

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## METODOLOGÍA PARA ESTRUCTURAR MODOS DE FALLO EN SISTEMAS PRESA-EMBALSE

Luis García Kabbabe<sup>1</sup>  
Luis Chaparro Carrasquel<sup>2</sup>  
Ignacio Escuder Bueno<sup>3</sup>  
Armando Serrano Lombillo<sup>4</sup>

*RESUMEN: La identificación de modos de fallo constituye una de las piedras angulares para la aplicación del análisis de riesgos a la seguridad de presas y embalses. La necesidad de capturar todos los mecanismos de fallo de la presa, vincularlos a los escenarios de sollicitación y a las consecuencias potenciales, así como de incluir la capacidad de detección e intervención en su caso, requiere de un alto nivel de consistencia en las tareas de identificación y definición de los mismos.*

---

<sup>1</sup> Master en Ingeniería Hidráulica-UPV. Ingeniero Civil. Universidad Politécnica de Valencia, OFITECO.

<sup>2</sup> Master en Ingeniería Hidráulica-UPV. Ingeniero Civil. OFITECO, Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>4</sup> Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. DEA. Universidad Politécnica de Valencia.

# 1. INTRODUCCIÓN

La identificación de modos de fallo, constituye una de las fases más importantes del análisis de riesgos de presas.

Con independencia de ello, resulta de gran utilidad si se realiza de forma acoplada con los denominados Informes Anuales de Comportamiento de Presas. Dado que no existe una guía técnica que indique el contenido de los informes anuales, (Núñez et al, 2008) establecieron una metodología de redacción de los mismos que contemplaba los siguientes aspectos:

- Estudio minucioso del Archivo Técnico.
- Revisión de la documentación referente desde el punto de vista de la auscultación y comportamiento de la presa.
- Fase de recogida y análisis de los registros de auscultación realizada por recopilación de información preexistente.
- Inspección realizada a la presa en estudio junto con personal de la explotación en las que se examina el sistema de auscultación y la obra civil.
- Estudios de modelación estadística de las variables de control incluyendo la parametrización del comportamiento de las mismas.
- Interpretación ingenieril de los resultados modelados.
- Identificación de las necesidades de inspección y análisis.
- Fase de elaboración de los documentos.

Profundizando algo más en lo que implica “parametrizar el comportamiento” en el ámbito de la ingeniería de presas, este trabajo podría definirse como el proceso en el cual se obtienen los parámetros de una ecuación empírica que rige el comportamiento de una variable de control de la presa (filtraciones, subpresiones, desplazamientos, etc.) en función generalmente del tiempo transcurrido desde una fecha origen, los niveles de embalse, las temperaturas medidas “in situ” y la precipitación.

El valor de obtener estas ecuaciones reside en proporcionar un sistema de control de las distintas variables medidas en la presa, poniendo de manifiesto los fenómenos anómalos que produzcan desviaciones respecto de lo esperado.

Por otra parte, se puede definir modo de fallo como la secuencia particular de eventos que puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema presa - embalse o una parte del mismo. Esta serie de sucesos debe estar asociada a un determinado escenario de sollicitación y tendrá una secuencia lógica, la cual constará de un evento inicial desencadenante, una serie de eventos de desarrollo o propagación y culminará por la rotura de la presa (o la rotura de algún elemento con consecuencias económicas y/o potencialmente en términos de vidas humanas).

El presente artículo describe una herramienta que permite, por una parte, estructurar la definición de modos de fallo y, por otra, vincularlos al sistema de auscultación y control, reforzando los vínculos entre la propia identificación de modos de fallo y la parametrización del comportamiento observado.

## **2. ANTECEDENTES**

Durante los últimos 15 años los ingenieros especialistas en presas han desarrollado metodologías específicas para complementar los programas de seguridad de presas y embalses con nuevas técnicas apoyadas en el análisis cualitativo de modos de fallo, con la finalidad de mejorar la efectividad en la seguridad, estudiando el comportamiento de la presa en la totalidad de los escenarios de sollicitación posibles.

Entre los numerosos documentos en los que se han ido plasmando estas investigaciones cabe mencionar los trabajos de la Comisión Federal Reguladora de Energía de los Estados Unidos de América (FERC, 2005) y la Tesis Doctoral realizada por Manuel G. de Membrillera en la Universidad Politécnica de Valencia (Membrillera, 2007).

La herramienta desarrollada por la UPV en el presente trabajo ayuda a estructurar, codificar, describir detalladamente y vincular con la auscultación los potenciales modos de fallo en presas de hormigón y materiales sueltos.

La “estructuración” propuesta está basada en la metodología planteada por Fell (Fell et al, 2004), que consiste en describir por completo el mecanismo de fallo, partiendo por identificar la zona y el fenómeno de inicio desencadenante, seguidamente la continuación y progreso del mismo hasta llegar a la rotura de la presa.

Además, la herramienta vincula de forma directa los fenómenos de inicio y desarrollo de los modos de fallo con las variables auscultables más influyentes y con la instrumentación que permite detectar y medir la evolución del mecanismo de rotura. Por último, se plantea una tabla resumen, elaborada a partir de las recomendaciones de la Guía Técnica N° 7 (CNEGP, 2005), con los principales instrumentos instalados en las presas y la finalidad de la medición de los mismos.

## **3. HERRAMIENTA PARA ESTRUCTURAR MODOS DE FALLO EN SISTEMAS PRESA-EMBALSE Y VINCULARLOS CON EL SISTEMA DE AUSCULTACIÓN.**

El proceso de identificación de modos de fallo requiere un conocimiento global del sistema presa-embalse, siendo esencial entender y visualizar el comportamiento de cada uno de los componentes del conjunto, para así detectar la manera en que estos elementos puedan dejar de desempeñar su función considerando todas las sollicitaciones posibles.

Actualmente y en la mayoría de los casos, resulta interesante ver como distintos autores al definir un modo de fallo hacen referencia exclusivamente al mecanismo último de rotura (p.e. para presas de hormigón, deslizamiento del bloque central), dejando en un segundo plano la forma en que se inició el proceso y como fue el desarrollo del mismo. Esta situación fijó el punto de partida para la creación de una tabla de trabajo definida como Herramienta para Estructurar Modos de Fallo y Vincularlos con el Sistema de Auscultación.

Ésta es un instrumento que facilita la descripción, estructuración y codificación de los potenciales modos de fallo en sistemas presa-embalse. Además, la herramienta vincula de forma directa cada fenómeno de inicio o desarrollo que pueda originarse en el sistema con las variables auscultables más influyentes. Este enlace con el sistema de auscultación permite detectar y medir, con suficiente tiempo de reacción, anomalías en el comportamiento de la presa o la posible evolución del mecanismo de rotura.

La herramienta no pretende capturar la totalidad de los mecanismos de rotura en sistemas presa-embalse, más bien su finalidad radica en que no se escape ningún escenario, componente, fenómeno de inicio o desarrollo que contemple un modo de fallo.

### 3.1. DESCRIPCIÓN Y USO DE LA HERRAMIENTA.

A continuación se describen las categorías que conforman la herramienta para estructurar modos de fallo y la Figura nº 3.1 muestra un esquema conceptual de mencionada herramienta.

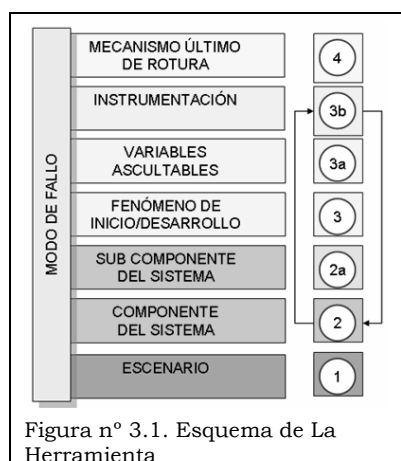


Figura nº 3.1. Esquema de La Herramienta

**Escenarios:** son las fuerzas que pueden actuar o incidir sobre el sistema presa-embalse debido a las sollicitaciones externas. De forma general suelen definirse tres escenarios de sollicitación partiendo de: eventos de naturaleza hidrológica, eventos de naturaleza sísmica y condiciones de explotación normal del embalse, sin descartar otras acciones naturales o antrópicas que puedan incidir sobre el correcto funcionamiento del sistema.

**Componentes y Sub-Componentes del Sistema Presa-Embalse:** esta categoría identifica los elementos susceptibles a fallo donde se desencadena el mecanismo de rotura. Los componentes del sistema se muestran en la Figura nº 3.2 y están definidos de la siguiente manera:

*Cerrada:* contempla la cimentación y los estribos del emplazamiento de la presa, es decir, todo aquello de origen natural y geológico que puede fallar en este sector.

*Estructuras:* contempla la cimentación y los estribos del emplazamiento de la presa, es decir, todo aquello de origen natural y geológico que puede fallar en este sector.

*Estructuras:* se refiere a la infraestructura de retención como tal, e incluye todo lo construido por el hombre.

*Órganos de desagüe y tomas:* este componente contempla toda la obra civil encargada de aliviar y también hace referencia a los equipos oleo-electromecánicos entre los cuales están las compuertas, válvulas, turbinas, etc.

*Vaso de almacenamiento:* este elemento incluye el sistema montañoso y las laderas del embalse.

**Fenómenos de Inicio o Desarrollo:** referidos a los procesos que describen claramente un modo de fallo, cada uno de estos mecanismos se propagan o

evolucionan en alguno de los componentes y subcomponentes del sistema presa-embalse.

Como fenómenos de inicio o desarrollo en las presas de hormigón es posible encontrar: erosión interna, fisuración, ineficacia en la pantalla impermeable, colmatación de drenes, erosión a pie de presa, pérdida de operatividad de compuertas, deslizamiento de laderas entre otros. Para el caso de las presas de materiales sueltos: erosión interna, desplazamiento, agrietamiento, fracturamiento hidráulico, etc.

**Variables auscultables más influyentes:** son las variables de control que vinculan los fenómenos de inicio o desarrollo con el sistema de instrumentación.

**Instrumentos:** son los aparatos capaces de detectar la evolución de los fenómenos de inicio o desarrollo de los modos de fallo.

**Mecanismo Último de Rotura:** es el proceso final para que se produzca el fallo total de la presa.

Para el uso de la herramienta, tanto para presas de materiales sueltos como para presas de hormigón, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Identificar el *Escenario* de sollicitación que activa y donde se desarrolla el modo de fallo.
2. Especificar en cual de los *Componentes y Subcomponentes del sistema presa-embalse* ocurre el *Fenómeno de Inicio o Desarrollo*.
3. Describir el mecanismo, asociarlo y codificarlo según la categoría Fenómeno de Inicio o Desarrollo.
  - 3.a. Asociar el mecanismo descrito en el paso anterior con la categoría *Variables Auscultables más Influyentes*.
  - 3.b. Vincular el *Fenómeno de Inicio o Desarrollo* con la *Instrumentación*.
4. Repetir los pasos 2, 3, 3.a. y 3.b. según se desencadenen o propaguen los eventos hasta establecer el *Mecanismo Último de Rotura*.

En las Figuras nº 3.3 y 3.4 se presentan partes de las herramientas mencionadas anteriormente.

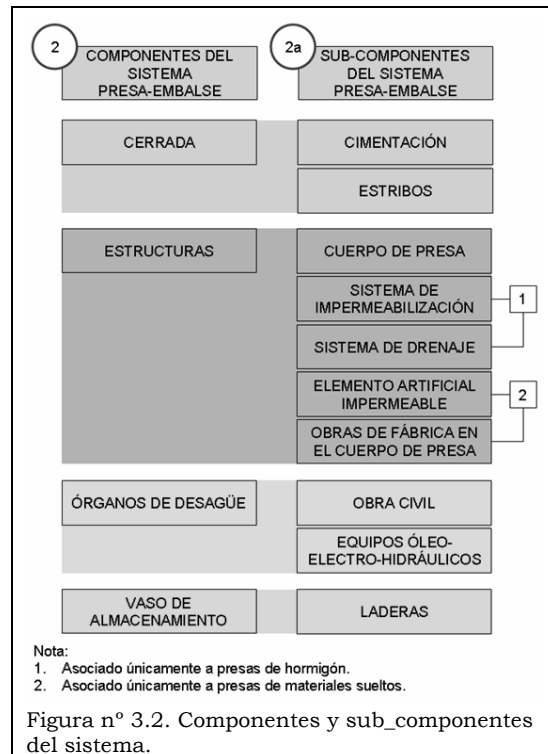
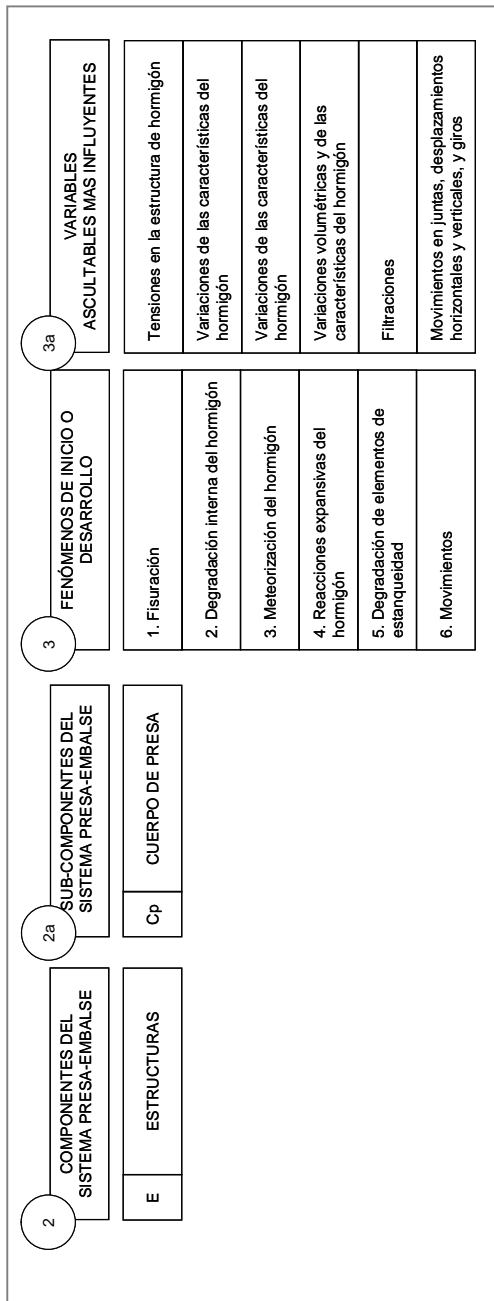
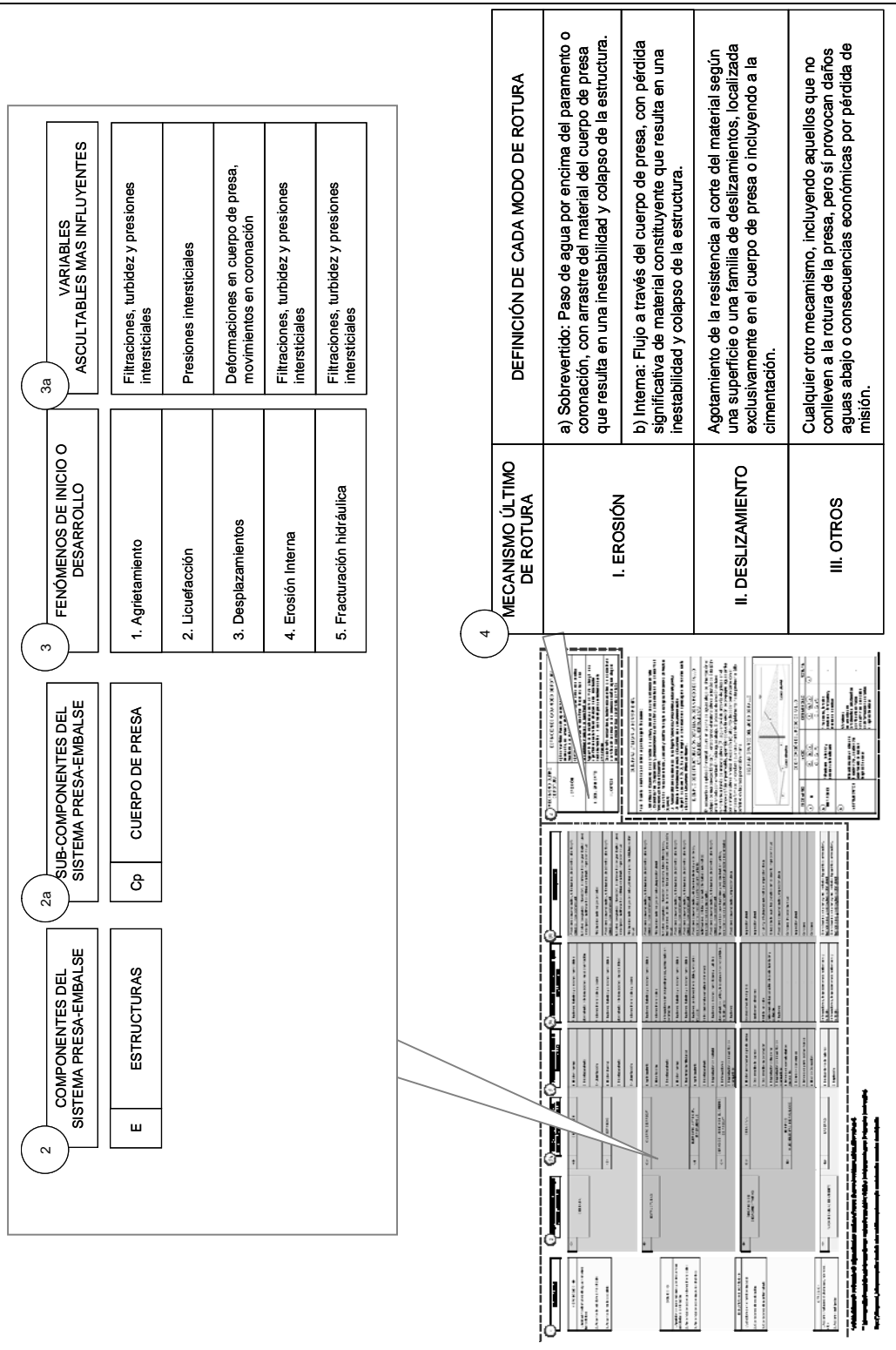


Figura n° 3.3. Herramienta para estructurar modos de fallo, en presas de hormigón, y vincularlos con el sistema de auscultación.



4	MECANISMO ÚLTIMO DE ROTURA	DEFINICIÓN DE CADA MODO DE ROTURA
I. DESLIZAMIENTO	Agotamiento de la resistencia al corte en una determinada superficie (hormigón o roca) o composición de superficies, provocando el desplazamiento hacia aguas abajo de la presa o parte de ella.	
II. HUNDIMIENTO	Agotamiento de la resistencia, desplazamiento de discontinuidades, colapso de cavidades o excesiva deformabilidad del cimiento provocando el desplazamiento sub-vertical de la presa o parte de ella.	
III. AGRIETAMIENTO	Agotamiento resistente del hormigón provocando fisuras y grietas del mismo.	
IV. OTROS	Cualquier otro mecanismo incluyendo a aquellos que no conlleven a la rotura de la presa, pero si provoquen daños aguas abajo o consecuencias económicas por pérdida de misión.	

Figura n° 3.4. Herramienta para estructurar modos de fallo, en presas de materiales sueltos, y vincularlos con el sistema de auscultación.



## 5. CASOS DE APLICACIÓN

### 5.1. PRESA DE HORMIGÓN.

Las características generales del presente caso de aplicación son las siguientes: presa de hormigón de gravedad en masa convencional, planta recta y graves problemas de impermeabilización del cimiento a lo largo de su historia.

Los resultados de un análisis del comportamiento de las variables de control refleja que: los drenes se encuentran colmatados, las subpresiones son superiores al 60% de la carga hidrostática y los movimientos radiales según colimación topográfica presentan un leve movimiento irrecuperable hacia aguas abajo. El modo de fallo queda definido y estructurado según la herramienta de la Figura nº 3.3 de la siguiente manera:

<b>Escenario: Hidrológico y Explotación Normal</b>	
<p>Debido a una <b>colmatación en los drenes</b> (1) y pudiendo concurrir con una <b>pérdida en la eficacia de la impermeabilización</b> del cimiento (1), se incrementan las presiones en la cimentación, de forma tal, que la combinación entre el empuje hidrostático y las subpresiones (2), producen <b>desplazamientos</b> en cimentación y <b>movimientos</b> diferenciales en el cuerpo de la presa, hasta ser capaz de generar una <b>grieta de tracción</b> (3) en el pie del contacto presa-cimiento, formando un plano débil en dicho contacto donde se agote la resistencia a cortante y se produzca el <b>deslizamiento</b> del bloque central de la presa.</p>	<p>El diagrama ilustra un perfil de una presa de hormigón sobre un cimiento. Se muestran los niveles de agua upstream y downstream. Un drenaje vertical (1) está colmatado, lo que contribuye a las subpresiones (2) que actúan sobre el cimiento. Una grieta de tracción (3) se ha formado en el pie del contacto entre la presa y el cimiento, indicando un potencial deslizamiento del bloque central de la presa.</p>

ESCENARIO	INICIO	DESARROLLO	ROTURA
H-N	E-Si(1) / E-Sd(1)	C-Ci(4) / E-Cp(6) / C-Ci(2)	I
<b>VARIABLES</b>	Subpresiones y filtraciones en las galerías (caudal procedente de los drenes).	Tensiones. Movimientos y deformaciones en la cimentación. Movimientos en juntas, desplazamientos horizontales y verticales, y giros.	-
<b>INSTRUMENTOS</b>	Piezómetros abiertos, manométricos o de cuerda vibrante, aforadores e inspección visual.	Extensómetros de varillas, nivelación y colimación topográfica, triangulación geodésica, clinómetros, medidor de juntas e inspección visual	-

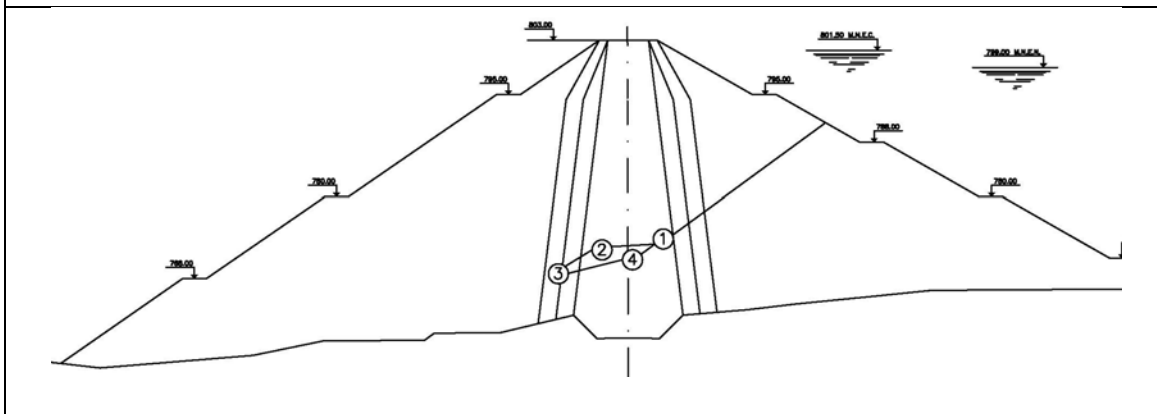


## 5.2. PRESA DE MATERIALES SUELTOS.

En este caso se estudia una presa con las siguientes características generales: Presa de materiales sueltos heterogénea con núcleo de arcilla y filtros aguas arriba y aguas abajo del núcleo. Los resultados de un estudio minucioso del comportamiento de las variables de control, y de la historia de la presa, revelan que uno de los puntos susceptibles a fallo está relacionado con el núcleo. La definición del modo de fallo para este caso, quedaría definido según la herramienta de la figura n° 3.4 de la siguiente manera:

### **Escenario: Hidrológico y Explotación Normal**

En la zona inferior del núcleo de la presa principal, ocurre un aumento de las presiones intersticiales que genera un **fracturamiento hidráulico** en una capa de material inestable (1), produciendo un efecto de acuñamiento del agua que favorece el **agrietamiento** dentro del núcleo (2) y el gradiente hidráulico impuesto es capaz de hacer migrar materiales finos a través del filtro de aguas abajo de la presa (3), se desencadena entonces un proceso de **erosión interna** remontante hacia aguas arriba, formando un conducto en el núcleo cada vez mayor (4) hasta producir el **fallo de la presa por erosión interna**.



ESCENARIO	INICIO	DESARROLLO	ROTURA
H-N	E-Cp(5)	E-Cp(1)/ E-Cp(4)	I(b)
<b>VARIABLES</b>	Filtraciones, turbidez y presiones intersticiales	Filtraciones, turbidez y presiones intersticiales	-
<b>INSTRUMENTOS</b>	Aforadores, turbidímetro, piezómetros abiertos y/o cerrados e inspección visual.	Aforadores, turbidímetro, piezómetros abiertos y/o cerrados e inspección visual	-

## 6. CONCLUSIONES

La herramienta de identificación de modos de fallo desarrollada se ha mostrado como un instrumento conciso y de fácil manejo tanto para presas de hormigón como de materiales sueltos.

Su utilidad ha quedado demostrada al describir, esquematizar y codificar los modos de fallo en numerosas presas estudiadas hasta la fecha. Además ha permitido vincular los mecanismos de rotura con los sistemas de auscultación instalados.

En ningún momento, ésta pretende capturar la totalidad de los mecanismos de rotura, más bien procura que no se escape ningún escenario, componente, fenómenos de inicio o desarrollo que contemple un modo de fallo.

En cualquier caso, cabe resaltar que debe tomarse como una “ayuda”, pero no condicionar o limitar el trabajo que se requiera para una identificación lo más exhaustiva y completa posible de los modos de fallo.

## REFERENCIAS

- COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (CNEGP). Guías Técnicas de Seguridad de Presas: Guía N° 7, Auscultación de las Presas y sus Cimientos. Colegio de Caminos Canales y Puertos, 2006.
- CHAPARRO, L. Tesis de Master. Parametrización del Comportamiento de Presas de Materiales Suelos, Vinculado a los Potenciales Modos de Fallo. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2009.
- FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 14. Dam Safety Performance Monitoring Program. 2005.
- FELL, R.; WAN, C.; FOSTER, M. Methods for Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping –Piping through The Embankment. The University of New South Wales, Sydney Australia, 2004.
- GARCIA, L. Tesis de Master. Parametrización del Comportamiento Vinculado a los Potenciales Modos de Fallo de Presas de Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2009.
- MEMBRILLERA M. Tesis Doctoral. Contribución a la Aplicación del Análisis y Declaración de Riesgos en Presas Españolas, Incluyendo Priorización de Inversiones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2007.
- NUÑEZ, A.; ANDREU, M.; LORENZO, J.; ESCUDER, I. Seguimiento del Comportamiento de las presas del Ebro: Estructura y contenido de los informes anuales. Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2008.