis con lecho fijo, este último tipo de análisis es a menudo conservador y, por otra parte, los modelos de lecho móvil son todavía excesivamente complejos, de difícil aplicación a situaciones reales y no están implementados en los programas de cálculo accesibles.

Por las razones anteriores, se considera suficiente la utilización de modelos con lecho fijo, si bien en los casos en que sea de prever una incidencia importante de los procesos de erosión-sedimentación deberán analizarse cualitativamente y de forma aproximada sus efectos.

7. Otros aspectos.

Aun cuando aparentemente no tengan incidencia en la calidad de los resultados, existen otros factores a tener en cuenta, relativos a la facilidad del manejo del programa, que, en la práctica, inciden de una manera apreciable. Desde este punto de vista, se tendrán en cuenta, a la hora de seleccionar el programa, criterios tales como la amigabilidad, el tipo y forma de introducción de datos, la potencia de los posibles preprocesadores, las posibilidades de comprobación de datos y de seguimiento del proceso de cálculo, la potencia de los posibles postprocesadores y la forma de presentación de los resultados.

Si bien el objetivo de estos criterios es servir de ayuda a la selección del modelo o modelos matemáticos que pueden ser de aplicación a un caso concreto, no hay que olvidar que lo que realmente otorga fiabilidad a un determinado modelo es su validación en casos reales semejantes al que se plantea estudiar.

3.2.5 Escenarios de rotura

Los escenarios extremos planteados son los siguientes:

- Rotura sin avenida: no coincidencia con avenida y embalse en su máximo nivel normal de explotación. ([3],[4])

- Rotura en situación de avenida: presa desaguando la avenida de proyecto (en su caso, la avenida extrema) y nivel del embalse en coronación. ([3],[4])
- Rotura de compuertas: embalse inicialmente en su nivel máximo normal (NMN) y en régimen normal de explotación. Rotura de compuertas secuencial y progresiva de 5 a 10 minutos para la totalidad de las compuertas. ([4])
- Rotura encadenada de presas. ([3])

La situación de avenida considerada corresponde a la avenida de proyecto de la presa, o, en su caso, la avenida extrema. En la actualidad, la avenida de proyecto es, en la mayor parte de los casos, la correspondiente a un período de retorno de 500 años.

En el escenario correspondiente a rotura en situación de avenida únicamente deben considerarse los daños incrementales debidos a la rotura, es decir, el exceso de daños que se producirían por efecto de la onda de rotura respecto a los que ya se hubieran producido debido al desagüe de la avenida considerada.

La situación que se crea en el escenario de rotura encadenada de presas es compleja y existe una interdependencia mutua en las relaciones entre las presas de agua arriba y aguas abajo y los posibles daños potenciales, por lo que es necesario contemplar de manera conjunta y coordinada la propagación y efectos de la onda de avenida o de las diversas ondas de avenida de las diferentes roturas.

Las diferentes situaciones posibles son muy numerosas y deben de analizarse caso a caso en función de las diversas situaciones analizando las afecciones potenciales en cada tramo, y adoptando siempre criterios de tipo conservador. En general si la rotura de una presa situada aguas arriba puede provocar la rotura de otras aguas abajo, la categoría de la presa de aguas arriba será como mínimo la misma que la mayor de las categorías de las presas de aguas abajo.

3.2.6 Forma y dimensiones de la brecha. Tiempos de rotura.

El modo de rotura y la forma y evolución de la brecha dependen del tipo de presa, siendo la hipótesis más común que en las presas de hormigón o mampostería la rotura es prácticamente instantánea, y total o parcial. Usualmente total en las presas bóveda y parcial por bloques en las presas de gravedad o contrafuertes. En cambio en las presas de materiales sueltos la rotura es progresiva en el tiempo y con evolución desde formas geométricas iniciales hasta la práctica totalidad de la presa.

En la actualidad existen diversos modelos que simulan el fenómeno de formación y progresión de la brecha, siendo el más empleado el modelo de la progresión lineal, en el que se contemplan diversos parámetros geométricos y temporales, recomendándose que en principio se adopten los siguientes modos de rotura y parámetros ([3],[4]):

- a) Presas bóveda y arco.
- Tiempo de rotura: 5 a 10 minutos (instantánea).
 - Forma de rotura: Completa, siguiendo la forma de la cerrada, admitiéndose la geometrización a trapecial.
- b) Presas de gravedad y contrafuertes.
- Tiempo de rotura: 10 a 15 minutos (instantánea).
 - Forma de rotura: Rectangular.
 - Profundidad de la brecha: hasta el contacto con el cauce en el pie.
 - Ancho: el mayor de los dos valores siguientes:
 - 1/3 de la longitud de coronación.
 - 3 bloques de construcción.
- c) Presas de materiales sueltos (V =volumen de embalse, h =altura de presa)
- Tiempo de rotura: T (horas) = $4,8 \cdot V^{0.5}$ (Hm^3) / h (m). En caso que la aplicación de la expresión anterior conduzca a un resultado superior a 5 horas, el tiempo de rotura deberá ser evaluado con especial detenimiento.
 - Forma de rotura: Trapecial
 - Profundidad de la brecha: hasta el contacto con el cauce en el pie.
 - Ancho medio de la brecha: b (m) = $20 \cdot (V (Hm^3) - h (m))^{0.25}$.
 - Taludes: 1:1 (H:V).
- d) Presas mixtas.

En las presas mixtas se formulará la rotura de cada una de sus partes, seleccionando el modo de tipo de rotura que de lugar a un mayor caudal punta en el hidrograma de rotura.

Sin embargo, en los casos en que existan dudas sobre la clasificación final puede ser conveniente realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros señalados, siendo el juicio ingenieril el que adopte la formulación más adecuada. En general, la forma geométrica de la brecha es el parámetro menos importante, siendo el ancho final de la brecha y el tiempo de rotura los que pueden dar lugar a variaciones más significativas.

3.2.7 Análisis del riesgo

- Estimación de riesgos aguas abajo ([3],[4]):

La cartografía de las zonas de inundación potencial debe reflejar el estado actual de ocupación, principalmente en lo referente a viviendas, estructuras habitadas y servicios esenciales. En los casos en que estén aprobados planes

de urbanismo u otras figuras de planeamiento debe tenerse en cuenta su existencia a efectos de prever el estado futuro de la ocupación. Las afecciones y daños potenciales serán función de las variables hidráulicas obtenidas con la modelización hidráulica de la propagación de la onda de rotura teniendo que evaluar, en general, los efectos del calado y la velocidad. Para ello se emplearán como ayuda al juicio ingenieril relaciones empíricas entre productos del calado y la velocidad y afecciones, o curvas como las mostradas en las figuras 2.2 y 2.3 en las que se indican los límites de afección a vidas, en núcleos urbanos y viviendas o en campo abierto, según los valores de los calados y velocidades.

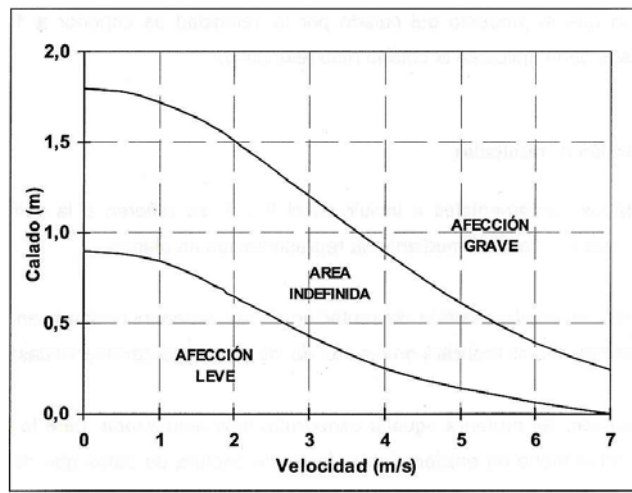


Figura 2.2 Evaluación de riesgo en áreas de viviendas

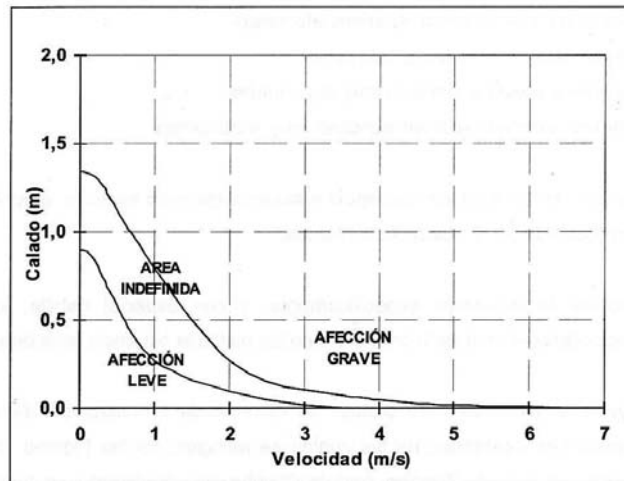


Figura 2.3 Evaluación de riesgo en campo abierto

- Criterios para la definición de categorías ([3]):

Se establece que la clasificación de las presas se basará en una evolución progresiva de los daños potenciales, desde la categoría C hacia la A. Se entiende por análisis de la evolución progresiva el proceso según el cual en primer lugar se evalúa la posibilidad de incluir el aspecto considerado en la

Categoría C, según su definición estricta. Caso de no responder a los criterios que definen la Categoría C, se establece que la presa debe incluirse en las Categorías B o A, repitiendo el proceso según los criterios definitorios de la Categoría B. Los criterios generales de clasificación son los siguientes.

- a) Categoría C: Puede producir solo incidentalmente pérdida de vidas humanas. No puede afectar a vivienda alguna y solo de manera no grave a algún servicio esencial. Los daños medioambientales que puede producir deben ser poco importantes o moderados. Únicamente puede producir daños económicos moderados.
- b) Categoría B: Puede afectar a un número de viviendas inferior al que se considere mínimo para constituir una afección grave a un núcleo urbano o a un número de vidas equivalente, o producir daños económicos o medioambientales importantes. Puede afectar solo de manera no grave a alguno de los servicios esenciales de la comunidad.
- c) Categoría A: Supera la categoría anterior, pudiendo afectar gravemente, al menos, a un núcleo urbano o número de vidas equivalente, con lo que pudiera poner en situación de riesgo a un número de vidas humanas semejante al que ocupa el número de viviendas considerado como límite máximo para la categoría B, o afectar gravemente a alguno de los servicios esenciales de la comunidad o producir daños económicos o medioambientales muy importantes.

Los aspectos a analizar son, por tanto:

- Riesgo potencial a vidas humanas. Población en riesgo.
- Afecciones a servicios esenciales.
- Daños materiales.
- Daños medioambientales.

Se considerará como afección grave aquella que no puede ser reparada de forma inmediata, impidiendo permanentemente y sin alternativa el servicio, como consecuencia de los potenciales daños derivados del calado y la velocidad de la onda.

3.2.8 Presentación de resultados

- Zonificación territorial. Delimitación de las áreas de inundación potencial ([4]):

Los planos de zonificación territorial y de delimitación de la zona inundable se elaborarán sobre cartografía oficial entendiendo como tal la editada por el Instituto Geográfico Nacional, por el Servicio Cartográfico del Ejército o por los servicios cartográficos de las Comunidades Autónomas, en su versión más actualizada. Como criterio general, se establece que la presentación de resultados se realice en los planos oficiales a escala 1:25.000, y en el caso de que no existan, a escalas superiores comprendidas entre 1:10.000 y 1:25.000, si bien en algún caso muy concreto puede justificarse la utilización de escalas distintas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta cartografía de base

utilizada para la presentación de resultados puede ser la utilizada en el estudio y modelización de la propagación de la onda de rotura, que en general será realizado con mayor detalle.

Como resumen del análisis de la zonificación territorial y de la delimitación de la zonas potencialmente inundables se presentarán en el Capítulo correspondiente de los Planes de emergencia de presas, de forma simple y resumida, para cada una de las hipótesis de rotura los siguientes mapas:

1. *Mapa con indicación de la envolvente de la zona inundable y de los tiempos de llegada de la onda de rotura.*

En este plano se representará la máxima extensión de la zona potencial de inundación a lo largo del tiempo, y sobre esta zona se reflejará, mediante una línea transversal al cauce la posición del frente de onda en intervalos horarios computados desde el momento del inicio de la rotura, y con la salvedad de que la primera hora se dividirá en dos semiintervalos de 30 minutos. En estos mapas y en las secciones o zonas significativas de singular importancia, tales como poblaciones, zonas industriales, servicios esenciales, vías de comunicación y en aquellos puntos que han motivado la clasificación de la presa se indicarán y enmarcarán las cotas de referencia, el calado y cotas máximas, el caudal máximo, la velocidad máxima y los tiempos iniciales y punta de llegada de la onda de rotura.

2. *Mapas de inundación progresiva correspondientes a la áreas potencialmente inundables a los 30 minutos, 1 hora y horas siguientes.*

En estos mapas y en las secciones o zonas significativas o de singular importancia, talos como poblaciones, zonas industriales, servicios esenciales, vías de comunicación y en aquellos puntos que han motivado la clasificación de la presa se indicarán y enmarcarán las cotas de referencia, los calados y cotas, los caudales y velocidades correspondientes a los máximos relativos asociados a una hora determinada, así como a los tiempos de llegada de la onda de rotura y el tiempo punta correspondiente a los máximos relativos temporales.

Los planos se presentarán en formato no superior al UNE DIN A3.

Además de definir las zonas de inundación, en los planos aparecerán reflejados los puntos o zonas significativas o de singular importancia sobre los que se realizará la estimación de Daños o Análisis de Riesgos. Éstos se identificarán claramente con una nomenclatura específica para su referenciación y localización.