

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción y motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Contenido del trabajo de memoria	4
2. Metodología de Trabajo	6
2.1. Diseño de sistema	6
2.2. Comunicación entre softwares y manipulación de datos	6
2.3. Confección de modelos sustitutos	6
2.4. Cuantificación de incertidumbre	7
3. Marco Teórico	8
3.1. Geotecnia: Embalse de relaves	8
3.1.1. Depósitos de relaves	8
3.1.1.1. Descripción de elementos	9
3.1.1.2. Tipos de depósitos	11
3.1.1.3. Métodos constructivos	11
3.1.1.4. Sistemas de control y monitoreo	12
3.1.1.5. Parámetros geotécnicos	12
3.1.1.6. Mecanismos de falla	14
3.1.2. Análisis de depósitos de relaves: Estabilidad física	15
3.1.2.1. Análisis estático	15
3.1.2.2. Análisis pseudoestático	15
3.1.2.3. Análisis dinámico	16
3.1.3. Métodos de análisis de estabilidad física	16
3.1.3.1. Método de equilibrio límite	16
3.1.3.2. Métodos finitos	17
3.1.4. Mecanismo de cálculo y modelamiento en FLAC3D	18
3.1.4.1. Descripción	18
3.1.4.2. Formulación matemática	18
3.1.4.3. Representación de elementos	19
3.1.4.4. Resolución de equilibrio y factor de seguridad	19
3.1.4.5. Argumento de uso de método	21
3.1.4.6. Modelamiento	21
3.1.5. Comentarios sobre revisión bibliográfica	21

3.2.	Modelamiento Sustituto	23
3.2.1.	Modelos sustitutos	23
3.2.2.	Métodos predictivos	23
3.2.3.	Método Kriging o regresión en procesos Gaussianos	25
3.2.3.1.	Conceptos previos	25
3.2.3.2.	Definición y descripción del método	26
3.2.3.3.	Preparación de base de datos	27
3.2.3.4.	Entrenamiento y optimización del modelo	28
3.2.3.5.	Predicción	30
3.2.3.6.	Validación de modelo	31
3.2.3.6.1.	Validación cruzada	31
3.2.3.6.2.	Validación de datos de prueba o test	33
3.2.3.7.	Características del método	34
3.2.4.	Comentarios sobre revisión bibliográfica	34
3.3.	Cuantificación de Incertidumbre	36
3.3.1.	Conceptos básicos	36
3.3.2.	Propagación de incertidumbre	37
3.3.3.	Probabilidad de falla	39
3.3.4.	Análisis de sensibilidad	40
3.3.5.	Comentarios sobre revisión bibliográfica	42
4.	Diseño de Modelo de Embalse de Relaves	43
4.1.	Bases de diseño	43
4.1.1.	Categorización de embalse	43
4.1.2.	Dimensiones	44
4.1.3.	Análisis de estabilidad	46
4.2.	Geometría	47
4.3.	Caracterización geotécnica	49
4.4.	Modelamiento del sistema	49
4.4.1.	Método numérico	49
4.4.2.	Modelo constitutivo	50
4.4.3.	Condiciones de borde	50
4.4.4.	Condiciones iniciales	50
4.4.5.	Nivel freático	50
4.4.6.	Resolución de equilibrio	51
4.4.7.	Cálculo de factor de seguridad	51
4.5.	Selección de parámetros a analizar	51
4.5.1.	Parámetros a analizar	52
4.5.2.	Rangos de parámetros	53
4.5.3.	Selección de valores de parámetros	53
4.6.	Resultados	56
5.	Confección de Modelo Sustituto	61
5.1.	Importación, filtro y manipulación de datos	62
5.1.1.	Importación de datos	62
5.1.2.	Filtro de datos	62
5.1.3.	Manipulación de datos	62

5.2.	Construcción de modelo sustituto	66
5.2.1.	Definición de características de método	66
5.2.1.1.	Función base	66
5.2.1.2.	Función de covarianza (Kernel)	66
5.2.2.	Entrenamiento del modelo	66
5.2.2.1.	Modelo de FS global	67
5.2.2.2.	Modelo de contorno de FS local	67
5.2.3.	Validación del modelo	67
5.3.	Resultados de modelo sustituto	68
5.3.1.	Modelo de FS global	68
5.3.1.1.	Tiempo de entrenamiento	68
5.3.1.2.	Predicción	68
5.3.1.3.	Validación	68
5.3.2.	Modelo de contorno de FS	71
5.3.2.1.	Tiempo de entrenamiento	71
5.3.2.2.	Predicción	71
5.3.2.3.	Validación	71
6.	Cuantificación de Incertidumbre	78
6.1.	Modelo de FS	78
6.1.1.	Planteamiento	78
6.1.2.	Propagación de incertidumbre	80
6.1.3.	Probabilidad de falla	81
6.1.4.	Análisis de sensibilidad	82
6.2.	Modelo de contorno de FS	82
6.2.1.	Planteamiento	83
6.2.2.	Propagación de incertidumbre	83
7.	Análisis y Discusión de Resultados	85
7.1.	Diseño de modelo de embalse de relaves	85
7.1.1.	Software de modelamiento FLAC3D	85
7.1.2.	Definición de modelo	86
7.1.3.	Modelo planteado	86
7.1.4.	Selección de parámetros y casos	87
7.1.5.	Resultados de FS y contorno de FS	88
7.2.	Confeción de modelo sustituto	89
7.2.1.	Manipulación de datos	89
7.2.2.	Construcción de modelo sustituto	90
7.2.3.	Resultados	91
7.3.	Cuantificación de incertidumbre	93
7.3.1.	Preliminares	93
7.3.2.	Propagación de incertidumbre	93
7.3.3.	Probabilidad de falla	94
7.3.4.	Análisis de sensibilidad	94
7.4.	Tiempos de procesamiento	94
7.4.1.	Resumen de tiempos	95
7.4.2.	Mejorías de tiempo	95

7.5.	Comparación	96
7.5.1.	Modelo con muestreo con LHS	96
7.5.2.	Modelo con menos cantidad de casos	96
7.5.3.	Modelo con distinta librería	97
7.6.	Aplicaciones	98
7.6.1.	Presentación y generalización de metodología	98
7.6.2.	Cuantificación de incertidumbre	99
7.6.3.	Sistema de monitoreo	99
8.	Conclusiones	103
	Bibliografía	105
Anexo A.	Conceptos de Probabilidad y Estadística	108
A.1.	Definiciones	108
A.2.	Parámetros básicos	108
A.3.	Distribuciones de probabilidad	109
A.4.	Propiedades generales	110
A.4.1.	Marginalidad	110
A.4.2.	Condicionabilidad	110
A.4.3.	Teorema de Bayes	110
A.5.	Procesos Gaussianos	111
A.5.1.	Definición	111
A.5.2.	Propiedades	111
A.5.2.1.	Distribución conjunta de vectores aleatorios	111
A.5.2.2.	Marginalidad en vectores aleatorios	111
A.5.2.3.	Condicionabilidad en vectores aleatorios	111
Anexo B.	Herramientas Python	112
B.1.	Librerías	112
Anexo C.	Procedimiento de selección de parámetros	113
C.1.	Parámetros a analizar	113
C.2.	Ejecución de casos	114
C.3.	Parámetros a analizar finales	116
Anexo D.	Distribución de casos a ejecutar	117
D.1.	Gráficos de distribución de casos	117
Anexo E.	Resultados de modelo de embalse de relaves en software de diseño	119
E.1.	Factor de seguridad global y contorno	119
E.1.1.	Caso más favorable	119
E.1.2.	Caso intermedio	120
E.1.3.	Caso más desfavorable	120
E.2.	Presiones de poros	121
E.2.1.	Caso más favorable	121
E.2.2.	Caso intermedio	121
E.2.3.	Caso más desfavorable	122

E.3. Desplazamientos	122
E.3.1. Caso más favorable	122
E.3.2. Caso intermedio	123
E.3.3. Caso más desfavorable	123
E.4. Esfuerzos	124
E.4.1. Caso más favorable	124
E.4.2. Caso intermedio	124
E.4.3. Caso más desfavorable	125
Anexo F. Desarrollo: Caso con muestreo con LHS	126
F.1. Selección de parámetros	126
F.2. Confección de modelo sustituto	126
Anexo G. Desarrollo: Caso con menor cantidad de datos	129
G.1. Selección de parámetros	129
G.2. Confección de modelo sustituto	130
Anexo H. Desarrollo: Caso con librería alternativa	132
H.1. Selección de parámetros	132
H.2. Confección de modelo sustituto	132