
Índice general

Agradecimiento	V
Resumen	VII
Resum	IX
Abstract	XI
I INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1. Introducción	3
1.1.- La seguridad de presas.....	3
1.1.1.- Importancia de las presas.....	3
1.1.2.- Las presas en España.....	4
1.1.3.- Roturas y accidentes en presas.....	4
1.1.4.- Las metodologías de evaluación de seguridad de presas.....	4
1.1.5.- La incertidumbre en la evaluación de seguridad de presas. El Análisis de Riesgos.....	5
1.2.- Motivación de la investigación.....	5
1.3.- Propósito y alcance de esta tesis.....	7
1.4.- Planteamiento metodológico.....	8
1.5.- Estructura del documento.....	8
II ESTADO DEL ARTE	11
Capítulo 2. La evaluación de la seguridad de presas de gravedad	13
2.1.- El concepto de seguridad.....	13
2.2.- Caracterización del comportamiento de presas de hormigón de gravedad.....	15
2.2.1.- Introducción.....	15
2.2.2.- Descripción tipológica.....	15
2.2.3.- Acciones a considerar sobre una presa de gravedad.....	16
2.2.4.- Fenómenos relacionados con la seguridad.....	18
2.3.- Métodos de evaluación de seguridad de presas.....	19
2.4.- Métodos clásicos de evaluación de seguridad de presas.....	20
2.4.1. Coeficiente de seguridad global.....	20
2.4.2. Coeficientes de seguridad parciales.....	24
2.4.3. Introducción parcial de la probabilidad en las acciones.....	26
2.4.4. Análisis de eventos extremos.....	28
2.5.- Nuevos métodos de evaluación de seguridad de presas. El análisis de riesgos.....	29
2.5.1 Introducción.....	29
2.5.2 El análisis de riesgos en el contexto internacional.....	30
2.5.3 Conceptos básicos del análisis de riesgos.....	32
2.5.4 Probabilidad condicional de rotura.....	37
2.5.5 Probabilidad total de rotura.....	38
2.5.6 La incertidumbre en el análisis de riesgos.....	42
2.6 La evaluación de seguridad de presas en España.....	43

Capítulo 3. Modelación determinista para la evaluación de seguridad de presas. Generalidades	45
3.1.- Modelación de presas nuevas.....	45
3.2.- Modelación de presas existentes.....	46
3.3.- Modelos lineales y no lineales.....	46
3.4.- Niveles de análisis deterministas.....	47
3.4.1.- Fenómenos analizados. Criterios de clasificación.....	47
3.4.2.-Análisis bidimensional y análisis tridimensional.....	48
3.4.3.- Modelos del dominio presa-cimiento.....	48
3.4.4.- Dominio de flujo.....	49
3.4.5.- Fenómenos hidro-mecánicos.....	49
3.4.6.- Modelos constitutivos del dominio presa-cimiento.....	50
3.4.7.- Niveles de análisis.....	50
3.4.8.- Niveles de análisis dinámico.....	52
3.4.9.- Representación gráfica.....	53
3.5.- Fiabilidad de los modelos.....	53
Capítulo 4. Modelos constitutivos	55
4.1.- Fundamentos.....	55
4.2.- Aplicación a la modelación de presas.....	56
4.2.1.- Cuerpo de presa.....	56
4.2.2.- Cimentación.....	58
4.3.- Modelos del continuo.....	59
4.3.1.- Definición y clasificación.....	59
4.3.2.- Modelos elásticos.....	60
4.3.3.- Modelos de plasticidad asociada.....	62
4.3.3.1.- Definición.....	62
4.3.3.2.- Modelo de Mohr-Coulomb asociado.....	63
4.3.3.3.- Modelo de Drucker-Prager.....	66
4.3.3.4.- Superficies de fluencia compuestas.....	67
4.3.3.5.- Criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos.....	67
4.3.3.6.- Resumen.....	70
4.3.4.- Modelos de plasticidad no asociada.....	70
4.3.4.1.- Definición.....	70
4.3.4.2.- Modelo de Mohr-Coulomb no asociado.....	71
4.3.4.3.- Importancia de la dilatación.....	74
4.3.4.4.- Modelos de Rigidización-Reblandecimiento.....	75
4.3.4.5.- Modelo de Mohr-Coulomb no asociado con Rigidización-Reblandecimiento.....	76
4.3.5.- Modelos hiperbólicos.....	78
4.3.6.- Modelos visco-elásticos.....	79
4.4.- Modelos térmicos.....	82
4.4.1.- Introducción.....	82
4.4.2.- Propiedades de los materiales.....	83
4.4.2.1.- Conductividad.....	83
4.4.2.2.- Densidad.....	83
4.4.2.3.- Calor específico.....	83
4.4.2.4.- Difusividad.....	84
4.4.3.- Transmisión de calor.....	84
4.4.4.- Fenómenos térmicos en presas.....	85
4.4.4.1.- Fenómenos internos.....	85
4.4.4.2.- Fenómenos externos.....	85
4.4.5.- Tipos de modelos.....	87
Capítulo 5. Modelos para las discontinuidades y mecánica de fractura	89
5.1.- Modelos para discontinuidades definidas entre sólidos rígidos.....	89
5.1.1.- Resistencia al corte en superficies planas. Modelo Mohr-Coulomb.....	89
5.1.2.- Resistencia a corte en superficies rugosas. Modelo de Barton.....	92
5.2.- Modelos para discontinuidades definidas entre sólidos deformables.....	94
5.3.- Modelos de mecánica de fractura.....	96
5.3.1.- Clasificación.....	96
5.3.2.- Modelos de fractura elástica y lineal (Linear Elastic Fracture Models ó LEFM).....	96
5.3.3.- Modelos de fractura no lineales (Non Linear Fracture Models o NLFM).....	98
5.3.4.- Modelos de daño (Damage Models).....	103
5.3.5.- Modelos obtenidos por combinación.....	103

5.4.- Las discontinuidades en el análisis de presas de gravedad de hormigón vibrado.....	105
5.4.1.- Clasificación de las discontinuidades.....	105
5.4.2.- Las presiones intersticiales en las discontinuidades.....	106
Capítulo 6. Análisis dinámico	111
6.1.- Acción sísmica.....	111
6.1.1.- Naturaleza aleatoria de la acción sísmica.....	111
6.1.2.- Definición de la acción sísmica en función del tipo de análisis.....	112
6.3.- Modelo estructural.....	114
6.3.1.- Planteamiento general del problema.....	114
6.3.2.- Ecuación del movimiento y métodos de resolución.....	115
6.4.- Métodos de análisis dinámico.....	116
6.4.1.- Niveles y metodologías de análisis dinámico de presas.....	116
6.4.2.- Método pseudo-estático.....	117
6.4.3.- Análisis Modal.....	117
6.4.3.1.- Método del espectro de respuesta.....	117
6.4.3.2.- Análisis modal lineal en el dominio del tiempo.....	123
6.4.4.- Análisis Dinámico Directo.....	124
6.4.4.1.- Análisis lineal en el dominio del tiempo.....	124
6.4.4.2.- Análisis no lineal en el dominio del tiempo.....	124
6.4.5.- Interacción Presa-Embalse-Cimiento.....	124
6.5.- Propiedades de los materiales.....	127
Capítulo 7. Modelos numéricos	129
7.1.- Modelos deterministas.....	129
7.1.1.- Definición.....	129
7.1.2.- Métodos de elementos de contorno.....	130
7.1.3.- Métodos de elementos del dominio.....	130
7.1.4.- Método de Elementos Finitos.....	132
7.1.5.- Método de Diferencias Finitas.....	143
7.1.6.- El código <i>FLAC</i>	145
7.1.6.1.- Descripción.....	145
7.1.6.2.- Tipos de problemas.....	146
7.1.6.3.- Elementos y reglas de integración.....	147
7.1.6.4.- Disponibilidad de modelos según elementos.....	148
7.1.6.5.- Métodos de resolución de ecuaciones.....	148
7.1.6.6.- Algoritmos de resolución de problemas no lineales.....	149
7.1.6.7.- Simulación de fractura.....	150
7.1.6.8.- Resumen de características principales.....	150
7.1.6.9.- Experiencias en uso de <i>FLAC</i> para la modelación de presas de hormigón.....	150
7.2.- Modelos estadísticos.....	151
7.3.- Modelos híbridos.....	152
7.4.- Modelos adaptativos.....	152
7.5.- Utilidad de los modelos.....	153
Capítulo 8. Métodos probabilísticos	155
8.1. Métodos probabilísticos. Niveles de análisis.....	155
8.2.- Métodos de Nivel 2 o de momentos de segundo orden.....	156
8.2.1.- Fundamentos.....	156
8.2.2.- Desarrollo en serie de Taylor alrededor del valor medio.....	157
8.2.3.- Método de estimación puntual (Point Estimate Method).....	161
8.2.4.- Método de Hasofer-Lind.....	166
8.3.- Métodos de Nivel 3.....	169
8.3.1.- Generalidades.....	169
8.3.2.- Métodos de fiabilidad de primer orden (FORM).....	170
8.3.3.- Métodos de fiabilidad de segundo orden (SORM).....	172
8.3.4.- Métodos de integración.....	172
8.3.5.- Métodos de simulación.....	178

III PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	187
Capítulo 9. Metodología de estimación de la probabilidad de fallo	189
9.1.- Planteamiento general.....	189
9.2.- Desarrollo de la metodología.....	195
9.3.- Aplicación al caso de estudio.....	199
IV APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO	201
Capítulo 10. Caso de estudio. Modelo de riesgo y modelos de análisis	203
10.1.- Modelo General de Riesgo de la presa de estudio.....	203
10.1.1.- Recopilación de información y contexto.....	204
10.1.1.1.- Aspectos generales.....	204
10.1.1.2.- Aspectos hidrológico-hidráulicos.....	205
10.1.1.3.- Aspectos geológico-geotécnicos.....	206
10.1.1.4.- Aspectos estructurales.....	207
10.1.1.5.- Instalaciones y elemento anejos.....	209
10.1.1.6.- Revisión de los documentos de seguridad de la presa.....	209
10.1.2.- Escenarios de solicitud.....	209
10.1.2.1.- Escenario Hidrológico.....	210
10.1.2.2.- Escenario Sísmico.....	211
10.1.3.- Selección del modo de fallo a analizar.....	213
10.1.4.- Respuesta del sistema: probabilidades condicionales.....	220
10.1.4.1.- Respuesta del sistema: emisión de probabilidades por juicio de experto.....	220
10.1.4.2.- Respuesta del sistema: probabilidades por modelos analíticos.....	220
10.2.- Modelos de análisis para el deslizamiento en el contacto presa-cimiento en la sección aliviadero.....	222
10.2.1.- Clasificación de los modelos.....	222
10.2.2.- Modelo Base (equilibrio límite).....	224
10.2.2.1.- Formulación general.....	224
10.2.2.2.- Criterio de apertura y propagación de una grieta en el plano de contacto presa-cimiento.....	226
10.2.2.3.- Solicitaciones.....	227
10.2.3.- Modelo Avanzado (sólido deformable).....	228
10.2.3.1.- Formulación general.....	228
10.2.3.2.- Geometría.....	229
10.2.3.3.- Condiciones de contorno.....	230
10.2.3.4.- Modelos constitutivos.....	231
10.2.3.5.- Interfaz presa-cimiento.....	232
10.2.3.6.- Criterio de apertura y propagación de una grieta en la interfaz.....	233
10.2.3.7.- Solicitaciones.....	234
Capítulo 11. Caso de estudio. Variables consideradas Acciones y parámetros de los materiales	239
11.1.- Acciones a considerar.....	239
11.1.1.- Peso propio.....	239
11.1.1.1.- Volumen de hormigón. Área de la sección de cálculo.....	239
11.1.1.2.- Densidad del hormigón.....	243
11.1.2.- Empuje hidráulico.....	245
11.1.2.1.- Empuje hidrostático aguas arriba.....	245
11.1.2.2.- Empuje hidrostático aguas abajo.....	248
11.1.3.- Presión intersticial. Subpresión.....	248
11.1.3.1.- Caso estático.....	249
11.1.3.2.- Caso dinámico.....	253
11.1.3.3.- Caracterización probabilística de la subpresión. Parámetros.....	253
11.1.4.- Variación térmica.....	260
11.1.5.- Empuje de los sedimentos.....	261
11.1.5.1.- Factores que intervienen.....	261
11.1.5.2.- Peso específico sumergido de los sedimentos.....	261
11.1.5.3.- Altura de los sedimentos.....	263
11.1.5.4.- Coeficiente de empuje.....	264
11.1.6.- Acción del oleaje.....	264
11.1.7.- Acción del hielo.....	265
11.1.8.- Otras solicitaciones.....	266

11.1.9.- Efecto sísmico.....	266
11.1.9.1.- Consideraciones generales sobre incertidumbres en el análisis sísmico.....	266
11.1.9.2.- Definición de la acción sísmica.....	267
11.2.- Propiedades de los materiales. Caracterización probabilística.....	270
11.2.1.- Propiedades del hormigón.....	271
11.2.1.1.- Descripción del material.....	271
11.2.1.2.- Propiedades tenso-deformacionales estáticas del hormigón.....	271
11.2.1.3.- Propiedades tenso-deformacionales dinámicas del hormigón.....	273
11.2.1.4.- Propiedades resistentes estáticas del hormigón.....	273
11.2.2.- Propiedades en las juntas horizontales del hormigón.....	276
11.2.2.1.- Resistencia a tracción en las juntas del hormigón.....	276
11.2.2.2.- Resistencia al corte en las juntas horizontales del hormigón.....	277
11.2.3.- Propiedades del macizo de cimentación.....	279
11.2.3.1.- Estructura del macizo rocoso.....	279
11.2.3.2.- Roca matriz.....	280
11.2.3.3.- Juntas del macizo rocoso.....	281
11.2.3.4.- Propiedades del macizo rocoso.....	281
11.2.3.5.- Modelo Hoek-Brown para el macizo rocoso.....	283
11.2.4.- Propiedades del contacto presa-cimiento.....	289
11.2.4.1.- Resistencia a la tracción en el contacto presa-cimiento ($\sigma_{t,i}$).....	289
11.2.4.2.- Resistencia al corte en el contacto presa-cimiento.....	290
Capítulo 12. Análisis de fiabilidad sobre el Modelo Base	299
12.1.- Esquema global de análisis.....	299
12.2.- Características del modelo y definición del estado límite.....	300
12.3.- Escenario hidrológico.....	301
12.3.1.- Niveles de embalse.....	301
12.3.2.- Análisis de Nivel 1 (coeficientes de seguridad).....	302
12.3.2.1.- Variables consideradas.....	302
12.3.2.2.- Coeficientes de seguridad obtenidos.....	302
12.3.2.3.- Análisis de los resultados.....	302
12.3.3.- Análisis de Nivel 2. Método de Taylor.....	306
12.3.3.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	306
12.3.3.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	307
12.3.3.3.- Análisis de los resultados.....	307
12.3.3.4.- Análisis con reducción del número de variables.....	309
12.3.4.- Análisis de Nivel 2. Método de Estimación Puntual.....	312
12.3.4.1.- Fundamentos. Problema de la dimensionalidad. Variables consideradas.....	312
12.3.4.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	313
12.3.4.3.- Análisis de los resultados.....	313
12.3.5.- Análisis de Nivel 2. Método de Hasofer y Lind.....	316
12.3.5.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	316
12.3.5.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	317
12.3.5.3.- Análisis de los resultados.....	317
12.3.6.- Análisis de Nivel 3. Método de Monte Carlo.....	322
12.3.6.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	322
12.3.6.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	323
12.3.6.3.- Análisis de los resultados.....	324
12.3.6.4.- Análisis con reducción del número de variables.....	325
12.3.6.5.- Análisis con curvas límite. Aplicación al caso de dos variables aleatorias.....	325
12.4.- Escenario sísmico.....	332
12.4.1.- Niveles de embalse y aceleraciones sísmicas de cálculo.....	332
12.4.2.- Análisis de Nivel 1 (coeficientes de seguridad).....	333
12.4.2.1.- Variables consideradas.....	333
12.4.2.2.- Coeficientes de seguridad obtenidos.....	333
12.4.2.3.- Análisis de los resultados.....	333
12.4.3.- Análisis de Nivel 2. Método de Taylor.....	338
12.4.3.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	338
12.4.3.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	339
12.4.3.3.- Análisis de los resultados.....	341
12.4.4.- Análisis de Nivel 2. Método de Estimación Puntual.....	341
12.4.4.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	341
12.4.4.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	341
12.4.4.3.- Análisis de los resultados.....	344

12.4.5.- Análisis de Nivel 2. Método de Hasofer-Lind.....	344
12.4.5.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	344
12.4.5.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	344
12.4.5.3.- Análisis de los resultados.....	344
12.4.6.- Análisis de Nivel 3. Método de Monte Carlo.....	347
12.4.6.1.- Fundamentos. Variables consideradas.....	347
12.4.6.2.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	347
12.4.6.3.- Análisis de los resultados.....	356
12.4.7.- Comparativa entre métodos de nivel 2 y métodos de nivel 3.....	356
12.5.- Influencia de la correlación entre variables aleatorias.....	360
12.5.1.- Hipótesis de correlación y nivel de análisis.....	360
12.5.2.- Probabilidades condicionales con variables correlacionadas en Escenario Hidrológico.....	361
12.5.3.- Probabilidades condicionales con variables correlacionadas en Escenario Sísmico.....	366
12.5.4.- Análisis de los resultados.....	389
Capítulo 13. Análisis de fiabilidad sobre el Modelo Avanzado	393
13.1.- Esquema global de análisis.....	393
13.2.- Características del modelo y definición del estado límite.....	394
13.2.1.- Características del modelo.....	394
13.2.2.- Definición del estado límite.....	395
13.3.- Escenario hidrológico.....	396
13.3.1.- Niveles de embalse.....	396
13.3.2.- Análisis de Nivel 1 (coeficientes de seguridad).....	396
13.3.2.1.- Variables consideradas.....	396
13.3.2.2.- Método de cálculo del coeficiente de seguridad.....	397
13.3.2.3.- Coeficientes de seguridad obtenidos.....	399
13.3.2.4.- Análisis de los resultados.....	399
13.3.2.5.- Comparación con los resultados del modelo de equilibrio límite.....	405
13.3.2.6.- Sensibilidad de los resultados a la resistencia a la tracción en el contacto.....	406
13.3.2.7.- Sensibilidad de los resultados a la rigidez relativa presa-cimiento.....	409
13.3.2.8.- Análisis con curvas límite.....	411
13.3.3.- Análisis de Nivel 2.....	415
13.3.4.- Análisis de Nivel 3. Método de Monte Carlo.....	415
13.3.4.1.- Fundamentos.....	415
13.3.4.2.- Metodología.....	417
13.3.4.3.- Aplicación al caso de dos variables aleatorias independientes.....	419
13.3.4.4.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	430
13.3.4.5.- Análisis de los resultados obtenidos.....	430
13.4.- Escenario sísmico.....	432
13.4.1.- Niveles de embalse y aceleraciones sísmicas de cálculo.....	432
13.4.2.- Análisis de Nivel 1 (coeficientes de seguridad).....	432
13.4.2.1.- Variables consideradas.....	432
13.4.2.2.- Método de cálculo del coeficiente de seguridad.....	433
13.4.2.3.- Coeficientes de seguridad obtenidos.....	433
13.4.2.4.- Comparativa con los resultados obtenidos con el modelo de equilibrio límite.....	433
13.4.3.- Análisis de Nivel 2.....	435
13.4.4.- Análisis de Nivel 3.....	435
13.4.4.1.- Fundamentos y metodología.....	435
13.4.4.2.- Aplicación al caso de dos variables aleatorias independientes.....	436
13.4.4.3.- Probabilidades condicionales obtenidas.....	439
13.4.4.4.- Análisis de los resultados obtenidos.....	441
13.5.- Influencia de la correlación entre variables aleatorias en Escenario Hidrológico.....	445
13.5.1.- Hipótesis de correlación y nivel de análisis.....	445
13.6.- Sensibilidad de los resultados al criterio de fallo adoptado.....	447
Capítulo 14. Repercusión sobre los resultados globales del Modelo de Riesgo	449
14.1.- Fases del Análisis de Riesgo.....	449
14.2.- Estimación de daños y consecuencias.....	450
14.2.1.- Metodología general.....	450
14.2.2.- Consecuencias en términos de vidas humanas.....	451
14.2.3.- Consecuencias en términos de daños económicos.....	451
14.2.4.- Consecuencias sobre el sistema de recursos hídricos.....	452
14.2.5.- Consecuencias en términos del coste de reconstrucción.....	454
14.3.- Herramienta de cálculo para el análisis de riesgos.....	454

14.4.- Probabilidades condicionales de fallo utilizadas.....	456
14.5.- Resultados obtenidos con el Modelo General de Riesgo.....	466
14.6.- Repercusión sobre la toma de decisiones.....	479
V CONCLUSIONES..	481
Capítulo 15. Conclusiones y futuras líneas de investigación	483
15.1.- Resumen de aportaciones.....	483
15.1.1.- En relación con la metodología.....	483
15.1.2.- En relación con los métodos numéricos.....	484
15.1.3.- En relación con los métodos de fiabilidad.....	485
15.1.4.- En relación con el caso de estudio.....	486
15.2.- Conclusiones.....	486
15.2.1.- En relación con el estado del arte.....	486
15.2.2.- En relación con la metodología propuesta.....	487
15.2.3.- En relación con los métodos numéricos.....	488
15.2.4.- Conclusiones en cuanto a métodos de fiabilidad.....	489
15.2.5.- Conclusiones en cuanto al caso de estudio.....	489
15.3.- Futuras líneas de investigación.....	490
VI APÉNDICES	493
Apéndice 1. Modelo de Equilibrio Límite	495
A1.1.- Introducción.....	495
A1.2.- Modelo de equilibrio límite.....	496
A1.3.- Algoritmo de cálculo de apertura y propagación de fisura para la hoja de cálculo empleada.....	507
Apéndice 2. Métodos de Fiabilidad de Nivel 2	509
A2.1.- Introducción.....	509
A2.2.- Esquema de cálculo para Nivel 2.....	510
Apéndice 3. Métodos de Fiabilidad de Nivel 3	519
A3.1.- Introducción.....	519
A3.2.- Esquema de cálculo para Nivel 3. Método de Monte Carlo.....	520
A3.3.- Algoritmo de conteo de fallos con curvas límite para la hoja de cálculo empleada.....	521
Apéndice 4. Validación del Modelo Numérico	523
A4.1.- Introducción.....	523
A4.2.- Caso analizado.....	523
A4.3.- Códigos utilizados en la resolución del problema.....	526
A4.4.- Obtención y comparación de resultados.....	527
A4.4.1.- Resultados a obtener con los modelos.....	527
A4.4.2.- Modelo FRAC-DAM.....	527
A4.4.3.- Modelo LUSAS.....	530
A4.4.4.- Resultados obtenidos con DIANA.....	534
A4.4.5.- Resultados obtenidos con FLAC.....	537
A4.4.6.- Comparativa de resultados y conclusiones.....	544
A4.5.- Listados de modelos elaborados en FLAC.....	551
Apéndice 5. Influencia del Tamaño de Malla Sobre los Resultados del Modelo Numérico FLAC	589
A5.1.- Introducción.....	589
A5.2.- Resultados obtenidos.....	592
Apéndice 6. Rutinas en <i>FLAC</i>	597
A6.1.- Introducción.....	597
A6.2.- Algoritmos de cálculo en lenguaje de programación <i>FISH</i>	598
A6.3.- Rutinas tipo en <i>FLAC</i> para análisis en Nivel 1.....	629
A6.4.- Rutinas tipo en <i>FLAC</i> para análisis en Nivel 3.....	633
Bibliografía	637