

Índice

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS, ESTRUCTURA Y CONTRIBUCIONES DE LA TESIS.....	2
1.2.1	Objetivos	2
1.2.2	Estructura.....	4
1.2.3	Contribuciones de la tesis.....	5
Capítulo 2	ESTADO DEL ARTE	9
2.1	DISEÑO DE MUROS PANTALLA.....	9
2.1.1	Métodos de equilibrio límite.....	12
2.1.2	Método del módulo de balasto.....	14
2.1.3	Método de elementos finitos.....	15
2.1.4	Otros métodos.....	20
2.2	LA INCERTIDUMBRE EN GEOTECNIA.....	22
2.2.1	Incertidumbre y riesgo.....	22
2.2.2	La seguridad en el diseño.....	24
2.2.3	El método observacional.....	30
2.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA INVERSO.....	31

2.4	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS	33
2.4.1	Métodos de fiabilidad.....	34
2.4.2	Métodos muestrales.....	37
2.4.3	Elementos finitos estocásticos	40
2.5	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN.....	45
2.5.1	Métodos enumerativos.....	47
2.5.2	Métodos deterministas.....	47
2.5.3	Métodos estocásticos	48
2.6	PROBLEMAS INVERSOS EN GEOTECNIA	53
2.6.1	Mínimos cuadrados.....	54
2.6.2	Máxima verosimilitud.....	55
2.6.3	Inferencia bayesiana	57
2.6.4	Filtros de Kalman.....	58
2.7	CONCLUSIONES DEL SEGUNDO CAPÍTULO	58
Capítulo 3 FUNDAMENTOS ESTADÍSTICOS		61
3.1	VARIABLES Y PROCESOS ALEATORIOS.....	61
3.2	LA EXPANSIÓN DE KARHUNEN-LOÈVE (KL).....	64
3.3	EXPANSIÓN DE POLINOMIOS CAÓTICOS (PCE).....	65
3.3.1	Caos homogéneo.....	66
3.3.2	Polinomios caóticos unidimensionales.....	69
3.3.3	Polinomios caóticos multidimensionales	70

3.3.4	Truncamiento de la serie	71
3.4	ELEMENTOS FINITOS ESTOCÁSTICOS INTRUSIVOS	72
3.5	ELEMENTOS FINITOS ESTOCÁSTICOS NO INTRUSIVOS.....	73
3.6	CONCLUSIONES DEL TERCER CAPÍTULO.....	78
Capítulo 4 METODOLOGÍA		81
4.1	INTRODUCCIÓN.....	81
4.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA INVERSO	84
4.3	ESTRATEGIA BAYESIANA	87
4.3.1	Planteamiento bayesiano adoptado.....	87
4.3.2	Caso A. Incertidumbre insignificante en modelo y observaciones ...	92
4.3.3	Caso B. Incertidumbre insignificante en el modelo.....	94
4.3.4	Caso C. Incertidumbre insignificante en las observaciones.....	96
4.3.5	Caso D. Incertidumbre apreciable en modelo y observaciones	98
4.3.6	Determinación de las marginales	99
4.4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO SUBROGADO	100
4.4.1	Introducción	100
4.4.2	Determinación analítica de la covarianza del modelo subrogado...	102
4.4.3	Determinación de la influencia de cada variable en la varianza	104
4.5	ERROR DE TRUNCAMIENTO	106
4.5.1	Estructura del error de truncamiento	106

4.5.2	Dificultad en la estimación del tamaño del error de truncamiento.....	108
4.5.3	Estimación del tamaño del error de truncamiento.....	110
4.6	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA INVERSO.....	114
4.7	DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD.....	119
4.8	PARTICULARIZACIÓN A MODELO LINEAL.....	121
4.9	CONCLUSIONES DEL CUARTO CAPÍTULO	122
Capítulo 5 CALIBRACIÓN ESTOCÁSTICA		125
5.1	IDENTIFICACIÓN DE UN PARÁMETRO EN UN EJEMPLO SINTÉTICO	125
5.1.1	Planteamiento del problema inverso	126
5.1.2	Resolución directa.....	128
5.1.3	Resolución mediante modelo subrogado	130
5.2	IDENTIFICACIÓN DE CINCO PARÁMETROS EN UN EJEMPLO SINTÉTICO	138
5.2.1	Modelo sintético.....	138
5.2.2	Planteamiento del problema inverso	142
5.2.3	Resolución del problema inverso	144
5.3	IDENTIFICACIÓN DE NUEVE PARÁMETROS EN EJEMPLO REAL.....	152
5.3.1	Descripción de la excavación	152

5.3.2	Descripción del terreno.....	155
5.3.3	Modelo de cálculo empleado	157
5.3.4	Planteamiento del problema inverso	159
5.3.5	Resolución del problema inverso	162
5.4	CONCLUSIONES DEL QUINTO CAPÍTULO.....	173
Capítulo 6	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	177
6.1	CONCLUSIONES.....	177
6.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	180
	REFERENCIAS	183

Relación de figuras

Figura 2-1 Imágenes de fases constructivas de un muro pantalla.	10
Figura 2-2 Proceso habitual para el diseño y supervisión de excavaciones profundas [2].....	11
Figura 2-3 Esquema de cálculo de la cimentación considerando o no la interacción suelo-estructura, (a) equilibrio límite, (b) balasto y (c) elementos finitos [23].	12
Figura 2-4 Empujes al reposo, activo y pasivo de un suelo puramente friccional según Rankine en un plano de tensiones de Mohr-Coulomb.	13
Figura 2-5 Comportamiento del terreno, (a) esquema de múltiples superficies de fluencia, (b) ley tensión deformación y (c) evolución de la deformación plástica con la deformación total [38].	16
Figura 2-6 Zona de pequeñas deformaciones en una excavación [22].	17
Figura 2-7 Predicción de mediante método semi-empírico de deflexiones y asientos de una pantalla [47].	19
Figura 2-8 Dos vistas del colapso de la excavación de la autopista de Nicoll en Singapur (a) daños en la excavación y (b) daños en la autopista [52].	21
Figura 2-9 Tira cómica de Calvin y Hobbes [61].	24
Figura 2-10 Clasificación de los métodos probabilísticos más habituales.	35

Figura 2-11 (a) Problema de fiabilidad general, (b) solución empleando FORM [74].....	36
Figura 2-12 Ejemplo del uso del muestreo de hipercubo latino para dos variables y cinco realizaciones [75].	40
Figura 2-13 Esquema de los elementos finitos estocásticos. Como los parámetros m : E , ν , φ , c son variables aleatorias representadas por sus correspondientes funciones de distribución, el modelo g da los desplazamiento nodales d_j como variables aleatorias.....	41
Figura 2-14 Esquema de los elementos finitos estocásticos no intrusivos.	43
Figura 2-15 Explicación gráfica del método de máxima verosimilitud, (a) representación de $\Theta(\mathbf{d},\mathbf{m})$ y (b) determinación del punto de máxima verosimilitud (adaptado de [114]).....	56
Figura 4-1 Proceso de resolución de un problema inverso, (a) distribución <i>a priori</i> conjunta de parámetros y observaciones con sus marginales, (b) distribución conjunta del modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i> conjunta con sus marginales (adaptado de Tarantola [3]).	90
Figura 4-2 Explicación gráfica del Caso A (incertidumbre insignificante en modelo y observaciones), (a) distribución <i>a priori</i> conjunta de parámetros y observaciones con sus marginales, (b) distribución conjunta del modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i> conjunta con sus marginales.....	93

Figura 4-3 Explicación gráfica del Caso B (incertidumbre insignificante en el modelo), (a) distribución <i>a priori</i> conjunta de parámetros y observaciones con sus marginales, (b) distribución conjunta del modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i> conjunta con sus marginales.....	95
Figura 4-4 Explicación gráfica del Caso C (incertidumbre insignificante en las observaciones), (a) distribución <i>a priori</i> conjunta de parámetros y observaciones con sus marginales, (b) distribución conjunta del modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i> conjunta con sus marginales.	97
Figura 4-5 Explicación gráfica del Caso D (incertidumbre apreciable en modelo y observaciones), (a) distribución <i>a priori</i> conjunta de parámetros y observaciones con sus marginales, (b) distribución conjunta del modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i> conjunta con sus marginales.	99
Figura 4-6 Evolución de la var s con el grado de la PCE.....	109
Figura 4-7 (a) acotación unidimensional de la varianza, (b) análisis en componentes principales de las varianzas.....	111
Figura 4-8 Ejes principales de los residuos.....	117
Figura 4-9 Proceso iterativo para la resolución del problema inverso.....	118
Figura 5-1 Modelo en voladizo del muro pantalla.....	126
Figura 5-2 Resolución bayesiana del problema inverso sin incertidumbres ni en las observaciones, ni en el modelo, (a) distribución <i>a priori</i> , (b) distribución modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i>	129
Figura 5-3 Primera iteración, (a) distribución <i>a priori</i> , (b) distribución modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i>	133
Figura 5-4 Segunda iteración, (a) distribución <i>a priori</i> , (b) distribución modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i>	134

Figura 5-5 Tercera iteración, (a) distribución <i>a priori</i> , (b) distribución modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i>	134
Figura 5-6 Cuarta iteración, (a) distribución <i>a priori</i> , (b) distribución modelo, (c) distribución <i>a posteriori</i>	135
Figura 5-7 Explicación gráfica del proceso de resolución por iteraciones sucesivas, sobre el rango inicial (a) y sobre un rango reducido (b).	136
Figura 5-8 Evolución de $\text{var } \varepsilon_t$ con las iteraciones, (a) escala logarítmica, (b) escala natural.....	137
Figura 5-9 Malla de elementos finitos empleada y puntos en los que se toman medidas de desplazamiento. Sin colorear las arenas y en gris el muro.....	139
Figura 5-10 Etapas de construcción, (a) imposición de tensiones iniciales, (b) excavación.....	140
Figura 5-11 Desplazamientos horizontales del terreno muro y del muro (en metros) tras la excavación.....	141
Figura 5-12 Evolución de las funciones de distribución de probabilidad marginal de los parámetros tras seis iteraciones (el punto indica en cada gráfico el parámetro “real”).....	146
Figura 5-13 Puntos de máxima verosimilitud junto con intervalos de confianza del 95% de los parámetros por iteración	147
Figura 5-14 Evolución de $\text{var } \varepsilon_t$ con las iteraciones, (a) escala logarítmica, (b) escala natural.....	148
Figura 5-15 Movimientos registrados de la pantalla y predicciones del modelo en cada iteración junto intervalos de confianza al 95%.....	149
Figura 5-16 Influencia relativa de cada parámetro del modelo en la varianza de la respuesta media según se itera.....	150

Figura 5-17 (a) Sección y (b) planta de la pantalla experimental [7].....	153
Figura 5-18 Resultados de ensayos CPT e identificación de capas [153].....	156
Figura 5-19 Malla de elementos finitos empleada (en amarillo nivel seco, en ocre saturado). En trazo más grueso pantalla y puntal.....	158
Figura 5-20 Convergencia del modelo subrogado al modelo directo original....	164
Figura 5-21 Evolución de $\text{var } \varepsilon_i$ con las iteraciones, (a) escala natural, (b) escala logarítmica.	166
Figura 5-22 Evolución de la influencia de cada parámetro en la varianza de la respuesta total.....	167
Figura 5-23 Evolución de las distribuciones marginales de los parámetros.....	168
Figura 5-24 Evolución de los puntos de máxima verosimilitud junto con el intervalo de confianza del 95%.....	169
Figura 5-25 Comparación de los resultados obtenidos a partir de los parámetros más verosímiles de la calibración (Cuadro 5-15), los valores propuestos por Mestat y Arafati [56](Cuadro 5-9) y las lecturas obtenidas de la auscultación en a) etapa 5, excavación hasta 4.0 m b) etapa 6, excavación hasta 5.0 m y c) etapa 7, Aplicación carga en trasdós (llenado depósito).	171

Relación de cuadros

Cuadro 2-1 Principales factores de incertidumbre en la validación de un modelo [56]	23
Cuadro 2-2 Diferentes definiciones de la resistencia al levantamiento de una zapata y su influencia en el factor de seguridad [63].....	26
Cuadro 3-1 Correspondencia entre el tipo de polinomios caóticos y su variable aleatoria asociada [6].....	70
Cuadro 3-2 Número de evaluaciones aproximadas del modelo directo para generar un diseño experimental adecuado según la regla empírica [125].....	78
Cuadro 4-1 Casos a considerar en función del grado de incertidumbre en el modelo y en las observaciones.....	92
Cuadro 5-1 Propiedades determinar el desplazamiento en cabeza del muro.....	127
Cuadro 5-2 Intervalos de confianza del 95% tras cada iteración junto con el error de truncamiento y el punto de máxima verosimilitud (PMV).	135
Cuadro 5-3 Parámetros con los que se generan las observaciones.....	139
Cuadro 5-4 Movimientos horizontales empleados como observaciones \mathbf{d}_{obs} calculados a partir de los parámetros recogidos en el Cuadro 5-3...	141
Cuadro 5-5 Rango típico de los parámetros buscados.....	142
Cuadro 5-6 Discretización de los parámetros buscados	151
Cuadro 5-7 Características resistentes de las tablestacas instaladas [152]	154
Cuadro 5-8 Etapas de construcción	155

Cuadro 5-9 Parámetros del modelo constitutivo de Mohr Coulomb propuestos por [56] para las arenas de Hochstetten.....	156
Cuadro 5-10 Etapas consideradas en el modelado.....	157
Cuadro 5-11 Características del modelo de elementos finitos.....	159
Cuadro 5-12 Movimientos horizontales empleados como observaciones \mathbf{d}_{obs} para la calibración [7].....	160
Cuadro 5-13 Rango adoptado de los parámetros a determinar en el análisis inverso.....	160
Cuadro 5-14 Valores de los parámetros deterministas del modelo	161
Cuadro 5-15 Resumen del análisis.....	170
Cuadro 5-16 Discretización de los parámetros buscados.....	172