



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**Trabajo final de master**

# **Estimación de la probabilidad de fallo frente a deslizamiento de una presa de hormigón en Suecia**

*Valencia, diciembre de 2017*

TITULACIÓN: Master en Ingeniería de Caminos  
Canales y Puertos  
Curso: 2017/18

AUTOR: Juan Luis González Canales  
TUTOR: Ignacio Escuder Bueno  
COTUTOR: Adrián Morales Torres



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLO FRENTE A  
DESlizAMIENTO DE UNA PRESA DE HORMIGÓN EN SUECIA





## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	4
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	4
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 OBJETIVOS .....	7
2. ANTECEDENTES .....	8
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1 DATOS.....	13
3.2 PROCESOS DE CÁLCULO .....	17
3.2.1 Factor de Seguridad .....	17
3.2.2 Función de Estado .....	24
3.2.3 Tensiones.....	27
3.2.4 Probabilidad de Fallo.....	30
3.2.5 Análisis de Sensibilidad .....	37
4. RESULTADOS DE ESTABILIDAD .....	39
4.1 FACTOR DE SEGURIDAD .....	39
4.2 FUNCIÓN DE ESTADO .....	41
4.3 TENSIONES .....	42
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FRAGILIDAD .....	47
5.1 PROBABILIDAD DE FALLO .....	47
5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	52
6. CONCLUSIONES .....	55
7. BIBLIOGRAFÍA.....	57
8. ANEJO 1 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen Valores Medios de las Variables .....	16
Tabla 2. Fuerzas Actuantes sobre la Presa .....	19
Tabla 3. Variables Aleatorias .....	33
Tabla 4. Factores de Seguridad .....	39
Tabla 5. Tensiones en la Base de la Presa (Factor de Seguridad).....	42
Tabla 6. Tensiones en la Base de la Presa (Probabilidad de Fallo).....	44
Tabla 7. Probabilidades de Fallo.....	47
Tabla 8. Probabilidad de Fallo Total .....	51
Table 9: Distribution of considered random variables .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Proyecto SUFRI .....	9
Ilustración 2. Sección Perfil de la Presa.....	13
Ilustración 3. Sección Planta de la Presa .....	14
Ilustración 4. Inclinación Junta en el Cimiento.....	15
Ilustración 5. Equilibrio de Fuerzas Plano Presa Cimiento .....	18
Ilustración 6. Equilibrio de Fuerzas Plano de la Falla .....	19
Ilustración 7. Punto de Aplicación de las Fuerzas .....	27

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Probabilidades de Ocurrencia.....	35
Gráfica 2. Tensiones en la Base de la Presa .....	45
Gráfica 3. Probabilidades de Fallo.....	48
Gráfica 4. Probabilidades de Fallo (Probabilidad de Ocurrencia) .....	49
Gráfica 5. Análisis de Sensibilidad (Caso Avenida).....	53
Gráfica 6. Análisis de Sensibilidad (Caso Normal).....	53



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Factor de Seguridad .....	17
Ecuación 2. Fuerzas Estabilizadoras Presa Cimiento.....	20
Ecuación 3. Fuerzas Desestabilizadoras Presa Cimiento.....	21
Ecuación 4. Fuerzas Estabilizadoras Presa Cimiento.....	22
Ecuación 5. Fuerzas Desestabilizadoras Falla.....	22
Ecuación 6. Función de Estado.....	24
Ecuación 7. Función de Resistencia Presa Cimiento .....	25
Ecuación 8. Función de Solicitación Presa Cimiento .....	25
Ecuación 9. Función de Estado Falla .....	25
Ecuación 10. Función de Resistencia Falla .....	25
Ecuación 11. Función de Solicitación Falla.....	25
Ecuación 12. Función de Estado Falla .....	26
Ecuación 13. Tensión Flectora.....	28
Ecuación 14. Tensión Máxima.....	28
Ecuación 15. Tensión Aguas Arriba .....	28
Ecuación 16. Tensión Aguas Abajo.....	29
Ecuación 17. Valor Medio Distribución Normal Transformada .....	32
Ecuación 18. Valor Desviación Típica Distribución Normal Transformada .....	32
Ecuación 19. Valor Máximo Distribución Normal Transformada.....	32
Ecuación 20. Probabilidad de Fallo .....	33
Ecuación 21. Probabilidad de Fallo Total .....	35
Ecuación 22. Resistencia a Compresión del Hormigón .....	43



## 1. INTRODUCCIÓN

Las presas son estructuras que, en la actualidad, llevan asociados una serie de riesgos y consecuencias de gran envergadura. Estas consecuencias son tanto sociales, como económicas y medioambientales. La rotura de una presa, más aún de una presa de gran importancia, puede suponer una catástrofe para el entorno en el que esté ubicada.

La construcción de presas es necesaria y esencial para nuestra sociedad, tanto para la propia regulación de los ríos, hecho que tiene mayor importancia en países del sur de Europa, como para explotación de la agricultura o aprovechamientos hidroeléctricos. En este contexto, España es un claro ejemplo dado el gran número de presas que se han construido en los últimos años. En la segunda mitad del siglo XX se construyeron en España más de 900 presas, y en lo que llevamos de siglo XXI ya se han construido más de 50 presas.

Por ello surge la necesidad de realizar una previsión del nivel de seguridad de nuestras infraestructuras, en concreto de las presas, para poder realizar una explotación con el mínimo nivel de riesgos y tener en cuenta las consecuencias que llevan asociados cada uno de los riesgos que estamos asumiendo.

Este proyecto tiene como objetivo realizar dicha previsión del nivel de seguridad de una presa de hormigón de gravedad situada en el norte de Suecia, realizando para ello un análisis de riesgos teniendo en cuenta el mayor número de variables asociados a la estabilidad de la presa para poder cuantificar la probabilidad que existe de que la presa sufra un fallo, en este caso por deslizamiento, y en el caso de que este sea probable sobre qué variables podríamos actuar.



## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es el de estimar la seguridad frente a deslizamiento de una presa de gravedad de hormigón situada en el norte de Suecia de acuerdo con el Tema D del “14<sup>th</sup> Benchmark workshop on numerical analysis of dams” de la ICOLD. Este tema propone calcular el factor de seguridad frente al deslizamiento, así como su probabilidad de fallo para conocer la fragilidad de la presa considerada como un sistema. Además, se estima el peso que tendrá las distintas variables asociadas al problema en el resultado final para saber cuáles son más influyentes para poder actuar sobre alguna de ellas de cara a mejorar la seguridad del sistema.



## 2. ANTECEDENTES

Nos encontramos en una época de la historia en la que tanto la población como los avances creados por el ser humano crecen a un ritmo muy alto. Ante esta situación, los ingenieros de caminos han jugado un papel muy importante en las últimas décadas.

Tras unos últimos años en los que se ha construido una gran cantidad de infraestructuras, sobre todo en el ámbito de la ingeniería civil, se ha llegado a un punto en el que contando con estas infraestructuras nuestra profesión debe cambiar su forma de actuar y responder ante las nuevas necesidades de nuestra sociedad.

Un ejemplo de este hecho son las presas y más aún en nuestro país, donde contamos con un alto número de presas, muchas de ellas con más de cincuenta años, siendo el promedio de vida útil de estructuras como las presas de unos 55-60 años, lo que nos sitúa ante un nuevo horizonte, conservar el mayor tiempo posible estas estructuras y en las mejores condiciones posibles.

Las presas son infraestructuras totalmente necesarias tanto para el aprovechamiento máximo de los recursos hídricos, más necesario en zonas donde las precipitaciones no suelen aparecer con mucha frecuencia, como sucede en gran parte de nuestro país, como para la laminación de avenidas, otro problema que, aunque nuestro país no es el que mayor pérdidas pueda sufrir por este hecho, hay que tener en cuenta fenómenos naturales como la gota fría que pueden causar un alto número de pérdidas tanto humanas como materiales.

Cabe destacar que las presas, a la misma vez que aumentan la seguridad de la zona en la que se construyen, también pueden provocar que un fallo en su estructura provoque una catástrofe aguas abajo. Un ejemplo claro de este hecho es la gráfica que se presenta a continuación, que representa el riesgo que existe en tres situaciones diferentes cuando no se han implementado ningún tipo de medidas, cuando se han construido medidas estructurales y por último cuando se han realizado tanto medidas estructurales como no estructurales. Como se puede apreciar, la probabilidad de que se produzca un evento es muy baja, sin embargo, la cantidad de pérdidas que produciría este evento aumenta drásticamente.

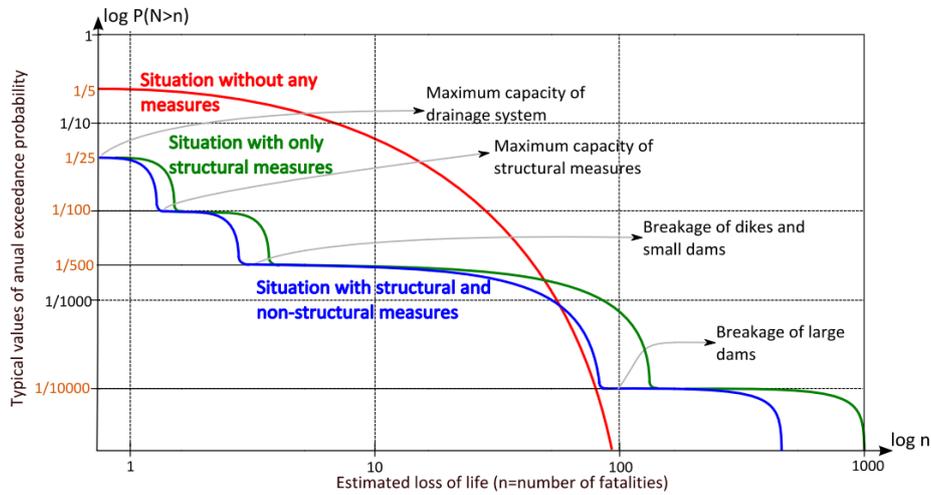


Ilustración 1 Proyecto SUFRI

Esta nueva orientación de nuestra profesión, se debe centrar en conservar y mantener en buen estado las infraestructuras que ya están construidas, en vez de seguir construyendo. Para ello se abre un nuevo papel del ingeniero civil, que se dirige más hacia gestión de los recursos existentes y, como ya se ha citado, de ser capaz de cuantificar los riesgos asociados a las infraestructuras y decidir cuáles de ellos son asumibles y cuáles no, debiendo para ello estudiar las consecuencias del evento asociadas al posible fallo.

Para ello se han ido definiendo a lo largo de estos años una serie de umbrales de seguridad y de asunción de riesgos. Un papel muy importante en la fijación de estos umbrales y de esta asunción de riesgo lo juega la "International Commission on Large Dams" (ICOLD) que desde unas décadas atrás, se ha centrado en ayudar a los diseñadores, constructores y gestores de presas tanto en la construcción de las mismas, como en la gestión de estas.

La ICOLD es una organización internacional no gubernamental que aporta conocimiento y experiencia en la ingeniería de presas. Su objetivo es hacer progresar la tecnología ligada a la ingeniería de las presas y favorecer un desarrollo y una gestión responsables en el plano medioambiental y social de los recursos hídricos, todo ello con el fin de satisfacer las necesidades mundiales. Fue fundada en 1928 en París y desde entonces ha ido integrando a numerosos países y profesionales, siendo en la actualidad un total de más de 100 países y más de 10000 profesionales.



La Organización lidera la profesión para garantizar que las presas se construyan de manera segura, eficiente, económica y sin efectos perjudiciales para el medio ambiente. Su objetivo original era alentar los avances en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de grandes presas y sus obras civiles asociadas, mediante la recopilación y difusión de información relevante y el estudio de cuestiones técnicas relacionadas.

Desde finales de los años sesenta, se hizo hincapié en temas de actualidad como la seguridad de las presas, el control del rendimiento, el re análisis de presas y aliviaderos más antiguos, los efectos del envejecimiento y el impacto ambiental. Más recientemente, los nuevos temas incluyen estudios de costos en las etapas de planificación y construcción, aprovechamiento de ríos internacionales, información para el público en general y financiación.

La ICOLD agrupa a los Comités Nacionales organizados en países que desean ser miembros. La Comisión está dirigida por:

- La Asamblea General integrada por representantes de todos los Países Miembros y de la Mesa de la Comisión. La reunión se lleva a cabo durante la Reunión Anual. Cualquier país independiente puede convertirse en un "País Miembro" y constituir un Comité Nacional compuesto por personas competentes en los asuntos relacionados con las presas. La Asamblea General es la encargada de resolver todas las cuestiones relativas a la organización y dirección de estudios, investigaciones y experimentos, la administración de todos los fondos y propiedades, el funcionamiento de la Oficina Central y cualquier otra actividad pertinente de la Comisión; aprobará el presupuesto de recibos y gastos, nombrará y organizará todos los Comités, y elegirá nuevos Países Miembros.
- La Junta está compuesta por el Presidente, los seis Vicepresidentes, el Secretario General y el Tesorero. Los oficiales son elegidos por la Comisión por un mandato de tres años no renovable, excepto por el Secretario General y el Tesorero



La Comisión alcanza sus objetivos a través de:

- Comités Técnicos que editan por año entre 3 y 10 libros técnicos, boletines o registros.
- Congresos trianuales en los que se discuten cuatro aspectos técnicos, recibiendo entre 200 y 300 artículos que ocupan unas 6.000 páginas en 4 ó 5 volúmenes, incluyendo discusiones técnicas.
- Un Simposio de un día cada año, y un Taller de medio día en años en que no se realiza congreso.

Esta organización celebra numerosos actos para el intercambio de conocimiento entre los máximos exponentes en la ingeniería de presas, como la reunión internacional ya mencionada, y otros como el “Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams” que plantean una serie de enunciados a resolver relacionados con la presas. El pasado mes de septiembre se celebró en Estocolmo (Suecia) el “14th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams” donde se plantearon cuatro temas a resolver:

- Tema A: Agrietamiento de una presa de arco de hormigón debido a variaciones de temperatura estacionales.
- Tema B: Análisis estático y sísmico de una presa gravedad-arco.
- Tema C: Comportamiento del terraplén de la presa: predicción del potencial de arqueamiento y fisuración.
- Tema D: Análisis de riesgo-evaluación de la fiabilidad para presas de hormigón.

Todos estos temas han sido planteados por miembros de la organización y el proceso de participación en la resolución de dichos problemas está abierto a todo el público. El último de los temas, el Tema D se centra en el análisis de riesgos en presas de hormigón y este ha sido el tema escogido para centrar el contenido de este proyecto.

Una de las empresas pioneras en el análisis de riesgos, tanto en España como en el resto del mundo, es la empresa española IPresas creada por profesores e investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia. Esta empresa centra su actividad en el know how de seguridad de presas



y análisis de riesgos. Fue cofundada por Ignacio Escuder Bueno que ha sido chairman de la ICOLD desde 2011 hasta 2017 y que fue elegido presidente de la SPANCOLD (comité español de la ICOLD) el pasado mes de julio. Ignacio ha sido el tutor y precursor de este proyecto.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 DATOS

La presa que se va a analizar en este proyecto es la elegida para el Tema D del “14<sup>th</sup> Benchmark Workshop on numerical analysis of dams” de la ICOLD. En este tema, se propone calcular el factor de seguridad y la probabilidad de fallo de una presa de gravedad situada en el norte de Suecia.

La geometría de la presa en el enunciado del problema a resolver se presenta mediante una sección en planta y dos en alzado, sin embargo, a efectos de cálculos, solo se utilizará en esta tesis una de las secciones del alzado y la de planta. Ambas secciones se exponen a continuación: como se puede ver en las dos figuras:

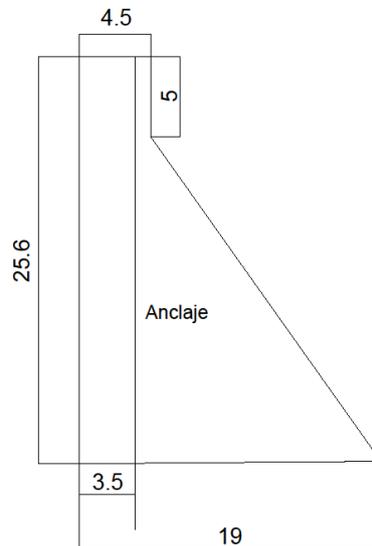
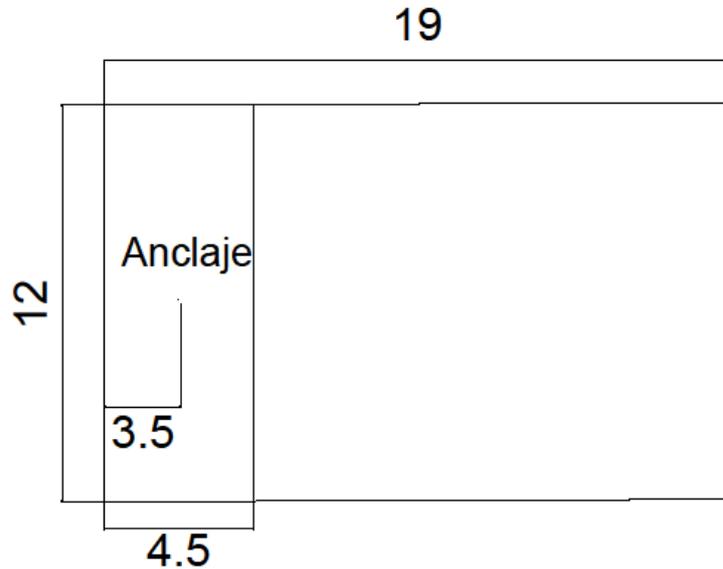


Ilustración 2. Sección Perfil de la Presa

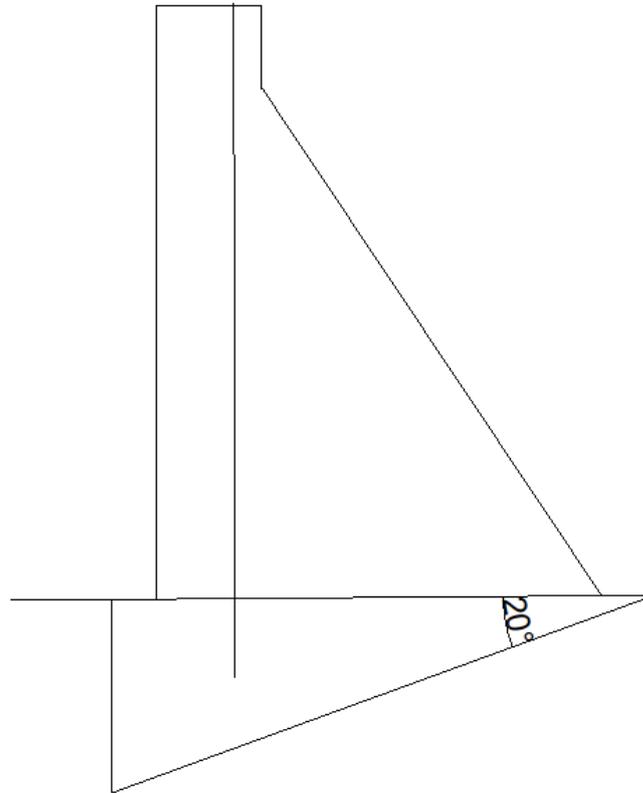


*Ilustración 3. Sección Planta de la Presa*

La presa tiene una altura de 25.6 m y sobre ella actúa un anclaje situado a 3.5 m del pie de aguas arriba. La fuerza de tesado que posee el anclaje es de 1080 kN/m a la cual se le debe estimar unas posibles pérdidas del 10% de la misma.

La presa que se analiza, es una presa de gravedad de hormigón, por lo que el empuje hidrostático se resiste mediante el propio peso de la presa. Como ya se ha comentado, existe un anclaje que ayuda a la presa a resistir este empuje.

El terreno donde se cimienta esta presa, es de granito, un material con una alta resistencia. El valor de su ángulo de rozamiento se puede extraer de dos ensayos realizados en el terreno los cuales aportan unos valores de 37 y 38 grados. Sin embargo, uno de los hechos que se debe tratar en este problema es que existe una falla en el granito en los cimientos de la propia presa, hecho que hace que la resistencia del cimiento, granito en este caso, disminuya sustancialmente y que se deberá tratar en la resolución de este problema. Es por esto que los cálculos que se realizarán durante este proyecto se planteen no solo en el plano del contacto de la presa con el cimiento, si no que se hará también en el plano de la falla, que tiene una inclinación de 20º como se puede observar a continuación:



*Ilustración 4. Inclinación Junta en el Cimiento*

Como ya se ha comentado, la presa está situada en el norte de Suecia, por lo que otra variable a considerar en este proyecto está asociada a las bajas temperaturas que se pueden dar en este territorio: el hielo. Es muy habitual que en los embalses cuando se alcanzan temperaturas muy bajas una capa superficial de la masa de agua se congele, por lo que un empuje a añadir al hidrostático será el empuje del hielo.

Cabe destacar que otros de los cálculos que se piden en esta Tema D es el de que se contemplen dos situaciones distintas: una situación normal en la que se da un valor normal del nivel de agua retenida, y otro caso de laminación, en el que la presa estaría soltando agua.

A modo de resumen se exponen las diferentes variables que participan en la resolución de este proyecto así como el valor medio de las mismas:

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Nivel de agua normal	24.1 m	Nivel de agua laminación	25.6 m
Nivel exterior del agua	3.1	Empuje del hielo	2400 kN
Fuerza de tesado	12960 kN	Pérdida de la fuerza de tesado	1296 Kn
Ángulo de rozamiento presa cimientto	35º	Ángulo de dilatación presa cimientto	15º
Ángulo de rozamiento de la falla	30º	Ángulo inclinación de la falla	20 º
Peso específico del hormigón	23.5 kN/m <sup>3</sup>	Peso específico del granito	27 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico del agua	9.81 kN/m <sup>3</sup>	Longitud de la cuña	26.31 m
Cohesión presa cimientto	0 kN/m <sup>2</sup>	Cohesión cuña	200 kN/m <sup>2</sup>

Tabla 1. Resumen Valores Medios de las Variables



### 3.2 PROCESOS DE CÁLCULO

Una vez analizados los datos aportados por el enunciado del problema se procede a explicar la metodología utilizada para resolver los diferentes apartados del enunciado.

#### 3.2.1 Factor de Seguridad

En primer lugar, se procede a realizar un análisis de la estabilidad. Para ello se deben plantear las diferentes fuerzas que actúan sobre la presa para comprobar que está se encuentra en equilibrio y como de fiable es este equilibrio.

En este caso, se analiza el equilibrio frente al deslizamiento, por lo que se deberá calcular el equilibrio para que la presa no se moviعة, esto sería que el sumatorio de las fuerzas desestabilizadoras fuera superior al de las fuerzas estabilizadoras y por lo tanto sería arrastrada por el empuje hidrostático. Para realizar este cálculo del equilibrio, se debe estimar el factor de seguridad frente a deslizamiento, que valora el porcentaje del peso de las fuerzas estabilizadoras respecto de las fuerzas desestabilizadoras. La expresión es la siguiente:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas Estabilizadoras}}{\text{Fuerzas Desestabilizadoras}}$$

*Ecuación 1. Factor de Seguridad*

En las siguientes imágenes se puede observar las distintas fuerzas que actúan sobre el cuerpo de la presa, en los dos planos ya mencionados: el plano del contacto presa cimiento y el plano de la falla.

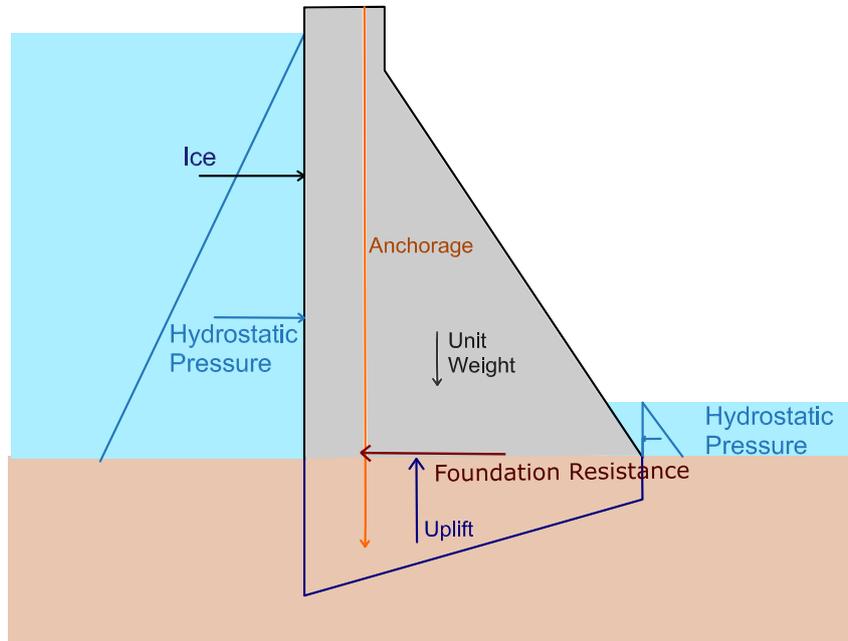


Ilustración 5. Equilibrio de Fuerzas Plano Presa Cimiento

Este equilibrio se plantea según el caso de estudio, para este será en el plano horizontal donde se produce el contacto entre la presa y el cimiento. Como ya se ha comentado, también se analizará en el plano de la falla, que tiene una inclinación de  $20^\circ$  respecto al terreno.

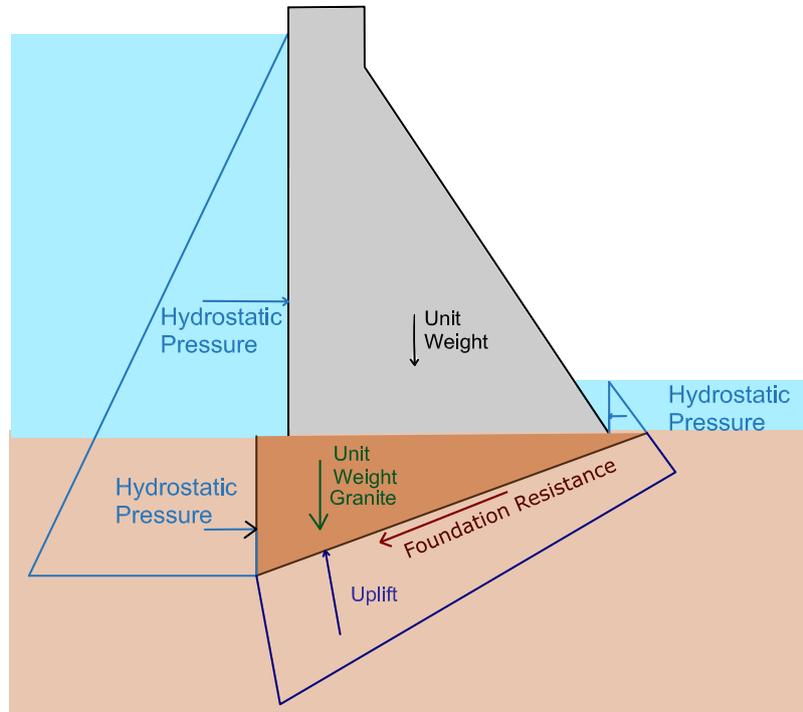


Ilustración 6. Equilibrio de Fuerzas Plano de la Falla

El conjunto de fuerzas tanto estabilizadoras como desestabilizadoras se resumen en la siguiente tabla:

Fuerzas Estabilizadoras	Fuerzas Desestabilizadoras
Empuje hidrostático aguas arriba	Empuje hidrostático aguas abajo
Peso propio de la presa	Empuje del hielo
Anclaje	Subpresión
Resistencia del cimiento	

Tabla 2. Fuerzas Actuantes sobre la Presa

Para calcular el sumatorio de estas fuerzas se utilizarán las siguientes expresiones:

En el caso del deslizamiento en el contacto presa cimiento:

- Fuerzas Estabilizadoras

$$FE = (V \cdot \gamma_H - S + (P_0 + \Delta P)) \cdot \tan(\Phi_{b,c} + i_c) + B \cdot c$$

*Ecuación 2. Fuerzas Estabilizadoras Presa Cimiento*

V: volumen de la presa (m<sup>3</sup>)

$\gamma_H$ : peso específico del hormigón (kN/m<sup>3</sup>)

S: subpresión (kN/m<sup>3</sup>)

P<sub>0</sub>: fuerza de tesado del anclaje (kN)

$\Delta P$ : pérdida de la fuerza de tesado (kN)

$\phi_{b,c}$ : ángulo de rozamiento (°)

$i_c$ : ángulo de dilatación (°)

B: base de la presa (m)

c: cohesión del contacto presa cimiento (kN/m<sup>2</sup>)

En esta ecuación se ha incluido el término de fuerza estabilizadora resistencia del cimiento, sin embargo, en el contacto presa cimiento la cohesión considerada es igual a cero.



- Fuerzas Desestabilizadoras

$$FD = (E_h + H)$$

*Ecuación 3. Fuerzas Desestabilizadoras Presa Cimiento*

$E_h$ : empuje hidrostático

H: empuje del hielo

Cabe destacar que en la anterior tabla se han señalado por un lado que la subpresión es un fuerza desestabilizadora, sin embargo aparece en la fórmula de fuerzas estabilizadoras, esto es debido a que, como se puede apreciar, aparece como término negativo, lo que la convertiría en una fuerza que disminuye el sumatorio estabilizador y por lo tanto se considera fuerza desestabilizadora. Por otro lado, también se ha señalado que el empuje hidrostático aguas abajo era una fuerza estabilizadora, como es obvio el empuje hidrostático aguas arriba es superior al de aguas abajo por lo que se ha incluido en este término.

En el caso del deslizamiento en el plano de la falla:

- Fuerzas Estabilizadoras

$$FE = [(V \cdot \gamma_H + V_C \cdot \gamma_G - S) \cdot \sin(90 - \alpha) + (E_h + H + S_h) \cdot \cos(90 - \alpha)] \cdot \tan(\Phi'_{b,c}) + B' \cdot c'$$

*Ecuación 4. Fuerzas Estabilizadoras Presa Cimiento*

$V_c$ : volumen de la cuña ( $m^3$ )

$\gamma_G$ : peso específico del granito ( $kN/m^3$ )

$\alpha$ : ángulo de la falla ( $^\circ$ )

$S_h$ : subpresión horizontal ( $kN/m^3$ )

$\phi'_{b,c}$ : ángulo de rozamiento de la falla ( $^\circ$ )

$B'$ : longitud de la falla bajo la presa (m)

$c'$ : cohesión de la falla ( $kN/m^2$ )

- Fuerzas Desestabilizadoras

$$FD = [(E_h + H + S_h) \cdot \cos(90 - \alpha) + (V_C \cdot \gamma_G + V \cdot \gamma_H - S) \cdot \sin(90 - \alpha)]$$

*Ecuación 5. Fuerzas Desestabilizadoras Falla*

En el caso del equilibrio sobre la falla, como se puede observar en las dos ecuaciones, se han descompuesto tanto las fuerzas horizontales como las verticales para pasarlas al plano de la falla. Por otro lado, el término cuña se refiere a la parte de terreno comprendido entre la falla y el contacto entre la presa y el cimiento.

Finalmente, cabe señalar que estas ecuaciones tanto para el caso del contacto presa cimiento como en el plano de la falla, deben ser utilizados para ambos niveles de agua ya mencionados: el nivel de agua normal, y en el caso de laminación. En este último, no solo variarán los empujes



hidrostáticos y las subpresiones, si no que no debe ser considerado el empuje del hielo, ya que al estar el agua en movimiento esta capa superficial congelada desaparece.

### 3.2.2 Función de Estado

Una vez calculados los cuatro factores de seguridad, el siguiente paso es obtener las funciones de estado para los dos modos de fallo considerados (presa cimientado y falla).

Las funciones de estado representan el estado actual en el que se encuentra la seguridad de la presa ante las fuerzas que sobre ella actúan. En las funciones de estado se utiliza como fórmula matemática la siguiente expresión:

$$g^* = \frac{r}{s} - 1$$

*Ecuación 6. Función de Estado*

r: función de resistencia al deslizamiento

s: función de sollicitación al deslizamiento

En ella se representan la resistencia y la sollicitación ante el modo de fallo considerado. Estas funciones representarían el factor de seguridad de la presa frente al deslizamiento en este caso como ya se comentó anteriormente. Este factor de seguridad vendría restado por la unidad, esto representa el hecho de que un factor de seguridad inferior a la unidad provocaría el fallo de la presa o la generación de consecuencias adversas en el sistema. Dentro de estas funciones podemos encontrar dos tipos de variables: las variables estáticas, que no varían su valor, y las variables aleatorias, que como se verá más adelante, su valor se obtiene a partir de una distribución estadística. Estas últimas aparecerán en la fórmula de la función de estado sin su valor, ya que se debe precisar a través de su distribución estadística. Las expresiones de las diferentes funciones quedarían por lo tanto de la siguiente manera:

- Función de resistencia contacto presa cimiento

$$r = [2870 \cdot \gamma_H + (P_0 + \Delta P) - (6933,71 + 1118,34 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi_r + \Phi_d)$$

*Ecuación 7. Función de Resistencia Presa Cimiento*

$h_1$ : nivel interno del agua

$h_2$ : nivel externo del agua

- Función de Solicitación contacto presa cimiento

$$s = 1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H$$

*Ecuación 8. Función de Solicitación Presa Cimiento*

- Función de Estado contacto presa cimiento

$$g = \frac{[2870 \cdot \gamma_H + (P_0 + \Delta P) - (6933,71 + 1118,34 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi_r + \Phi_d)}{1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H} - 1$$

*Ecuación 9. Función de Estado Falla*

- Función de resistencia en la falla

$$r = [2870 \cdot \gamma_H + 1376 \cdot \gamma_G - (9601,36 + 1548,61 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi'_d + 8)$$

*Ecuación 10. Función de Resistencia Falla*

- Función de sollicitación en la falla

$$s = 1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H$$

*Ecuación 11. Función de Solicitación Falla*



- Función de Estado en la falla

$$g = \frac{[2870 \cdot Y_H + 1376 \cdot Y_G - (9601,36 + 1548,61 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi'_d + 8)}{1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H} - 1$$

*Ecuación 12. Función de Estado Falla*

### 3.2.3 Tensiones

Un aspecto que puede ser muy perjudicial para la estabilidad de una presa de hormigón es que puedan aparecer tracciones en el cuerpo de la presa. Este hecho, no solo cambiaría la forma de calcular tanto el factor de seguridad, la función de estado como la probabilidad de fallo, si no que puede llegar a ocurrir que las tracciones hagan aparecer grietas y que por estas el agua pueda penetrar en el hormigón, lo que le haría perder resistencia como material estructural y por tanto podría poner en peligro la seguridad de la presa.

Es por ello que, aunque no aparecía en el enunciado del problema, se han decidido calcular las tensiones en la basa de la presa tanto aguas abajo como aguas arriba para comprobar que no es necesario modificar las fórmulas de cálculo ya utilizadas.

Para realizar esta comprobación se ha procedido de la siguiente manera:

Se calcula el momento que producen el sumatorio de fuerzas que actúan sobre el cuerpo de la presa respecto a un punto, el punto medio en este caso. Las diferentes fuerzas que actúan sobre el cuerpo de la presa así como su punto de aplicación se exponen en la siguiente imagen:

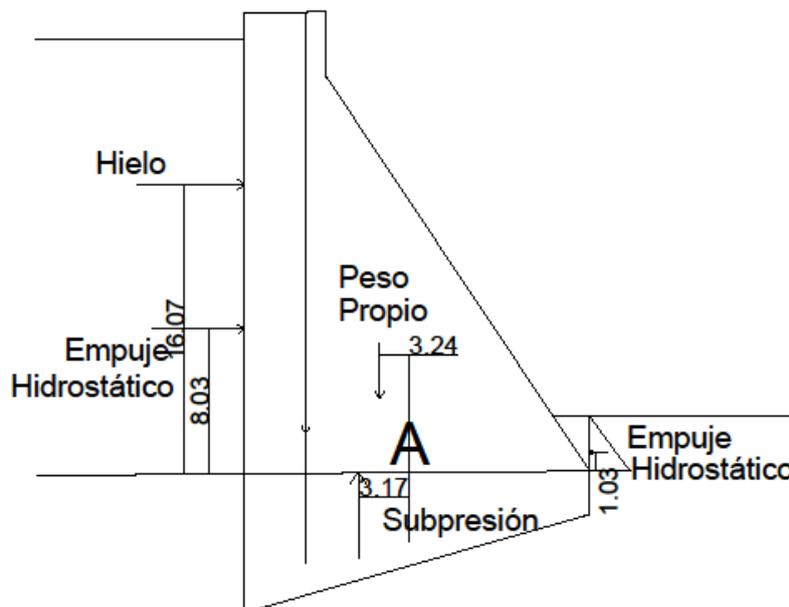


Ilustración 7. Punto de Aplicación de las Fuerzas

Una vez obtenido este momento se calculan la tensión máxima y la flectora con las siguientes ecuaciones:

$$T_{flectora} = \frac{6 \cdot M_A}{B^2}$$

*Ecuación 13. Tensión Flectora*

$M_A$ : momento en el punto medio de la base

$$T_{máxima} = \frac{R_V}{B}$$

*Ecuación 14. Tensión Máxima*

$R_V$ : resultante vertical actuante sobre el cuerpo de la presa

De estas dos tensiones, flectora y máxima, se deben obtener las tensiones que se producen en la base de la presa. Se calculan estas tensiones en dos puntos concretos: el pie de aguas arriba y en el pie de aguas abajo, donde se producirán por lógica tracciones o mínimas compresiones en el pie de aguas arriba, y compresiones máximas en el pie de aguas abajo. Las expresiones utilizadas para calcular ambas tensiones son las siguientes:

$$T_{aguas\ arriba} = T_{flectora} + T_{máxima}$$

*Ecuación 15. Tensión Aguas Arriba*

$T_{aguas\ arriba}$ : tensión en el pie de la presa aguas arriba



$$T_{\text{aguas abajo}} = T_{\text{máxima}} - T_{\text{flectora}}$$

*Ecuación 16. Tensión Aguas Abajo*

$T_{\text{aguas abajo}}$ : tensión en el pie de la presa aguas abajo



### 3.2.4 Probabilidad de Fallo

Una vez obtenidas las tensiones en los pies de la presa, tanto aguas arriba como aguas abajo, el siguiente paso de este proyecto es calcular la probabilidad de fallo, que es el valor más importante cuando se estima la fiabilidad de un sistema complejo como es una presa.

Cabe destacar en este aspecto, que el término probabilidad de fallo en una presa no solo supone una rotura catastrófica de la presa si no cualquier situación que conlleve situaciones negativas en el sistema. La probabilidad de fallo depende dos términos en general: la actuación que solicita a la presa y la respuesta de esta ante la actuación.

En este proyecto se estudiará únicamente la probabilidad de fallo por deslizamiento de la presa, tanto en el plano de contacto presa cimiento como en el de la falla. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existe un amplio abanico de fallos que pueden ocurrir en una presa. Se centrará este proyecto por lo tanto en el fallo provocado por deslizamiento.

El método utilizado en este caso para obtener la probabilidad de fallo por deslizamiento es el método de Montecarlo. El método de Montecarlo es un método numérico no determinista que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.

La forma de proceder en este proyecto para utilizar este método es la siguiente:

Se seleccionarán una serie de variables que intervienen en la estabilidad de la presa y se convertirán estas en variables aleatorias. La forma de generar estas variables aleatorias mediante el método de Montecarlo se realiza siguiendo cada una de ellas una distribución estadística.

El método Montecarlo necesita para tener validez en los resultados tener un valor alto de simulaciones generadas. En este caso, aunque también se han hecho comprobaciones con 10.000 o 100.000 valores, se han generado 1.000.000 de valores de cada variable. La forma de generar este alto número de valores se ha realizado mediante la herramienta informática Excel. Para generar número aleatorias mediante Excel se ha utilizado la función =(Aleatorio) que genera número aleatorios entre valores que se debe especificar. En esta caso se ha utilizado la función aleatorio para crear las probabilidades que se utilizarían en las distribuciones



estadísticas de las distintas variables; para ello, se generarán el millón de valores entre 0 y 1. Una de las características a destacar de esta función, es que cada vez que se aprieta la tecla Enter o se realiza algún cambio en el archivo, genera los números aleatorios. Por lo tanto, se ha generado el millón de valores aleatorios para cada distribución creada y para cada prueba que se ha realizado.

Tanto la distribución que se sigue para generar los valores de cada variable, como su media y su varianza son fijados por el enunciado del Tema D. Cabe destacar, que la mayoría de distribuciones son distribuciones estandarizadas y que recoge el programa Excel. Sin embargo, existe una excepción: el empuje del hielo según el enunciado sigue una distribución lognormal truncada entre el valor 0 y la máxima carga de hielo, que sigue a su vez una distribución normal. El programa Excel no tiene en su base de datos este tipo de distribución, por lo que se ha buscado una hoja que se añade al programa para que se pudiera realizar esta distribución. La forma de proceder para esta distribución es transformar una distribución lognormal en una normal, ya que las diferentes fórmulas que se han encontrado para Excel son la de una distribución normal truncada. Para transformar una distribución lognormal en una distribución normal es transformando las siguientes variables:

- Media
- Desviación estándar
- Valor máximo truncado
- Valor mínimo truncado

Para obtener los diferentes valores transformados de una distribución a otra se utilizan las siguientes expresiones:

$$v = \ln \left( \frac{m}{\sqrt{1 + \left(\frac{s}{m}\right)^2}} \right)$$

*Ecuación 17. Valor Medio Distribución Normal Transformada*

v: valor medio distribución normal

m: valor medio distribución lognormal

s: valor desviación estándar distribución lognormal

$$\lambda = \ln \left( 1 + \left(\frac{s}{m}\right)^2 \right)$$

*Ecuación 18. Valor Desviación Típica Distribución Normal Transformada*

$\lambda$ : valor desviación estándar distribución normal

$$VM_N = \frac{\ln VM_L - v}{\sqrt{\lambda}}$$

*Ecuación 19. Valor Máximo Distribución Normal Transformada*

$VM_N$ : valor máximo distribución normal

$VM_L$ : valor máximo distribución lognormal

Como valor mínimo para la distribución normal se utiliza un número similar a infinito negativo, que es el valor necesario para que funcione la distribución con exactitud.

Las diferentes distribuciones, así como las medias y varianzas de las distintas variables se recogen en la siguiente tabla:

Variable Aleatoria	Distribución	Media	Desviación típica
Peso específico del hormigón	Normal	23.5 kN/m <sup>3</sup>	0.8 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico del granito	Normal	27 kN/m <sup>3</sup>	0.54 kN/m <sup>3</sup>
Ángulo de rozamiento presa-cimiento	Normal	35°	1.75°
Ángulo de dilatación presa-cimiento	Lognormal	15°	3°
Ángulo de rozamiento de la falla	Normal	30°	1,5°
Fuerza de tesado	Normal	1080 kN/m	40.5 kN/m
Pérdida de la fuerza de tesado	Normal	108 kN/m	16.2 kN/m
Empuje del hielo	Lognormal Truncada entre 0 and 250 kN/m	80 kN/m	80 kN/m
Máximo empuje del hielo	Normal	250 kN/m	25 kN/m
Resistencia a compresión del hormigón	Normal	23.5 MPa	0.04 MPa

Tabla 3. Variables Aleatorias

Una vez se han generado el millón de valores para cada variable se debe proceder a calcular la probabilidad de fallo. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$PF = \frac{\text{número de fallos}}{\text{número de cálculos}}$$

Ecuación 20. Probabilidad de Fallo

PF: probabilidad de fallo

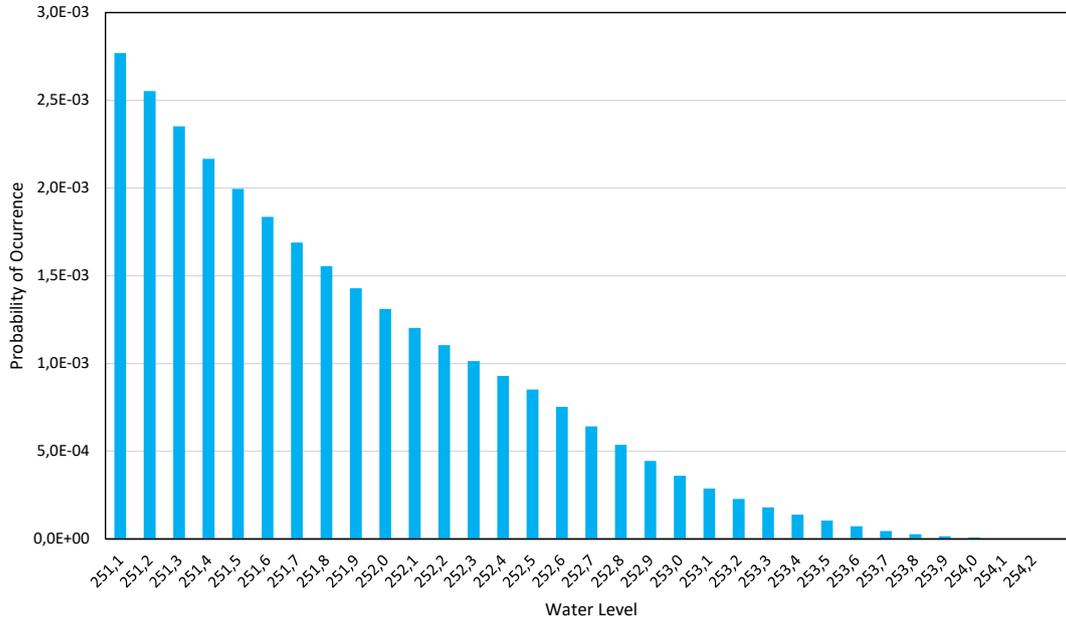
En este caso, el número de cálculos será igual a un millón, mientras que el número de fallos será igual al número de veces en el que el valor del factor de seguridad por deslizamiento sea inferior a 1. Para comprobar el valor del factor de seguridad se calcula este un millón de veces integrando en la fórmula ya utilizada del factor de seguridad el millón de valores de las variables.



La forma de realizar esta cantidad de cálculos es mediante una hoja de Excel aportada por la empresa que apoya este proyecto: IPresas. Esta hoja contiene una macro cuya labor es asociar todos los valores de las variables que se le introduzcan para realizar el cálculo que se le solicite. En este caso, se ha asociado a otra hoja de Excel elaborada por el autor de este proyecto en la que se calcula el factor de seguridad para el contacto presa cimiento y en el plano de la falla, y las tensiones máximas y mínimas para comprobar en cada caso que no se producen tracciones como ya se comentó en el apartado anterior. Una vez se han introducido todos los valores de cada variable y se ha asociado a la hoja correspondiente, se corre la macro de Visual Basic y ésta dedica un determinado tiempo (dependiendo de la potencia del ordenador) para calcular los cuatro valores ya mencionados un millón de veces. Las tensiones se comprueban para cada caso y el número de fallos (factor de seguridad inferior a 1) se contabilizan mediante la función de Excel =(Contar.Si, que contará el número de veces que el factor de seguridad es inferior a 1, aplicando entonces la fórmula de la probabilidad de fallo se obtienen los dos valores buscados.

Una variable en la que se modifica su valor, pero no siguiendo una distribución estadística es el nivel de agua existente en la presa. Como ya se ha comentado, el enunciado pide resultados para dos niveles: el nivel de retención normal y en el del caso de laminación, en el que el nivel de agua se encuentra en el punto más alto de la presa. Para estos dos niveles se han calculado el millón de valores del factor de seguridad, los cuales se discutirán en el apartado de resultados.

Sin embargo, el enunciado aporta una serie de valores de niveles de retención de la presa. Asociados a estos valores de nivel del agua aparecen las probabilidades de ocurrencia de cada uno de ellos como se puede ver en la siguiente tabla:



Gráfica 1. Probabilidades de Ocurrencia

Como se puede observar en la tabla, el valor normal es el primero que aparece con la máxima probabilidad de ocurrencia y a partir de este valor la probabilidad de ocurrencia va disminuyendo hasta llegar a la coronación de la presa donde las probabilidades de ocurrencia son muy bajas o incluso nulas.

Utilizando estas probabilidades de ocurrencia se puede calcular la probabilidad de fallo total de la presa mediante la siguiente expresión:

$$PF_T = \sum PF_i \cdot PO_i$$

Ecuación 21. Probabilidad de Fallo Total

$PF_T$ : probabilidad de fallo total

$PF_i$ : probabilidad de fallo de cada nivel

$PO_i$ : probabilidad de ocurrencia de cada nivel



Esta probabilidad representa con mucha claridad la realidad, ya que aunque es necesario conocer la probabilidad de fallo para un nivel de agua hipotético, también es necesario ser conscientes de que nivel de agua es más probable que aparezca en la presa.

Para calcular esta probabilidad de fallo total se han calculado la probabilidad de fallo para un total de 33 niveles de agua diferentes. Cabe destacar que para este cálculo no se han realizado el millón de valores para todos los niveles, ya que el programa informático Excel no admite más 1.480.000 filas y por lo tanto no sería posible calcular más de un nivel por cada vez que se ejecutara la macro. La forma de proceder por lo tanto ha sido la siguiente:

Se comprobó para los cinco primeros niveles que no existía diferencia entre calcular el valor de la probabilidad de fallo con un millón de valores que con 100.000 valores. Una vez testado este hecho se procedió a calcular seis niveles de agua por cada vez que se corría la macro. Se repitió este acto hasta calcular los 33 niveles de agua que se exponían.

Una vez calculados estas probabilidades de fallo se asociaban dichas probabilidades con las probabilidades de ocurrencia correspondientes mediante la fórmula anterior y se obtenía por lo tanto la probabilidad condicional de fallo de la presa para los dos modos de fallo considerados: deslizamiento en el plano de contacto presa cimiento y deslizamiento en el plano de la falla

### 3.2.5 Análisis de Sensibilidad

Una vez obtenidos los diferentes valores necesarios para estimar la fiabilidad de la presa, se procede a valorar qué seguridad nos aportan estos resultados. Para ello se realiza un análisis de sensibilidad para estimar el peso que tiene cada variable en el resultado final.

La forma de realizar este análisis de sensibilidad, ha sido de un modo estadístico, utilizando las distribuciones estadísticas que proporcionó el enunciado para cada variable. Para ello se ha realizado el cálculo de la probabilidad de fallo variando el valor de las variables. El cambio del valor de las variables se ha realizado escogiendo una de las variables y fijando su valor hasta por tres veces, otorgándole los valores siguientes:

- Valor de la media de la distribución
- Valor de la media más su desviación típica
- Valor de la media menos su desviación típica

Este proceso se ha repetido para las diferentes variables, y una vez obtenidos los diferentes valores, se comparan estos con los obtenidos cuando las variables seguían sus propias distribuciones estadísticas.

Estos tres valores de cada variable se han calculado para los dos modos de fallos considerados: deslizamiento en el plano de contacto presa cimiento y deslizamiento en el plano de la falla. Además se han combinado estos modos de fallo con los niveles de agua representativos: el nivel de agua asociado al caso normal, y el nivel de agua asociado al caso de laminación.

Este tipo de análisis de sensibilidad, utilizando las variables estadísticas, proporciona buenos resultados del peso de las variables en problemas como el que concierne en este proyecto, dónde las variables, las aleatorias en este caso, siguen una distribución estadística diferente cada una, ya sea por el tipo de distribución, Normal, LogNormal, LogNormal truncada entre dos valores etc.



Para realizar este análisis de sensibilidad, se ha utilizado la misma hoja de Excel que a través de la macro que tiene habilitada, combina los diferentes valores de las variables, para más tarde comparar los diferentes valores de las probabilidades de fallo obtenidos.

## 4. RESULTADOS DE ESTABILIDAD

En este apartado se comentarán los diferentes resultados obtenidos durante la realización de este proyecto, aplicando la metodología explicada en el apartado anterior.

### 4.1 FACTOR DE SEGURIDAD

Los resultados obtenidos para el factor de seguridad de la presa, se han llevado a cabo mediante la fórmula que se explica en el apartado de metodología. Como ya se ha comentado, se han obtenido cuatro valores de este factor de seguridad, como solicitaba el enunciado del Tema D del Benchmark. Los diferentes factores de seguridad calculados son los siguientes:

- Nivel de agua normal contacto presa cimiento
- Nivel de agua normal falla
- Nivel de agua de laminación contacto presa cimiento
- Nivel de agua de laminación falla

Los valores de los factores de seguridad representan la proporción que existe entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre la presa, significando un valor inferior a la unidad que las fuerzas desestabilizadoras son superiores a las fuerzas estabilizadoras y que por lo tanto el sistema no está en equilibrio. Valores muy cercanos a la unidad representan un estado inestable del sistema, ya que cualquier cambio en alguna de las variables produciría el fallo en el sistema. Los valores obtenidos en este proyecto se resumen en la siguiente tabla:

<b>Factor de Seguridad</b>			
<b>Nivel Normal</b>		<b>Nivel Avenida</b>	
<b>Presa-Cimiento</b>	<b>Falla</b>	<b>Presa-Cimiento</b>	<b>Falla</b>
1.61	1.47	1.13	1.07

*Tabla 4. Factores de Seguridad*



Como se puede observar en la tabla, los resultados del factor de seguridad son de mayor valor en el plano de contacto presa cimiento por lo que este plano alberga mayor seguridad que el plano de la falla, es decir, un cambio en el sistema de fuerzas, sea disminución de las fuerzas estabilizadoras o aumento de las fuerzas desestabilizadoras, estará más cerca de provocar inestabilidades en la presa y por lo tanto de quebrar el equilibrio en el sistema de la presa en el plano de la falla.

Como era de esperar, un menor nivel de agua en la presa supone un factor de seguridad más alto, es decir, el sistema es más estable ante el nivel de agua del caso normal que en el caso de carga de laminación.

Por otro lado, cabe destacar que el factor de seguridad en ambos planos para el caso de carga de laminación tiene un valor muy cercano a la unidad lo que supone un equilibrio algo inestable, ya que la variación de alguna de las fuerzas que actúa sobre el cuerpo de la presa podría suponer un fallo en el sistema.

## 4.2 FUNCIÓN DE ESTADO

Respecto a las funciones de estado, se obtienen dos expresiones diferentes correspondientes al caso del contacto presa cimientto y otra para el plano de la falla. En este caso no existe diferencia entre los casos normales y de laminación debido a que los niveles de agua aparecen como una variable aleatoria, por lo que la expresión para ambos casos sería la misma:

- Función de Estado Contacto Presa Cimiento

$$g = \frac{[2870 \cdot Y_H + (P_0 + \Delta P) - (6933,71 + 1118,34 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi_r + \Phi_d)}{1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H} - 1$$

- Función de Estado Plano de la Falla

$$g = \frac{[2870 \cdot Y_H + 1376 \cdot Y_G - (9601,36 + 1548,61 \cdot (h_1 - 3,1))] \cdot \tan(\Phi'_d + 8)}{1118,34 \cdot h_1^2 - 10747,25 + H} - 1$$

### 4.3 TENSIONES

Las tensiones que se producen en la base de la presa, se han calculado con las fórmulas explicadas en la metodología. Estas fórmulas han sido utilizadas en dos cálculos:

- Factor de Seguridad
- Probabilidad de Fallo

Es decir, se han calculado las tensiones con el valor medio para todas las variables, donde se obtendrían dos valores de las tensiones, uno aguas arriba y otro aguas abajo. Sin embargo, en el caso de la probabilidad de fallo, se han calculado las tensiones en la misma hoja de cálculo en la que se calcula la probabilidad de fallo con las distintas variables siguiendo sus distribuciones estadísticas. Por lo tanto, para cada valor de la variable se han obtenido dos tensiones, un millón de valores en cada cálculo.

En el caso del factor de seguridad se obtienen dos pares de valores, ya que se han calculado las tensiones en el caso normal y en el caso de avenida. Los valores obtenidos son los siguientes:

#### Tensiones

Caso Normal		Caso Laminación	
Aguas Arriba	Aguas Abajo	Aguas Arriba	Aguas Abajo
0.09 MPa	0.33 MPa	0.06 MPa	0.36 MPa

*Tabla 5. Tensiones en la Base de la Presa (Factor de Seguridad)*

Como se puede ver en la tabla, los valores mínimos se producen en el pie de aguas arriba, ya que las fuerzas actuantes sobre el cuerpo de la presa, las desestabilizadoras en este caso, tenderían a levantar el pie de aguas arriba lo que produciría tracciones en esta parte de la presa. Estos valores que aparecen en el pie de la presa no llegan a producir tracciones, producen unos valores cercanos a cero pero en ningún caso se llegarían a producir tracciones, por lo que la

comprobación realizada en el caso del factor de seguridad es válida y por lo tanto no es necesario modificar las expresiones. Como era de esperar, los valores del caso de laminación son algo superiores, esto es debido a que el nivel de agua interior es mayor y por lo tanto la presa tiende más a “girar” hacia aguas abajo. Sin embargo, este valor no se aleja mucho del valor obtenido en el caso normal debido a que hoy otras fuerzas que no actúan en el caso de laminación: el empuje del hielo, por lo que ambos resultados son muy cercanos.

Otra comprobación que debería realizarse al obtener las tensiones es que la máxima tensión que se produce (máxima compresión) no supera la resistencia a compresión del hormigón. El hormigón es un material que aceptando altas compresiones, no se comporta bien en el caso de las tracciones. Como era de esperar la máxima compresión que se produce en la base de la presa: 0.36 MPa está muy por debajo del valor máximo que puede resistir el hormigón.

Otro aspecto a resaltar y que se comentará junto con los resultados de las tensiones en la probabilidad de fallo, es que la posible filtración de agua que se podría producir en el caso de aparecer tracciones no es exactamente así. Estas filtraciones se producirían en el caso de aparecer grietas, y estas grietas aparecerían en el caso de que se superara la resistencia máxima a tracción del hormigón. La resistencia a tracción del hormigón se puede calcular a partir de su resistencia a compresión utilizando la siguiente expresión:

$$f_{ct,k} = 0,21 \cdot (f_{ck})^{2/3}$$

*Ecuación 22. Resistencia a Compresión del Hormigón*

$f_{ct,k}$ : resistencia característica a tracción del hormigón

$f_{ck}$ : resistencia característica a compresión del hormigón

Mediante esta fórmula se podría estimar la resistencia a tracción del hormigón. El enunciado del Tema D del Benchmark, no especifica un valor de la resistencia a compresión del hormigón con el que se construyó la presa. Suponiendo un valor mínimo de 30 MPa para la resistencia, un valor mínimo en la construcción de presas, el umbral que debería establecerse para que

aparecieran las tracciones sería superior a -1 MPa, es decir, deberían aparecer tracciones superiores a 1 MPa para que se produjeran grietas y por lo tanto la posibilidad de filtraciones.

En el caso del cálculo de las tensiones en la probabilidad de fallo, como ya se ha comentado, se obtienen un millón de valores para las tensiones en el pie de aguas arriba y otro millón para el pie de aguas abajo. Estos valores se obtendrán para los diferentes valores del nivel de agua retenida en la presa, es decir, dos millones de valores para cada nivel de agua que se calcule. Por lo tanto, de esta cantidad de datos se han escogido los valores más significativos, es decir, la mínima tracción y la máxima compresión.

En primer lugar se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la probabilidad de fallo para los dos valores del nivel de retención de agua significativos: el nivel del caso normal y en el nivel del caso de laminación, que es igual al nivel máximo de agua retenido, es decir, el nivel de agua en la cota de coronación de la presa. En la siguiente tabla se muestran estos valores:

### Tensiones

Caso Normal		Caso Laminación	
Aguas Arriba	Aguas Abajo	Aguas Arriba	Aguas Abajo
-0.10 MPa	0.35 MPa	-0.19 MPa	0.42 MPa

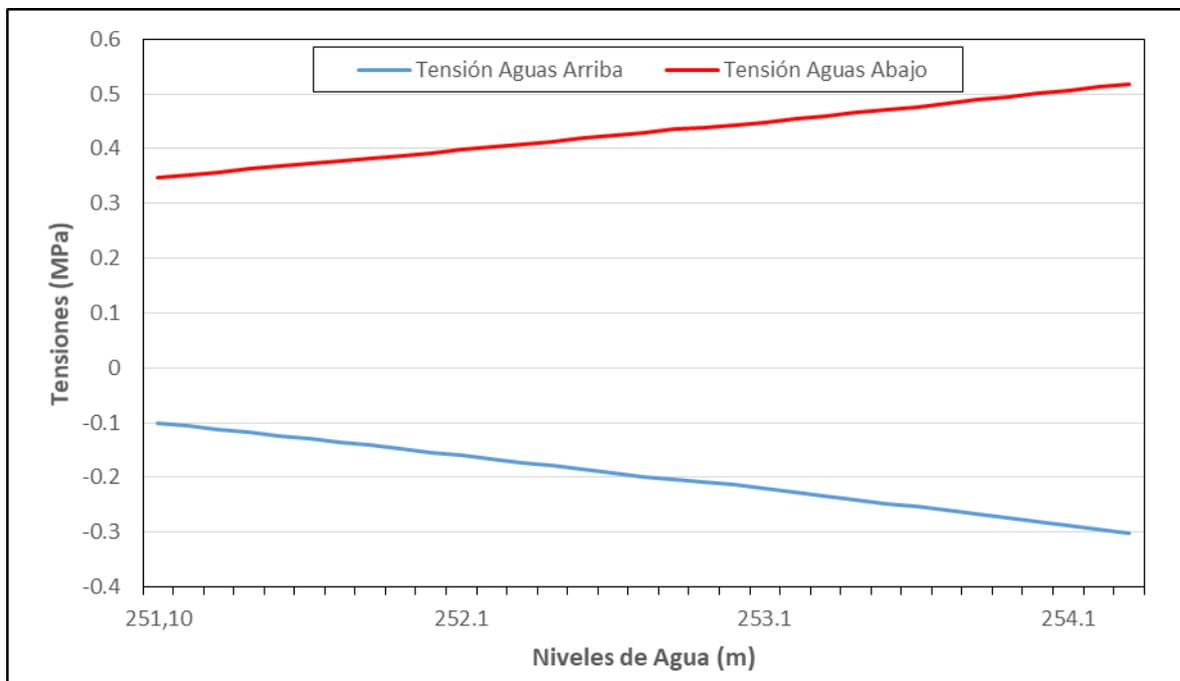
Tabla 6. Tensiones en la Base de la Presa (Probabilidad de Fallo)

Como se puede apreciar, hay una significativa diferencia entre estos valores y los obtenidos en el cálculo del factor de seguridad. Esto es debido a la aleatoriedad de los valores obtenidos. Como ya se comentó en el apartado de metodología, el millón de valores para cada variable obtenidos sigue una distribución estadística, esta a su vez está obtenida a partir de la creación del millón de valores aleatorios.

Si comparamos los valores obtenidos en este caso, como ya se ha dicho todos ellos aumentan respecto al cálculo de factor de seguridad. Sin embargo, no existe una gran diferencia entre el caso normal y el caso de laminación. Las tensiones aumentan respecto al factor de seguridad, y aumentan en el caso de laminación respecto al caso normal, pero si siguen sin aparecer suficientes tracciones como para que se produzcan las ya mencionadas grietas y por lo tanto

tampoco sería necesario en este caso modificar las fórmulas de cálculo. Respecto a las tensiones de compresión, los valores están muy alejados del valor máximo.

Para completar el cálculo de las tensiones en ambos pies de la presa, además de calcular dichas tensiones para los dos niveles de agua representativos, se han obtenido los valores de las tensiones para los 33 niveles de agua que plantea el enunciado. Los resultados se pueden ver con gran claridad en la siguiente gráfica:



Gráfica 2. Tensiones en la Base de la Presa

Como se puede observar, tanto el aumento de la tensión máxima como la disminución de la tensión mínima siguen la distribución que ya se ha comentado: a medida que aumenta el nivel de agua en la presa aumentan las tensiones en el pie de aguas abajo y disminuyen en el pie de aguas arriba o lo que es lo mismo, el pie de aguas arriba está más traccionado y el pie de aguas abajo está más comprimido.

A pesar de aumentar al máximo el nivel de agua en la presa, al igual que en el caso de laminación, siguen sin producirse las tracciones necesarias para que se llegasen a realizar las grietas que podrían poner en peligro la estabilidad de la presa, por lo tanto, tampoco en este caso serían necesario modificar las fórmulas de cálculo. Las compresiones en el pie de aguas abajo siguen



siendo considerablemente bajas, por lo que en ningún caso se acercarán al valor máximo de la resistencia a compresión del hormigón.

## 5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FRAGILIDAD

En este apartado del proyecto se comentarán los resultados del análisis de fragilidad, es decir, la probabilidad que tiene la presa como sistema de sufrir un fallo que produzca unas consecuencias negativas para el entorno. Por lo tanto, se presentan tanto las probabilidades de fallo como el análisis de sensibilidad, ya que este último se ha realizado sobre los cálculos de la probabilidad de fallo.

### 5.1 PROBABILIDAD DE FALLO

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos en el cálculo de la probabilidad de fallo, tanto para el deslizamiento en el plano del contacto presa cimiento, como en el plano de la falla. Dichos resultados se presentan de dos formas distintas, en primer lugar se muestran los valores obtenidos en los dos casos de carga analizados el del nivel normal y el del nivel de laminación. La otra parte de los resultados detalla la probabilidad de fallo del conjunto de niveles de agua.

Las probabilidades de fallo de dos casos de carga analizados, nivel normal (251 msnm) y nivel de avenida (252.2 msnm) se muestran en la siguiente tabla para los dos planos de posible fallo por deslizamiento:

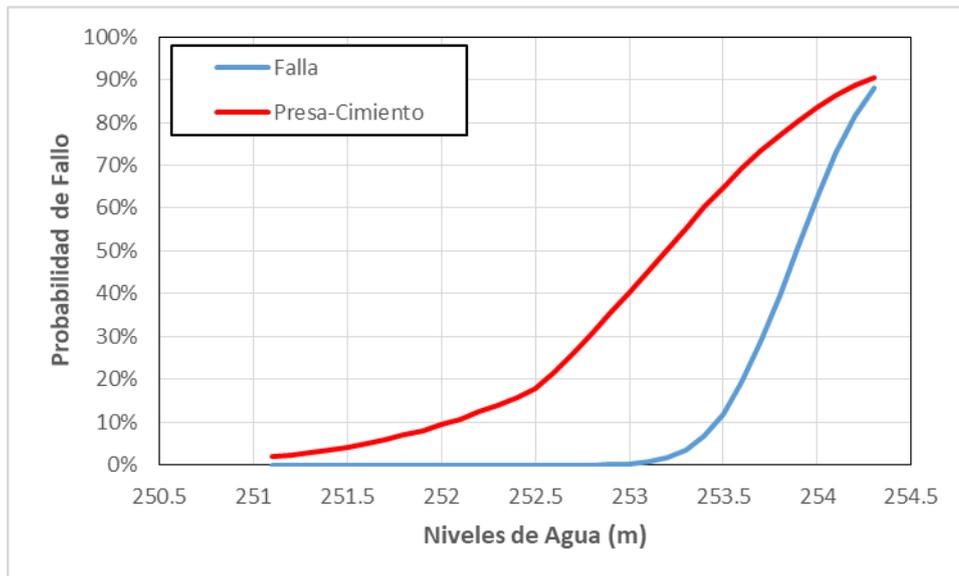
<b>Probabilidad de Fallo</b>			
<b>Nivel Normal</b>		<b>Nivel Avenida</b>	
<b>Presa-Cimiento</b>	<b>Falla</b>	<b>Presa-Cimiento</b>	<b>Falla</b>
0.01967	0	0.17846	0.00002

*Tabla 7. Probabilidades de Fallo*

Como es obvio, las probabilidades de fallo para el nivel de avenida, donde el nivel de agua es superior al nivel normal, son superiores debido a que el empuje hidrostático que actúa sobre el cuerpo de la presa es de mayor magnitud, por lo tanto la presa soportará una mayor sollicitación y tendrá mayor susceptibilidad al posible fallo. En el plano del contacto presa cimiento el valor del nivel de avenida es del orden de diez veces el nivel normal mientras que en el plano de la

falla tiene mayor importancia este resultado ya que la probabilidad de fallo para el caso de carga de laminación es la primera probabilidad de fallo superior a cero, ordenados los niveles de agua de menor a mayor. Por lo tanto, la presa podría comenzar a fallar a partir de este nivel de agua y con niveles inferiores según estos resultados la presa es totalmente segura.

El conjunto de probabilidades de fallo se representa de forma gráfica, dónde el significado de los resultados puede analizarse de forma más certera. La siguiente gráfica muestra dicho resultados:



Gráfica 3. Probabilidades de Fallo

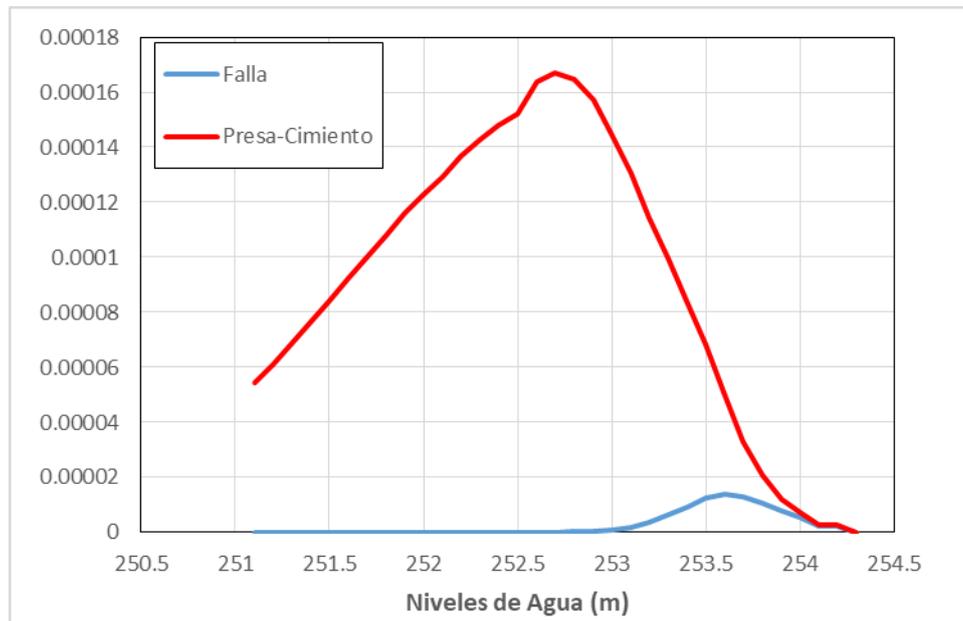
Se presentan los valores de forma porcentual ya que un valor de probabilidad de fallo igual a la unidad representa un porcentaje del 100% de probabilidad de fallo mientras que si este es de 0% no hay probabilidad de fallo.

De esta gráfica se puede obtener una conclusión fácilmente: una vez alcanzado el mayor nivel de agua analizado los dos planos de deslizamiento analizados llegan a tener un valor de probabilidad de fallo muy similar. Estos valores son de 90.50% para el plano de contacto presa cimiento y de 87.97% en el plano de la falla.

Como se puede observar en la gráfica, ambos planos de deslizamiento tienen un valor en el que la tendencia cambia de forma más o menos brusca, aumentando su probabilidad de fallo. En el

plano de deslizamiento en el contacto presa cimiento este valor coincide con el nivel de laminación. El plano de la falla en cambio, muestra un valor muy cercano a cero, dónde apenas se aprecia la diferencia entre niveles de agua hasta que éste alcanza el valor de 253 msnm, medio metro superior al nivel de laminación. El cambio de tendencia en este plano sin embargo es más brusco que en el plano de contacto entre presa y cimiento, por lo que se podría afirmar que el plano de deslizamiento de la falla es considerablemente más seguro para niveles de agua bajos, mientras que cuando los valores de nivel de agua comienzan a ser elevados este plano empieza a igualar en vulnerabilidad al plano de contacto presa cimiento, en los cuáles ambos serían potencialmente inseguros.

En la siguiente gráfica se han combinado las probabilidades de fallo de cada nivel de agua con su probabilidad de ocurrencia, para así poder chequear que niveles son más seguros y cuales tienen mayor probabilidad de sufrir una sollicitación que provoque el fallo del sistema:



Gráfica 4. Probabilidades de Fallo (Probabilidad de Ocurrencia)

El cambio de las tendencias de los datos que se representan en esta gráfica respecto a la gráfica anterior es claramente observable. Mientras que en la gráfica anterior un nivel de agua superior equivalía a un valor de probabilidad de fallo mayor en el caso de esta gráfica no se sigue la misma tendencia, ya que la tendencia de las probabilidades de ocurrencia es inversa a la de



probabilidad de fallo: un mayor nivel de agua equivale a un valor menor de probabilidad de ocurrencia.

Como puede observarse en la gráfica, en el plano de contacto presa cimientto, la probabilidad de fallo llega hasta un valor máximo de 0.00017 que coincide con un nivel de agua algo superior al nivel de laminación. A partir de este valor, aunque la probabilidad de fallo seguiría aumentando, en este caso que está combinada con la probabilidad de ocurrencia comienza a disminuir a un alto ritmo, debido a que a partir de este nivel de agua las probabilidades de ocurrencia son muy bajas y cada vez más cercanas a cero, por lo que al final de la gráfica se observa como la probabilidad de fallo asociada a la probabilidad de ocurrencia es nula.

En el plano de la falla la tendencia es algo similar aunque con distinta forma como se puede ver en la gráfica. Esta vez el valor máximo se alcanza con un nivel de agua un metro por encima del nivel de laminación, dicho valor es de 0.000014 que es diez veces menor respecto al valor máximo del plano de contacto presa cimientto. Al igual que en el plano de contacto presa cimientto, desde que se alcanza este valor máximo los valores de probabilidad de fallo comienzan a disminuir, aunque en este caso de una forma más suave, hasta que ambos valores se igualan.

Como se puede apreciar los valores máximos de ambos planos no coinciden en el valor del nivel de agua, debido a que a partir del nivel de laminación los valores de probabilidad de fallo no asociados a la probabilidad de ocurrencia en el plano de la falla aumentan de forma más brusca.

El último resultado que se expone correspondiente a los cálculos de la probabilidad de fallo, como se ha comentado en la metodología, es el correspondiente a la probabilidad de fallo total, donde se combinan todas las probabilidades de fallo de los niveles de agua calculados, con su correspondiente probabilidad de ocurrencia, para poder tener así un valor real de la probabilidad real de fallo que tiene la presa, ya que en un mismo resultado combina la probabilidad que tiene la presa de fallar ante un sistema de fuerzas actuando sobre su cuerpo, con la probabilidad que existe de que este sistema de fuerzas se dé. El resultado correspondiente a ambos modos de fallo analizados se expone en la siguiente tabla:



<b>Probabilidad de fallo Total Presa-Cimiento</b>	<b>Probabilidad de Fallo Total Falla</b>
0.0030146	9,53787E-05

*Tabla 8. Probabilidad de Fallo Total*

Como se puede apreciar en la tabla y como se viene comentando en el proyecto, la presa tiene su eslabón más débil en este caso en el plano de contacto presa cimiento, ya que la probabilidad de ocurrencia de los distintos niveles es la misma para ambos modos de fallo, y el sumatorio del primero es casi cien veces superior al correspondiente al plano de la falla.



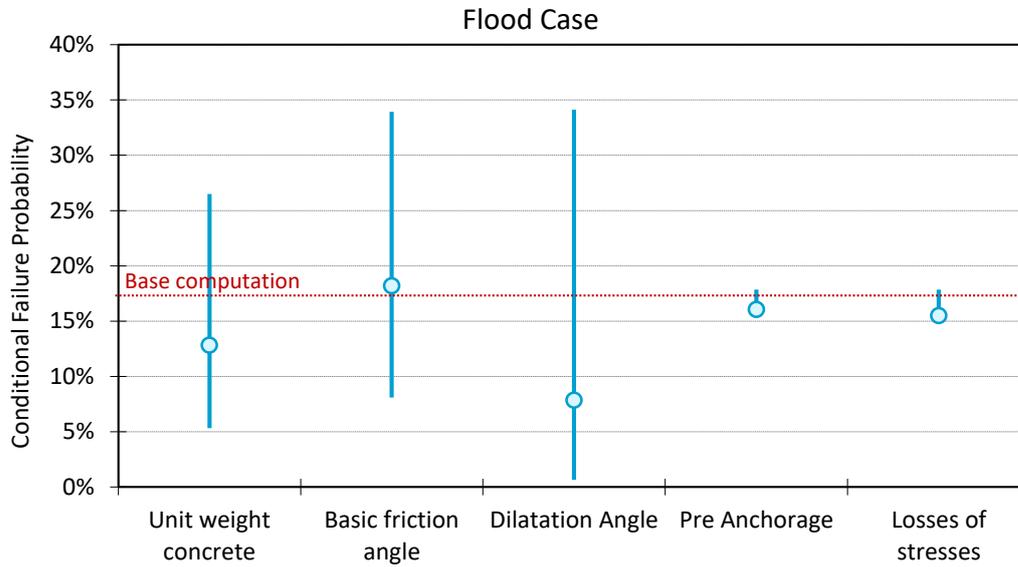
## 5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como ya se ha comentado en la metodología, se ha realizado el análisis de sensibilidad en el proyecto para estimar el peso de cada variable en el resultado final. Para ello se comparan los valores reales obtenidos tras calcular la probabilidad de fallo con los tres valores ya mencionados y es ahí donde se puede ver cómo afecta la variable modificada al resultado final.

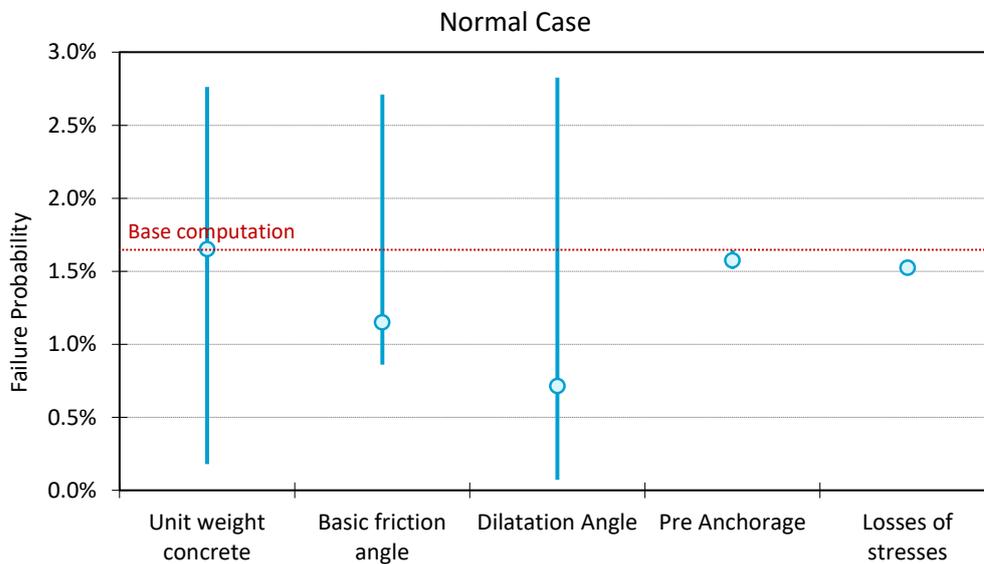
El análisis de sensibilidad se ha realizado sobre las siguientes variables:

- Peso específico del hormigón
- Ángulo de rozamiento presa cimiento
- Ángulo de dilatación
- Fuerza de tesado
- Pérdida de la fuerza de tesado

Los resultados obtenidos, son más representativos de forma gráfica, por lo que se han representado las variables recién mencionadas para los dos casos analizados: caso normal y caso de laminación. En las siguientes tablas, en primer lugar la del caso de carga correspondiente a la avenida y en segundo lugar el caso de carga normal, se puede ver el peso que cada variable tiene sobre el resultado final de una forma muy clara:



Gráfica 5. Análisis de Sensibilidad (Caso Avenida)



Gráfica 6. Análisis de Sensibilidad (Caso Normal)

En estas gráficas se puede ver en color rojo el valor obtenido con las distintas distribuciones antes de realizar el análisis de sensibilidad (Base computation). Junto a cada variable podemos apreciar tres valores diferentes: el punto representa el valor obtenido cuando se fija como valor



de la variable el valor medio de la distribución, mientras que los dos extremos de la línea asociada a cada variable representa los dos valores restantes: el valor medio menos su desviación estándar y el valor medio más su desviación estándar.

Como se puede ver en las escalas de las gráficas, la importancia de la variación en los valores de las variables es superior en el caso de laminación respecto del caso normal. Esto es debido a que al llevar al sistema a trabajar a mayor rendimiento, un aumento o disminución del valor medio de las variables supone un cambio de mayor importancia en el resultado final. Los valores en el caso de laminación llegan a superar el 30% de modificación del valor final, mientras que la modificación en el caso del caso normal, no alcanza el 5%.

Por otro lado, cabe destacar que la variable que más cambios provoca sobre el valor final tanto en el caso de laminación como en el normal es el ángulo de dilatación. Este mayor porcentaje de cambio de esta variable es debido a su valor, inferior al ángulo de rozamiento, tanto medio como el de la desviación, ya que el peso de ambos ángulos en la fórmula del factor de seguridad es similar.

A pesar de la importancia del anclaje en la estabilidad de la presa, puede verse reflejado en las gráficas que su peso en el análisis de sensibilidad es prácticamente nulo, tanto de la importancia de la fuerza inicial como la importancia de la pérdida de la fuerza de tesado. Una de las razones por la cual tendría más importancia la pérdida de la fuerza que la propia fuerza es el peso de su desviación típica, ya que mientras que la pérdida de la fuerza es un 10% de la propia fuerza, su desviación típica es casi la mitad de la fuerza de tesado.



## 6. CONCLUSIONES

En este apartado se expondrán las conclusiones extraídas tanto de los resultados obtenidos, como de la realización de este proyecto.

En primer lugar, la primera conclusión que se obtiene de los resultados es trivial: un mayor nivel de agua supone un mayor empuje hidrostático, lo que equivale a una mayor sollicitación en la presa y por lo tanto una mayor probabilidad de fallo. Esto ocurre en los dos planos estudiados aunque con diferencias entre ellos. En el plano de la falla los niveles de agua comprendidos entre el caso de carga normal y el de laminación son nulos, mientras que un nivel de agua superior al de laminación eleva las probabilidades de fallo sustancialmente. En el plano de contacto presa cimiento en cambio los niveles comprendidos entre el normal y el de laminación tienen una probabilidad de fallo superiores a cero y por encima del nivel de laminación siguen aumentando con una mayor pendiente, pero inferior a la pendiente del plano de la falla.

Respecto a los valores del factor de seguridad, cabe destacar que, como ya se destacó en el apartado de resultados, los correspondientes al caso de laminación presentan unos valores muy bajos (cerca de la unidad), lo que supone una gran inestabilidad frente al caso de carga, a pesar de que este pueda ser un caso excepcional.

Uno de los aspectos más particulares que se ha analizado en este proyecto es la carga del hielo, ya que no suele aparecer en todos los sistemas. Esta carga como carga horizontal se puede asimilar a un aumento del empuje hidrostático, sin embargo, en el análisis de tensiones provoca un mayor momento en la presa, lo que se traduce en mayores tracciones en el pie de aguas arriba y más compresiones en el caso del pie de aguas abajo.

La comprobación de las tensiones en ambos pies de la presa se hace esencial, ya que como se ha mencionado, la aparición de grietas debidas a las tracciones supondría un cambio de planteamiento respecto a las expresiones utilizadas en el cálculo del equilibrio de la presa.

El análisis que se ha realizado sobre la presa como sistema es de vital importancia ya que, tratándose de una estructura de tal importancia ya no solo por lo que aporta como infraestructura en el aspecto de regulación de los recursos hídricos, si no por las consecuencias



que un fallo de la misma provocaría en su entorno, no se puede permitir que el sistema sea vulnerable ante las acciones que debe soportar.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alcalá Perales, Diego (2016) "Spatial variation in uplift pressure and correlation with rock mass conditions under two buttress dams" Máster Thesis. Stockholm, Sweden.
- [2] Altarejos García, L. (2008). "Estimación de la probabilidad de fallo por deslizamiento de una presa de hormigón de gravedad" II Semana Internacional sobre la Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas iPresas. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 31
- [3] Altarejos García, L. (2009). "Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos" Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Balissat, M. et al (2016). 13th ICOLD International Benchmark Workshop on the numerical analysis of dams. Swiss Committee on Dams
- [5] Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y Comité Nacional Español de Grandes Presa (2012) "Análisis de Riesgos Aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses" Guía Técnica de Explotación de Presas y Embalses Tomo 1 Madrid, España
- [6] Duncan C, W and Christopher W, Mah (2004). Rock Slope Engineering. London and New York: Spon Press.
- [7] Escuder Bueno, I. et al (2016). "Computational Aspects of Dam Risk Analysis: Findings and Challenges" Engineering.



[8] Iqbal, Ali (2012) "Probability of Failure for Concrete Gravity Dams for Sliding Failure"

Master of Science Thesis. Stockholm, Sweden

[9] Westerberg Wilde, M and Johansson, F. (2013). System Reliability of Concrete Dams with

Respect to Foundation Stability: Application to a Spilway. ASCE Library.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLO FRENTE A  
DESIZAMIENTO DE UNA PRESA DE HORMIGÓN EN SUECIA

