

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELACIÓN NUMÉRICA ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DEPÓSITO DE LASTRE INCORPORANDO RUPTURA DE PARTÍCULAS

FELIPE ANDRÉS SANZ LIST

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado como parte de los requisitos para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Guía: ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT

Santiago de Chile, Julio 2015

© MMXV, FELIPE ANDRÉS SANZ LIST



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELACIÓN NUMÉRICA ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DEPÓSITO DE LASTRE INCORPORANDO RUPTURA DE PARTÍCULAS

FELIPE ANDRÉS SANZ LIST

Miembros del Comité: ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT CARLOS OVALLE ORTEGA EDGAR BARD ORTÚZAR SEBASTIÁN RÍOS MARCUELLO

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado como parte de los requisitos para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Julio 2015

© MMXV, FELIPE ANDRÉS SANZ LIST

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, quienes me han apoyado en todas mis etapas del aprendizaje y desarrollo personal, Muchas Gracias.

Les agradezco a mis amigos, quienes han hecho más ameno el curso de esta investigación.

Especial reconocimiento a mi profesor guía, don Esteban Sáez, quien me ha facilitado los recursos y programas computacionales utilizados, además de su tiempo y conocimiento para atender las inquietudes propias de esta investigación.

Finalmente, este trabajo ha sido posible de realizar gracias a la empresa ARCADIS CHILE, que mediante la BECA ARCADIS me han dado la oportunidad de investigar la rotura de partículas en depósitos de lastre, para la mejor comprensión de su comportamiento mecánico. En particular al Profesor Edgar Bard, cuyas investigaciones y resultados me han sido de gran utilidad para el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos	iii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xiv
Abstract	XV
Resumen	xvi
Capítulo 1. Introducción	1
1. Motivación	1
2. Hipótesis de trabajo	2
3. Objetivo de la Investigación y Metodología de Trabajo	2
4. Resultados esperados	4
5. Principales procesos que afectan el comportamiento mecánico del depósito .	4
6. Investigaciones previas sobre material de estéril en Chile	5
6.1. Ensayos disponibles para esta investigación	6
7. Estudios relacionados a la rotura de partículas	9
7.1. Primeras investigaciones relacionadas a la rotura de partículas	9
7.2. Enfoques abordados acerca de la rotura de partículas	11
8. Organización del documento	15
Capítulo 2. Descripción del depósito de lastre a modelar	17
Capítulo 3. Aspectos teóricos e implementación de los modelos constitutivos	
considerados	22
1. Modelo elastoplástico multimecanismo de Hujeux (ECP)	22
1.1. Hipótesis y Consideraciones	22
1.2. Integración del modelo y parámetros	28
1.3. Parámetros del modelo de Hujeux	33

2. Incorporación de rotura de partículas: Modelo Daouadji	34
2.1. Hipótesis y consideraciones	34
2.2. Mecanismo Desviador	36
2.3. Mecanismo Isotrópico	37
2.4. Evaluación del Trabajo Plástico	38
3. Implementación en GEFDyn	39
Capítulo 4. Calibración del material según el modelo de comportamiento	44
1. Simulación de la probeta de los ensayos	44
1.1. Ensayo Edométrico (COD)	45
1.2. Ensayo Triaxial Drenado (TXD)	45
1.3. Trayetoria de cargas para simular el ensayo triaxial drenado	46
2. Estrategia de Empalme de propiedades	47
2.1. Elección del confinamiento de transición	47
3. Respuestas esperadas a confinamientos mayores	48
4. Rango de aceptabilidad para la calibración de los Grupos	48
5. Modelo de Hujeux (HUJ)	49
5.1. Calibración del modelo para ensayo edométrico	53
5.2. Calibración del modelo para ensayo triaxial drenado	55
5.3. Respuesta del modelo con empalme por confinamiento	56
5.4. Respuesta del modelo a confinamientos mayores	58
6. Modelo de Daouadji (DAO)	59
6.1. Calibración del modelo para ensayo edométrico	62
6.2. Calibración del modelo para ensayo triaxial drenado	64
6.3. Respuesta del modelo con empalme por confinamiento	65
6.4. Respuesta del modelo a confinamientos mayores	67
Capítulo 5. Comparación de Modelos Constitutivos	69
1. Comparación de calibraciones para ensayo edométrico	69
2. Comparación de calibraciones para ensayo triaxial drenado	71

3. Efecto de la rotura de partículas en la línea de estado crítico (CSL) 74
4. Comparación del empalme por confinamiento
4.1. Ensayo edométrico a 1 MPa, 2 MPa y empalme por confinamiento 76
4.2. Ensayo triaxial a 1 MPa, 2 MPa y empalme por confinamiento 77
Capítulo 6. Modelación de la construcción del Depósito 81
1 Antecedentes 81
2. Secuencia constructiva provectadas para después del año 2019
3. Modelación de las etapas constructivas
4. Malla de elementos finitos definida para el depósito
5 Representación del borde inferior del terreno 84
Capítulo 7. Comportamiento del depósito modelado durante la Construcción 85
1. Deformación Volumétrica y Desplazamientos 85
1.1. Incremento de Deformación Volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ y Asentamiento Vertical 86
2. Deformación Volumétrica Plástica (ε_v^p)
3. Tensión Vertical σ_{zz}
4. Esfuerzo de Corte τ_{yz}
5. Tensión Lateral σ_{xx}
6. Modelo Daouadji: Trabajo Plástico W y variable de rotura R_p
6.1. Trabajo plástico W_k en el plano YZ y Trabajo plástico W_p isotrópico 111
6.2. Trabajo plástico W_k en el plano XZ y plano XY
Capítulo 8. Comportamiento del depósito modelado al evaluar un sismo 122
1. Consideraciones de la Evaluación Sísmica 1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.
1.1. Incorporación Sísmica al Depósito Construido
1.2. Restricción a la Deformación Volumétrica Total (ε_v)
1.3. Tiempos de Control
1.4. Incremento de Deformaciones
2. Aceleración, Espectro y Amplitud de Aceleración
2.1. Respuesta de Aceleración
1

2.2. Espectro de Aceleración
3. Incremento de Deformación Volumétrica Total $\dot{\varepsilon_v}$
4. Deformación Volumétrica Plástica ε_v^p
5. Incremento de Deformación Volumétrica Plástica $\dot{\varepsilon}_v^p$
6. Desplazamiento Sísmico
6.1. Asentamiento Vertical Cosísmico $\dot{\delta_z}$
6.2. Perfil de Asentamientos Vertical
6.3. Desplazamiento Horizontal Cosísmico $\dot{\delta_y}$
7. Variación de tensiones
7.1. Incremento de tensiones verticales σ_{zz}
7.2. Variación de tensiones horizontales σ_{yy}
7.3. Variación de la tensión de corte τ_{yz}
8. Modelo Daouadji: Incremento de la Rotura $\dot{R_p}$ por trabajo plástico W 168
8.1. Incremento de Rotura $\dot{R_p}$ en el plano YZ
8.2. Incremento de Rotura $\dot{R_p}$ Isotrópica
Capítulo 9. Conclusiones
1. Propuestas de Mejoras y Trabajos a Futuro
REFERENCIAS
APÉNDICE A. Secuencia Constructiva del Depósito de Lastre

LISTA DE FIGURAS

1.1	Condiciones geográficas del relieve	2
1.2	Curvas granulométricas del material ROM y Lixiviado, antes y después	
	de ser ensayados (Bard, Anabalon, y Campana, 2012)	7
1.3	Resultados del ensayo TXD para material de lastre ROM.(Bard et al.,	
	2012)	8
1.4	Resultado del ensayo COD para material de lastre. (Bard et al., 2012) .	9
1.5	Relación de esfuerzos y rotura de granos en ensayos de compresión uni-	
	axial(R. J. Marsal, Núñez, y Alberro, 1975)	11
2.1	Ubicación del depósito San Francisco	17
2.2	Vista en planta de la variante de crecimiento del Depósito San Francisco	
	(adaptado de Arcadis Chile)	19
2.3	Construcción del deposito de lastre (Arcadis Chile)	20
3.1	Superficie de fluencia del mecanismo desviador. Efecto del parámetro	
	de forma b	25
3.2	Superficie de fluencia isotrópica.	26
3.3	Memoria del material	27
3.4	Representación gráfica de $\alpha(r_k)$	30
3.5	Líneas de estado crítico y estado característico.	31
3.6	Granulometría después de la rotura de partículas	35
3.7	Efecto de la rotura en e_v^p - $log(p')$.	36
3.8	Diagrama de flujo (GEFDyn)	43
4.1	Modelo tridimensional del ensayo COD, en donde los GDL libres son	
	los que se indican.	45
4.2	Modelo tridimensional del ensayo TXD, en donde los GDL libres son	
	los que se indican.	46
	viii	

4.3	Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)	53
4.4	Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)	54
4.5	Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)	54
4.6	Calibración para Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$	55
4.7	Respuesta del empalme para COD	57
4.8	Respuesta del empalme para TXD	58
4.9	Ensayo TXD a mayores confinamientos	59
4.10	Calibración de ensayos Edométricos (DAO)	62
4.11	Calibración de ensayos Edométricos (DAO)	63
4.12	Calibración de ensayos Edométricos (DAO)	63
4.13	Calibración para el Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$	64
4.14	Respuesta del empalme para COD	66
4.15	Respuesta del empalme para TXD	67
4.16	Ensayo TXD a mayores confinamientos	68
5.1	Calibración de ensayos Edométricos	69
5.2	Calibración de ensayos Edométricos	70
5.3	Calibración de ensayos Edométricos	70
5.4	Comparación ensayo TXD a $p^{'}=0.1,p^{'}=0.2$ y $p^{'}=0.5~\mathrm{MPa}$	72
5.5	Comparación ensayo TXD a $p^{'}=1.0$ y $p^{'}=2.0$ MPa $\hfill .$	73
5.6	Comparación de la CSL	74
5.7	Comparación del empalme ensayo COD	77
5.8	Comparación del empalme ensayo TXD	79
6.1	Proyección del depósito de lastre en la etapa final	81
6.2	Diseño proyectado al final de la construcción del depósito. En café se	
	presenta la topografía original del terreno.	82
6.3	Malla de elementos finitos.	83
7.1	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 5	86
7.2	Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 5	87

7.3	Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 5	88
7.4	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 10	89
7.5	Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 10	90
7.6	Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 10	91
7.7	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 15	92
7.8	Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 15	93
7.9	Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 15	94
7.10	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 22	95
7.11	Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 22	96
7.12	Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 22	97
7.13	Perfil longitudinal 3 del depósito. Etapa 22	99
7.14	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 5	101
7.15	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 10	101
7.16	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 15	102
7.17	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 22	102
7.18	Tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito. Etapa 5	104
7.19	Tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito. Etapa 22	104
7.20	Tensión vertical σ_{zz} MPa del depósito para las etapas a analizar	105
7.21	Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 5	106
7.22	Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 10	107
7.23	Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 22	107
7.24	Tensión de corte $ au_{yz}$ MPa del depósito para las etapas a analizar	108
7.25	Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 5	109
7.26	Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 10	109
7.27	Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 22	110
7.28	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 5	112
7.29	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 10	113
7.30	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 15	114
7.31	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 22	115

7.32	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 5	117
7.33	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 10	118
7.34	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 15	119
7.35	Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 22	120
8.1	Registro de aceleración de UTFSM 1985, Valparaíso, Quinta Región	122
8.2	Diagrama sísmico del depósito y puntos de control elegidos	126
8.3	Registro de aceleración en la Base del depósito.	127
8.4	Registro de aceleración en el Nodo lateral izquierdo del depósito	128
8.5	Registro de aceleración en el Nodo central del depósito	129
8.6	Registro de aceleración en el Nodo lateral derecho del depósito	130
8.7	Espectro de aceleración en la Base del depósito	133
8.8	Espectro de aceleración en el Nodo lateral izquierdo del depósito	134
8.9	Espectro de aceleración en el Nodo central del depósito	135
8.10	Espectro de aceleración en el Nodo lateral derecho del depósito	136
8.11	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito de lastre	139
8.12	Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito de lastre	140
8.13	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito de lastre	142
8.14	Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito de lastre	143
8.15	Incremento de Deformación volumétrica plástica $\dot{\varepsilon}_v^p(t)$ del depósito de	
	lastre para distintos instantes	145
8.16	Incremento de Deformación volumétrica plástica $\dot{\varepsilon_v^p}(t)$ del depósito de	
	lastre para distintos instantes	146
8.17	Asentamiento cosísmico $\dot{\delta_z}$ [m] del depósito de lastre	148
8.18	Asentamiento cosísmico $\dot{\delta_z}$ [m] del depósito de lastre	149
8.19	Asentamiento vertical cosísmico $\dot{\delta_z}$ [m] del depósito de lastre para $t=$	
	80 segundos	150
8.20	Asentamiento vertical cosísmico del Perfil 1	151
8.21	Asentamiento cosísmico del Perfil 2	152
8.22	Asentamiento cosísmico del Perfil 3	153

8.23	Gráfico de trayectorias. Zona representativa del Perfil 1
8.24	Desplazamiento horizontal cosísmico $\dot{\delta_y}$ [m] del depósito de lastre 156
8.25	Desplazamiento horizontal cosísmico $\dot{\delta_y}$ [m] del depósito de lastre 157
8.26	Variación de la tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito de lastre
8.27	Variación de la tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito de lastre
8.28	Variación de la tensión horizontal σ_{yy} Pa del depósito de lastre 163
8.29	Variación de la tensión horizontal σ_{yy} Pa del depósito de lastre 164
8.30	Variación de la tensión de corte τ_{yz} . Pa del depósito de lastre
8.31	Variación de la tensión de corte τ_{yz} . Pa del depósito de lastre
8.32	Incremento de la Rotura $\dot{R_p}$ en el plano YZ del depósito de lastre 170
8.33	Incremento de la Rotura $\dot{R_p}$ Isotrópica del depósito de lastre 172
A.1	Etapa 1: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2009, secuencia 1.182
A.2	Etapa 2: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2009, secuencia
	final
A.3	Etapa 3: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2010 183
A.4	Etapa 4: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2011, secuencia 1.183
A.5	Etapa 5: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2011, secuencia
	final
A.6	Etapa 6: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2012, secuencia 1.184
A.7	Etapa 7: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2012, secuencia
	final
A.8	Etapa 8: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2014
A.9	Etapa 9: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2015 185
A.10	Etapa 10: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2016 185
A.11	Etapa 11: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018 185
A.12	Etapa 12: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018, secuen-
	cia 1
A.13	Etapa 13: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018, secuen-
	cia final

A.14	Etapa 14: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	186
A.15	Etapa 15: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	187
A.16	Etapa 16: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	187
A.17	Etapa 17: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	187
A.18	Etapa 18: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	188
A.19	Etapa 19: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	188
A.20	Etapa 20: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	188
A.21	Etapa 21: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir	189

A.22 Etapa 22: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir. . . . 189

LISTA DE TABLAS

2.1	Parámetros característicos de referencia.	21
3.1	Parámetros de elasticidad y plasticidad perfecta	33
3.2	Parámetros de endurecimiento	33
3.3	Parámetros de evolución	34
4.1	Parámetros HUJ para Grupo $_{0.1}$, Grupo $_{0.2}$, Grupo $_{0.5}$, Grupo $_{1.0}$ y Grupo	
	2.0	52
4.2	Parámetros DAO para el Grupo $_{0.1}$, Grupo $_{0.2}$, Grupo $_{0.5}$, Grupo $_{1.0}$ y	
	Grupo _{2.0}	61
5.1	Parámetro β utilizado por los modelos	75
8.1	Respuesta máxima de aceleración en los puntos de control	131
8.2	Respuesta máxima de PSA en los puntos de control	137

ABSTRACT

Open-pit mining in Chile can produce more than 200.000 tons of waste rock per day. This material is deposited in landforms forming the so-called waste rock dumps. In Los Andes, Chile, geographical conditions are narrow valleys and high basal slopes, in which the space to accumulate material is quite limited, and waste rock accumulation can reach 500 meter height respect the natural terrain. A common phenomenon on these dumps is the particle breakage associated with high stresses produced by the dump's height. Nowadays the modeling of these dumps are simplified because they don't incorporate the particle breakage. Study this phenomenon will contribute to understand the mechanical behavior of these dumps.

In this research, a dump construction and seismic response will be modeled incorporating the particle breakage phenomenon, in order to achieve a more realistic modeling of these constructions. Firstly, two constitutive models are calibrated for waste rock material behavior: (1)Hujeux (ECP), which doesn't consider particle breakage, and (2)Daouadji, which incorporates this phenomenon through plastic work of the solid skeleton. Then, a sequencial dump construccion is modeled, with a realistic step-by-step staged construction. Finally, the seismic response of the constructed dump is analized for these constitutive models, clarifying the importance of the phenomenon in the global response of the dump.

Keywords: Open-pit mining, Waste rock dumps, Particle breakage

RESUMEN

Una operación minera a cielo abierto en Chile puede producir más de 200.000 toneladas de estéril por día, material que se deposita por volteo en accidentes geográficos formando los denominados depósitos de lastre. En Los Andes, Chile, estas condiciones geográficas corresponden a valles estrechos y de alta pendiente basal, en donde el espacio para acopiar material es bastante limitado, por lo que la acumulación de estéril puede alcanzar espesores superiores a 500 metros respecto al terreno natural. Un fenómeno común observado en estos depósitos es la rotura de partículas, asociada a las tensiones elevadas producto del espesor del material acopiado. Hoy en día la modelación de estas obras es simplificada porque no incorporan la rotura de partículas, entre otros aspectos, y conllevan un grado de incerteza respecto al comportamiento mecánico real observado. Estudiar este fenómeno contribuirá en el mejor entendimiento del comportamiento mecánico de estos depósitos.

En esta investigación, se modela la construcción y respuesta sísmica de un depósito incorporando el fenómeno de rotura de partículas, para lograr modelar un comportamiento más realista de estas obras. Primero, se calibran dos modelos constitutivos complejos para el material estéril: (1) Hujeux, que no considera rotura de partículas, y (2) Daouadji, que incorpora este fenómeno mediante el trabajo plástico del esqueleto sólido. Luego, se modela la construcción mediante un crecimiento realista, etapa a etapa. Finalmente, se analiza la respuesta sísmica de la obra construída con estos modelos constitutivos, clarificando la relevancia del fenómeno de ruptura en la respuesta global del depósito.

Keywords: Minería a cielo abierto, Depósitos de lastre, Rotura de partículas

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1. Motivación

Una operación minera a cielo abierto en Chile puede producir más de 200.000 toneladas de estéril por día, material que se deposita por volteo en accidentes geográficos formando los depósitos de lastre. En la zona cordillerana de Los Andes, Chile, estas condiciones geográficas corresponden a valles estrechos y de alta pendiente basal, como se aprecia en la Figura 1.1, en donde el espacio para acopiar material está limitado por estas condiciones geográficas, y el estéril depositado puede alcanzar espesores superiores a 500 metros respecto al terreno natural. Un fenómeno común observado en estos depósitos es la rotura de partículas, asociada a las tensiones elevadas producto del espesor del material acopiado. Hoy en día la modelación de estas obras es simplificada porque no incorporan la rotura de partículas, entre otros aspectos, y conllevan un grado de incerteza respecto al comportamiento mecánico real observado. Incorporar este fenómeno para realizar una modelación más realista contribuirá en el mejor entendimiento del comportamiento mecánico de estos depósitos.



Figura 1.1. Condiciones geográficas típicas en la Cordillera de los Andes, Chile. (Google, 2009)

2. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de esta investigación es que incorporar la rotura de partículas en modelos constitutivos complejos permite reproducir con mayor precisión el comportamiento de los depósitos de lastre de gran altura, de forma de analizar de mejor forma su desempeño tanto estática como sísmicamente.

3. Objetivo de la Investigación y Metodología de Trabajo

El objetivo de esta investigación es modelar la construcción y respuesta sísmica de un depósito de lastre minero, considerando el fenómeno de rotura de partículas. Para esto, se utilizará el código de elementos finitos GEFDyn (Aubry y Modaressi, 1996) y la información experimental del comportamiento mecánico de lastres (Bard et al., 2012). En primera instancia, se calibrará el material de lastre con el modelo de comportamiento Hujeux (Hujeux, 1985), que no considera rotura de partículas pero ha sido ampliamente validado para trayectorias complejas y está implementado en GEFDyn. Luego, se incorporará al código GEFDyn el modelo de comportamiento Daouadji (Daouadji, Hicher, y Rahma, 2001) que se basa en el modelo Hujeux, pero incorpora la rotura de partículas. Esto permite que las respuestas sean comparables entre ambos modelos ya que el sentido físico de las variables de comportamiento no cambia. Una vez completada y validada la implementación, se procederá a calibrar el material de lastre que será usado para este modelo.

Los materiales serán calibrados mediante la reproducción de ensayos de consolidación edométrica y triaxiales drenados de laboratorio. Esta calibración consistirá en definir distintos grupos de parámetros que se ajusten a un rango de confinamiento, y cuya variación según el confinamiento tenga sentido físico.

Los objetivos específicos en esta fase son:

- Completar la implementación y validación del modelo constitutivo Daouadji.
- Analizar la representatividad de los parámetros calibrados para los materiales.
- Comprender la relevancia de la rotura de partículas al comparar la calibración obtenida con ambos modelos.

En una segunda fase, se modelará la construcción de un depósito de lastre minero, utilizando la información recibida del Depósito de Lastre San Francisco (Bard, 2013), considerando ambos modelos de comportamiento. Esta modelación de la construcción del depósito consistirá en evaluar etapas incrementales de 60 metros, aumentando lentamente la gravedad, logrando representar de alguna forma el proceso real de construcción. Las principales variables para analizar y comparar los materiales serán: la deformación volumétrica total, deformación volumétrica plástica, las tensiones y los desplazamientos. Además, para el modelo Daouadji se analizará el trabajo plástico y su influencia en la rotura de partículas. El objetivo específico en esta fase es:

• Estudiar y analizar el fenómeno de la rotura de partículas durante la construcción del depósito mediante la comparación de los modelos Hujeux y Daouadji.

Luego, se modelará y analizará la respuesta sísmica del depósito de lastre con los modelos de comportamiento Hujeux y Daouadji. La evaluación sísmica utilizará el registro UTFSM 1985, correspondiente al terremoto en la Región de Valparaíso, Chile, y se analizará el incremento de las principales variables analizadas.

El objetivo específico en esta última fase es:

• Estudiar y analizar el fenómeno de la rotura de partículas en una evaluación sísmica, con el depósito ya construido.

4. Resultados esperados

Se espera reproducir el comportamiento mecánico del material de lastre con un modelo constitutivo que incorpora la rotura de partículas y con un modelo constitutivo que no incorpora la rotura de partículas, para comparar la respuesta entre ambos. También se espera evaluar la construcción y respuesta sísmica de un depósito de lastre con estos modelos calibrados, para comprender la relevancia de la rotura de partículas en la respuesta global de la obra.

5. Principales procesos que afectan el comportamiento mecánico del depósito

El comportamiento mecánico del material del depósito estará sujeto a diversos procesos, tanto físicos como químicos, que se pueden deber a las siguiente razones:

• Extracción y depositación del estéril: El material extraído posee una granulometría heterogénea y puede provenir de unidades geotécnicas diferentes. Además, el material es vertido por volteo, y por lo tanto se deposita según su ángulo de fricción de reposo.

- **Depositación en altura:** Una gran altura del depósito implica altas tensiones y por ende, la rotura de partículas de estéril. También, el cambio de granulometría debido a la rotura de partículas produce una variación de la permeabilidad.
- **Procesos de lixiviación:** El material de esteril puede estar sometido al proceso de lixiviación.
- Nieve/lluvia: Es relevante debido a que contribuye al proceso de alteración química y debido a las condiciones geográficas, puede conducir a un aumento de la presión de poros, disminuyendo las tensiones efectivas.
- Sismos: Generan un aumento de las tensiones sobre el material. La respuesta sísmica del depósito de lastre también será evaluada en esta investigación.

Los procesos descritos influyen en el comportamiento mecánico del depósito de lastre. Este trabajo aborda la generación de rotura de partículas en el depósito debido a los estados tensionales al que es sometido el material de lastre (durante la depositación y etapa sísmica).

6. Investigaciones previas sobre material de estéril en Chile

Estudiar este tipo de materiales es complejo debido a la dificultad que presenta para los equipos de laboratorio reproducir trayectorias de tensiones sobre probetas de grandes dimensiones. Además, debido a la relevancia que puede tener este tipo de información para la viabilidad de un proyecto, son pocas la investigaciones dadas a conocer públicamente que existen en este tema. En Chile, el Instituto de Investigaciones y de Ensayos de Materiales de la Universidad de Chile (IDIEM), ha desarrollado un equipo triaxial gigante, el cuál ha permitido ensayar el material de lastre, entre otros. Los estudios realizados con los resultados obtenidos en este equipo han apuntado tanto a reproducir la resistencia al corte y las relaciones esfuerzo-deformación, como a estudiar los efectos de ciertos aspectos específicos del material (origen, dureza de partículas, etc). Tambien, a explorar las ventajas y las limitaciones de la técnica de curvas homotéticas (e.g., Dorador (2010), Gesche (2002), de la Hoz (2007), Besio, González, Sáez, y Verdugo (2012)). Ovalle, Bard, et al. (2014) realizan una revisión de éstos y otros ensayos, enfocándose en la rotura de partículas, compresibilidad y resistencia al corte en materiales gruesos.

6.1. Ensayos disponibles para esta investigación

La División Andina de Codelco solicitó ensayos sobre material proveniente de la División Andina de Codelco, que son la base de calibración para el presente estudio. La División Andina se encuentra en la región de Valparaíso, a 38 km de Los Andes, y 50 km de Santiago. Esta zona cordillerana está entre los 3500 y 4200 msnm. Se ensayaron 3 tipos de materiales: ROM (*Run of Mine*), *Crushed* (Chancado post fragmentado, pero no procesado) y *Leached* (lixiviado in-situ).

Bard et al.(2012) realizan una investigación del efecto de presiones altas para potenciales materiales de lastres. El tipo de lastre ensayado es de origen intrusivo porfídico, con dureza media a alta y resistencia a la compresión no confinada de 120 [MPa] y partículas angulares a subangulares. En esta investigación, se analiza la variación de la granulometría luego de realizar ensayos triaxiales drenados bajo distintos estados de tensión y ensayos de consolidación edométrica. Los resultados se presentan en Figura 1.2. La conclusión obtendida es que existe una variación significativa de la distribución granulométrica debido a la rotura que ocurre por las altas presiones, además de la disminución de la resistencia al corte.



Figura 1.2. Curvas granulométricas del material ROM y Lixiviado, antes y después de ser ensayados (Bard et al., 2012)

El detalle de los ensayos triaxial drenado (TXD) y compresión edométrica (COD) del material de ROM se presentan en la Figura 1.3 y Figura 1.4, respectivamente (Bard et al., 2012). Estos resultados experimentales son los usados para la calibración de los modelos de comportamiento, por lo que la modelación del depósito se realizará con material de ROM.

En la Figura 1.3, el gráfico $p' \cdot q$ presenta la evolución de la envolvente de Mohr-Coulomb, y la eventual disminución de la resistencia debido a la rotura de partículas en altas presiones. El gráfico $\varepsilon_a \cdot e$ presenta la evolución del índice de vacíos (*e*), cuando se inicia la deformación axial ε_a de la probeta ya confinada.



Figura 1.3. Resultados del ensayo TXD para material de lastre ROM.(Bard et al., 2012)

En la Figura 1.4 se presentan los resultados de los ensayos edométricos. Se aprecia que el módulo de compresión edométrico C_c aumenta después de $\sigma'_v = 0.8$ MPa, ya que el material se vuelve más compresible conforme se genera la rotura de partículas.



Figura 1.4. Resultado del ensayo COD para material de lastre. (Bard et al., 2012)

7. Estudios relacionados a la rotura de partículas

7.1. Primeras investigaciones relacionadas a la rotura de partículas

Las primeras investigaciones relacionadas al fenómeno de rotura de partículas en geotecnia datan de la década de los 50's en que Roberts y de Souza (1958) observan como la ruptura de partículas afecta a la arena de cuarzo, en términos de su índice de vacíos. Sin embargo, este fenómeno toma mayor relevancia debido a la necesidad de comprender el comportamiento mecánico del enrocado en presas de agua de gran altura. Esto, porque las observaciones mostraban una variación en las propiedades del enrocado durante el proceso de construcción, causando discrepancia entre el diseño y la realidad.

R. J. Marsal et al. (1975) recopilaron varios ensayos de carga a muestras de enrocado de distintos proyectos, con el objetivo de caracterizar de forma sencilla la resistencia del material y recomendar diseños en función de la altura, para lo cual propusieron un parámetro cualitativo de resistencia a la rotura $R_b(\rho, w\psi, \underline{\sigma}, n, K_c)$, dependiente de la densidad ρ , el contenido de humedad w, la dilatancia ψ , el estado tensional $\underline{\sigma}$ y factor de dureza propio de la geología K_c . La Figura 1.5 presenta los ensayos realizados a distintos materiales de enrocado, relacionando el estado tensional con un parámetro de rotura de granos B_g , definido como la suma de las diferencias de pesos W_i retenidos en los distintos tamices, antes y después de los ensayos:

$$B_g = \sum_{Tamices} \frac{\delta W_i}{W_{total}} \tag{1.1}$$

Los resultados muestran que la cantidad de rotura de granos depende de la carga aplicada y origen de la roca, pero el comportamiento es similar para los distintos tipos de enrocado. Además clarifica la importancia de la gradación al observar que un material bien graduado genera menos rotura de granos.



Figura 1.5. Relación de esfuerzos y rotura de granos en ensayos de compresión uniaxial(R. J. Marsal et al., 1975)

7.2. Enfoques abordados acerca de la rotura de partículas

En la literatura los estudios relacionados a la rotura de partículas se han centrado en abordar la influencia de la forma de las partículas, la respuesta según tipos de ensayos de laboratorio, y en el desarrollo de modelos que permitan representar de alguna forma la rotura de partículas. Algunos autores que abordan estas técnicas mencionadas son los siguientes:

- **Comportamiento según la forma de las partículas**: Hardin (1985), Fukumoto (1992), Varadarajan, Sharma, Abbas, y Dhawan (2006).
- **Tipos de ensayos y su influencia en la respuesta observada**: R. Marsal (1967), Leps (1970), Feda (2002), Nakata, Hyodo, Hyde, Kato, y Murata (2001), Ovalle, Frossard, et al. (2014), Ovalle, Dano, y Hicher (2013).
- Desarrollo de modelos de comportamiento con incorporación fenómeno del rotura de partículas: Oldecop y Alonso (2001), Daouadji et al. (2001), Cecconi, DeSimone, Tamagnini, y Viggiani (2002), Salim y Indraratna (2004), Einav (2007), Nieto (2011), Muir-Wood, Russell, Einav, y Kikumoto (2011).

Respecto a la modelación del fenómeno de partículas, se presentan enfoques que desarrollan modelos determinísticos y los probabilísticos. Ambos enfoque reconocen la relación entre la variación de la granulometría y la energía disipada con la rotura de partículas.

7.2.1. Algunos Modelos Determinísticos

Estos modelos reproducen la rotura de partículas mediante los estados tensionales a los que es sometido el material en rango no elástico, además de determinar un estado de rotura mediante las variables internas propias del modelo.

• Muir-Wood et al. (2011): Esta modelación considera las partículas como esferas con un diámetro característico, y establece la condición de rotura como:

$$\frac{\xi_M \kappa_M}{\sqrt{3}} I_1 + (1 + \xi_M)^2 J_2 \ge \frac{\kappa_M^2}{1 + \xi_M}$$
(1.2)

Donde I_1 y J_2 son invarientes del tensor de tensiones, ξ_M es una razón entre la resistencia a la compresión uniaxial y a la tracción, y κ_M es un parámetro característico de la dureza del material. Entonces, se define la energía disipada como:

$$\Delta W = \Delta \Psi - \Delta \Phi \tag{1.3}$$

Donde $\Delta \Psi$ y $\Delta \Phi$ son la energía almacenada y liberada, respectivamente. Se define también el término R como una razón entre la disipación de energía por rotura y disipación por reorganización de las partículas:

$$R = \frac{\Delta \Phi_{reorg}}{\Phi_{surf}} \tag{1.4}$$

Con esto, la ecuación del principio de conservación de energía se puede expresar de la siguiente forma:

$$\underline{\underline{\sigma}}: \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \Delta \Phi_{fric} + \Delta \Phi_{reorg} + \Delta \Phi_{surf}$$
(1.5)

Usando como hipótesis una correlación fractal que supone un material compuesto por infinitas esferas, la deformación volumétrica plástica se puede expresar como:

$$\dot{\varepsilon_v} = \dot{\varepsilon_v}(e_0, \frac{S_i}{V_i}, d_{min}) \tag{1.6}$$

Con e_0 como el índice de vacíos inicial, S_i el área de la esfera, y V_i su volumen, y d_{min} como el diámetro mínimo de la partícula.

Einav (2007): Este modelo aborda la ruptura de partículas desde un punto de vista termodinámico, definido como CMB (Continuum Breakage Mechanics). Este enfoque supone que la propagación de las fracturas queda controlada por una relación entre energía almacenada y liberada debido a la rotura. La distribución granulométrica, en función del diámetro de partículas D se asume como:

$$F_u(D) = \left(\frac{D}{D_M}\right)^{3-\alpha} \tag{1.7}$$

Con D_M el diámetro máximo de la partícula, y α un parámetro de propagación fractal. En conjunto, se determina un parámetro de rotura fraccional B, que representa la capacidad de un material granular a sufrir rotura según su cambio

de granulometría, según la relación:

$$\Delta W = \Delta \Psi + \Delta \Phi \tag{1.8}$$

en donde W es el trabajo que realiza el material, Ψ la energía libre de Helmholtz y Φ la disipación por rotura en un volumen elemental representativo (VER). Se define también un parámetro E_B que representa la energía almacenada que puede ser liberada del sistema al ocurrir rotura:

$$\Phi_B = \Delta E_B (1 - B) - E_B \Delta B = \Delta E_B^* \tag{1.9}$$

La energía liberada en la rotura E_B^* es usada para representar la evolución de los parámetros intrínsecos según el modelo a modificar.

7.2.2. Algunos Modelos Probabilísticos

Debido principalmente a la variabilidad que presenta la ruptura de partículas varios autores han decidido representarla como una variable aleatoria.

 Nieto-Gamboa y López-Caballero (2011): Esta modelación considera que la probabilidad de ruptura de una partícula está relacionada con la evolución de la granulometría y la energía almacenada:

$$P_f(d, U_p^e) = 1 - e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^{\gamma} \left(\frac{U_p^e}{U_0}\right)^{m_u}}$$
(1.10)

En donde d es el diámetro de la partícula, U_p^e es la energía elástica almacenada hasta antes de la ruptura, y γ , m_u , d_0 , U_0 son parámetros del modelo. La energía esperada para un volumen representativo U_{REV}^e , está dado por la cantidad de masa m_i del volumen representativo, respecto a la masa total m_t , y la porosidad n.

$$U_{REV}^{e} = (1-n) \cdot \sum_{i=1}^{N} f(\lambda(U_{p}^{e})_{i}) \frac{m_{i}}{m_{t}}$$
(1.11)

Donde λ es el valor promedio de la distribución asociada a la energía elástica acumulada de las partículas durante la carga. La probabilidad de falla aumenta con el aumento de la energía del sistema, y el confinamiento implica una disminución de la granulometría.

Los análisis probabilísticos se alimentan de mucha información empírica y definen parámetros de ajuste que no siempre tienen un sentido físico claro, por lo que es difícil justificar su representatividad. Además, ya que en este trabajo se desea explorar la respuesta sísmica de este tipo de depósitos, es fundamental considerar un modelo que tenga la capacidad de reproducir el comportamiento cíclico. Por tanto, se opta por el modelo determinístico de Daouadji, derivado de Hujeux, el cual ha sido ampliamente validado para comportamiento sísmico. Como el modelo Daouadji se basa en el modelo Hujeux y lo modifica para que incorpore la ruptura de partículas, permite que las respuestas entre ambos modelos sean comparables ya que el sentido físico de los parámetros que definen el problema no cambian.

8. Organización del documento

El documento se organiza en ocho capítulos según se indica a continuación:

- Capítulo 2) Breve descripción del depósito de lastre a modelar, incluyendo la información recibida de Arcadis Chile.
- Capítulo 3) Presentación de los modelos de comportamiento seleccionados para realizar la modelación del depósito: El Modelo Elastoplástico-Cíclico Multimecanismo de Hujeux (Modelo HUJ) y el Modelo de Daouadji (Modelo DAO), variante natural de Hujeux que incorpora la rotura de partículas.
- Capítulo 4) Calibración de parámetros que mejor ajusten los ensayos simulados en GEFDyn
 a los resultados de los ensayos de laboratorio para cada modelo de comportamiento. Comparación de ajustes entre los modelos, analizando el efecto de la
 rotura de partículas.

- Capítulo 5) Descripción de la metodología implementada para modelar la construcción del depósito.
- Capítulo 6) Evaluación del comportamiento del depósito en las etapas de construcción, analizando el efecto de la rotura de partículas mediante la sensibilidad de los resultados según el modelo de comportamiento implementado.
- Capítulo 7) Evaluación del comportamiento sísmico del depósito, analizando el efecto de la rotura de partículas.

Capítulo 8) Conclusiones y propuestas a futuro.

Anexos A) Secuencia constructiva considerada para la modelación del depósito de lastre.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL DEPÓSITO DE LASTRE A MODELAR

El depósito que se quiere modelar es una variante de crecimiento del Depósito San Francisco de la División Los Bronces de Anglo American, que al igual que la División Andina de Codelco, se ubica en la zona cordillerana de Los Andes, Chile. Esta zona es estrecha y de alta pendiente, en donde el espacio para acopiar material esta limitado por estas condiciones geográficas, como se aprecia en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Ubicación del Depósito San Francisco. (Google, 2009)

Este depósito considera una longitud de 4 kilómetros, con un ancho máximo de 1 kilómetro para la altura máxima de diseño. Esta altura máxima alcanzada, que corresponde a 990 metros, involucra un acopio de material de lastre de 660 metros.

En la Figura 2.2, se presentan los planos de la construcción tridimensional del depósito. Debido al tamaño de la obra, la modelación tridimensional del depósito completo no es viable con los recursos computacionales disponibles para esta investigación, por lo que se modelará de manera simplificada el perfil longitudinal (A), en dos dimensiones, en condición de deformaciones planas.

La limitantes de este tipo de simplificación son las siguientes:

- Los estados de tensión-defomación pueden ser poco representativos a través del perfil ya que no se cumple la hipótesis de deformaciones planas completamente. Esto ocurrirá tanto en la modelación de la construcción y evaluación sísmica del depósito.
- Durante la modelación dinámica, la onda sísmica a evaluar no se descompondrá según la dirección del perfil.
- En una eventual modelación hidromecánica del depósito, la permeabilidad dentro del depósito dependerá de la dirección en el perfil.
- No se puede evaluar correctamente sectores con singularidades geométricas que requieran un modelo tridimensional.



Figura 2.2. Vista en planta de la variante de crecimiento del Depósito San Francisco (adaptado de Arcadis Chile).

Toda la información disponible de las etapas de construcción del perfil (A) del depósito se muestra en la Figura 2.3. En general, se proyectan etapas de crecimiento cada 60 metros, hasta completar la construcción total del depósito. Esta información se utilizará para modelar las etapas de crecimiento y reproducir la construcción secuencial del botadero en estudio.



Figura 2.3. Construcción del deposito de lastre (Arcadis Chile).

Además, en la modelación computacional del depósito se considerará un solo material calibrado en base a la respuesta experimental del ROM. También se asumirá que el terreno de fundación del depósito es roca y se han elegido parámetros que aseguren un comportamiento elástico, de forma tal que no afecten de manera considerable el comportamiento del depósito. Las propiedades asignadas se presentan en la Tabla 2.1.
a.
ć

Modelo de comportamiento:	Elástico	
Peso:	γ [kN/m3]	19
Módulo de Deformación:	E[MPa]	$5.39 \cdot 10^3$
Coeficiente de Poisson:	ν [-]	0.3

El apéndice A presenta gráficamente cada una de las etapas de crecimiento consideradas en la modelación del botadero.

Capítulo 3. ASPECTOS TEÓRICOS E IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS CONSIDERADOS

Para modelar computacionalmente un material, se requiere un modelo constitutivo que represente adecuadamente las trayectorias de carga-deformación, decisión no trivial debido a las altas tensiones alcanzadas en esta modelación. En este sentido, seleccionar un modelo robusto permite considerar una mayor cantidad de variantes de comportamiento para un mismo material, aún cuando requieran de bastante más información que los modelos más tradicionales (Mohr-Coulomb). Es por esto que se optó por elegir al modelo Hujeux (ECP) como punto de partida en esta investigación, pues ha sido ampliamente validado para trayectorias complejas (tanto monótonas como cíclicas).

1. Modelo elastoplástico multimecanismo de Hujeux (ECP)

Es un modelo elastoplástico para suelos que considera las deformaciones elásticas y plásticas de dos formas: un mecanismo por corte en tres planos ortogonales y un mecanismo isotrópico. Estos mecanismos actúan desacopladamente, pero se acoplan a través de las deformaciones volumétricas plásticas.

1.1. Hipótesis y Consideraciones

Sáez R.(2010) explica en detalle el modelo de comportamiento Hujeux, y la manera de operar en GEFDyn. A continuación se presentan los aspectos más relevantes a tomar en cuenta:

• **Deformaciones:** En GEFDyn, la formulación considera al tensor infinitesimal de deformaciones, es decir, se desprecian términos no lineales del tensor de deformaciones. Esto permite descomponer la deformación en una parte elástica y otra plástica de la siguiente forma:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p \tag{3.1}$$

Por tanto, también es válido para las deformaciones por corte y volumétricas:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p \tag{3.2}$$

$$\dot{\varepsilon_v} = \dot{\varepsilon_v}^e + \dot{\varepsilon_v}^p \tag{3.3}$$

en donde la deformación volumétrica ε_v se calcula como la traza del tensor de deformaciones:

$$\varepsilon_v = Tr(\underline{\varepsilon}) \tag{3.4}$$

- Esfuerzos efectivos: Se asume válido el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi.
- Modúlos elásticos: Son considerados no lineales, y dependientes del confinamiento.

$$G = G_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}}\right)^{n_e}$$
(3.5)

$$K = K_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}}\right)^{n_e}$$
(3.6)

Donde G_{ref} y K_{ref} son módulos de compresión y corte a una presión de referencia p'_{ref} , y n_e controla la no linealidad.

- Subdominios del comportamiento: El comportamiento se divide en 4 subdominios:
 - Dominio elástico: permite deformaciones reversibles y sin disipación de energía.
 - Dominio histerético o pseudo-elástico (estabilizado): disipa energía mediante deformaciones plásticas, pero se desprecia el cambio volumétrico plástico.
 - Dominio intermedio (histerético no estabilizado): ya no es posible despreciar el cambio de volumen irreversible.
 - Dominio movilizado: el esfuerzo de corte ha movilizado completamente la resistencia al corte de la fase sólida del material.

• Estado tensional en un plano ortogonal: El mecanismo por corte requiere desacoplar el comportamiento para cada plano. Sea el tensor del plano:

$$\underline{\sigma_k} = \sigma_{ii}(\underline{e}_i \otimes \underline{e}_i) + \tau_{ij}(\underline{e}_i \otimes \underline{e}_j) + \sigma_{jj}(\underline{e}_j \otimes \underline{e}_j)$$
(3.7)

Se define la tension reducida efectiva $p_{k}^{'}$ y el desviador $\underline{s_{k}}$

$$p'_{k} = \frac{1}{2} tr(\underline{\sigma_{k}}) \tag{3.8}$$

$$\underline{\underline{s}_{k}} = \underline{\underline{\sigma}_{k}} - \frac{1}{2} tr(\underline{\underline{\sigma}_{k}}) \underline{\underline{I}_{k}}$$
(3.9)

en donde las deformaciones volumétricas y por corte son

$$\varepsilon_{v_k} = \varepsilon_i + \varepsilon_j \tag{3.10}$$

$$\underline{\varepsilon}_{s_k} = [\varepsilon_{ii} - \varepsilon_{jj}, 2\gamma_{ij}] \tag{3.11}$$

• Superficie de fluencia del mecanismo de corte: Para cada plano ortogonal se tendrá:

$$F_{k} = \|\underline{s}_{k}\| - p_{k}^{'}\sin(\phi)r_{k}\left(1 - b \cdot \ln\left(\frac{p_{k}^{'}}{p_{cr}}\right)\right) = 0$$
(3.12)

Donde *b* es un parámetro de forma de la superficie de fluencia cuyo efecto se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Superficie de fluencia del mecanismo desviador. Efecto del parámetro de forma \boldsymbol{b}

• Superficie de fluencia del mecanismo isotrópico: Para trayectorias isotrópicas se tendra:

$$F_{k} = |p'| - p_{cr} \cdot d \cdot r_{iso} = 0$$
(3.13)

en donde p_{cr} es la presión crítica efectiva, que se define como:

$$p_{cr} = p_{ci}^{'} e^{\beta e_v^p} \tag{3.14}$$

Y r_{iso} es el radio del mecanismo isotrópico, que controla la evolución de la consolidación isotrópica del mecanismo, como puede verse en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Superficie de fluencia isotrópica.

• Acomplamiento de mecanismos desviadores e isotrópico: Mediante la deformación volumétrica plástica, es posible lograr este acoplamiento según:

$$\varepsilon_v^p = \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{v_k}^p + \varepsilon_{v_{iso}} = \frac{1}{\beta} log \frac{p_{cr}}{p'_{ci}}$$
(3.15)

Memoria para Movilización e Inversión de cargas: El modelo considera la máxima fricción movilizada para cargas monótonas, y en caso de invertirse la carga, actualizará la movilización del corte. La Figura 3.3 explica este enfoque de doble memoria. Cada plano desviador considera un espacio asociado de tensiones desviadoras s→k y cada dominio de comportamiento tiene asociado un radio de movilización. Tanto en carga como en descarga se define un comportamiento elástico hasta que se exceda el radio elástico, desarrollandose deformaciones residuales, donde la magnitud del vector de cargas en el eje de esfuerzos desviadores será el nivel de movilización y la dirección estará asociada a la inclinación de la carga proyectada sobre el plano desviador correspondiente. Por

carga monótona se entiende que el sentido de la carga no cambia, y por carga cíclica, se entiende que el sentido de carga se invierte.



Figura 3.3. Memoria del material (Foucault, 2009)

- Ley de dilatancia: La regla de flujo plástico es no asociada, y se define mediante el ángulo característico de dilatancia (ψ).
- Tratamiento de las tracciones: El estado de tracciones debe asegurar que no exista tensiones de tracción, incluyendo suelos cohesivos. Por tanto, se define la superficie de fluencia:

$$max\{\sigma_{I}^{'},\sigma_{II}^{'},\sigma_{III}^{'}\}=\sigma_{I}^{'}\geq0$$
(3.16)

y una regla de flujo asociada.

• Ley de Integración: es explícita y además considera sub-incrementos.

1.2. Integración del modelo y parámetros

GEFDyn, requiere una formulación incremental del modelo constitutivo que pueda incorporarse al modelo de elementos finitos. A continuación se explicarán las ecuaciones a resolver para la integración del modelo de Hujeux, de forma de ilustrar las ecuaciones que se deben intervenir para considerar la incorporación de la rotura de partículas.

1.2.1. Fluencia en Mecanismos desviadores

Para cada plano ortogonal se evalúa la ecuación de consistencia como sigue:

$$\dot{F}_{k} = \frac{\partial F_{k}}{\|\underline{s}_{k}\|} \cdot \underline{\dot{s}}_{k} + \frac{\partial F_{k}}{p_{k}'} \cdot \dot{p}_{k}' + \frac{\partial F_{k}}{r_{k}} \cdot \dot{r}_{k} + \frac{\partial F_{k}}{p_{cr}'} \cdot \dot{p}_{cr}'$$
(3.17)

Además, para predecir el comportamiento cíclico, se define el vector de sentido de cargas ν_k :

$$\underline{\hat{\nu}_k} = \left(\underline{\sigma_{\hat{k}_{[b]}}} - \underline{\hat{\nu}_{k_n}}\right) \cdot r_k \tag{3.18}$$

en donde $\underline{\sigma_{k_{[b]}}}$ es el sentido de la última carga en el plano k y $\underline{\hat{\nu}_{k_n}}$ es el vector de orientación del estado tensional actual en k. En caso de inversión de cargas, el radio movilizado del mecanismo queda:

$$r_k = r_k^{cyc} + \frac{\partial F_k}{\partial \underline{s}_k} \cdot \underline{\nu}_k \tag{3.19}$$

en donde r_k^{cyc} es el grado de movilización de la resistencia luego de la inversión del sentido de carga.

1.2.2. Flujo Plástico en mecanismos Desviadores

Para que el modelo reconozca si el estado de tensiones está sobre la superficie de fluencia, y si una carga adicional generará una actualización del dominio elástico actual, se define un parámetro auxiliar η_k que define el estado de "Carga" y "Descarga".

$$\eta_k = F_k + \dot{F}_k \tag{3.20}$$

• Descarga ($\eta \leq 0$):

El radio de movilización será

$$r_{k} = max\left(r_{k_{n}}, \| \underline{\sigma_{k_{[b]}}}\|\right) \le 1$$
(3.21)

en donde

$$\frac{\hat{\sigma_{k_{[b]}}}}{p'_k \sin \phi \left(1 - b \cdot \ln \frac{p'_k}{p_{cr}}\right)}$$
(3.22)

$$\underline{\nu}_{k_{[n]}} = \frac{\partial F_k}{\partial \underline{s}_k} \tag{3.23}$$

y como la descarga es elástica,

$$r_k^{cyc} = r_{ela} \tag{3.24}$$

• Carga (η > 0):

Se establece un criterio de flujo plástico, asociado al ángulo característico, tal que

$$\dot{\varepsilon}_k^p = \dot{\lambda}_k^p \cdot \Psi_k \tag{3.25}$$

$$\Psi_k = \alpha_{\psi} \cdot \dot{\alpha}(r_k) \cdot (\sin \psi - \frac{q_k}{p'_k} \cos \theta)$$
(3.26)

donde $\alpha(r_k)$ es un término de movilización progresiva definida en función del radio de movilización de la superficie de carga:

$$\alpha(r_k) := \begin{cases} 0 & \text{si } r_k \le r^{hys} \\ \left(\frac{r_k - r^{hys}}{r^{mob} - r^{hys}}\right)^m & \text{si } r_k \le r^{hys} \\ 1 & \text{si } r^{mob} \le r_k \le 1 \end{cases}$$
(3.27)

y el efecto de m puede verse en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Representación gráfica de $\alpha(r_k)$

El ángulo característico de dilatancia define la línea del estado característico, tal que si el estado tensional reducido está bajo esta línea, el material se contraerá y si está por sobre esta línea, se dilatará, como se ve en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Líneas de estado crítico y estado característico.

1.2.3. Mecanismo Isotrópo

La ecuación de consistencia en este caso es :

$$\dot{F}_{iso} = \frac{\partial F_{iso}}{p'} \cdot \dot{p}' + \frac{\partial F_{iso}}{r_{iso}} \cdot \dot{r}_{iso} + \frac{\partial F_{iso}}{p_{cr}} \cdot \dot{p}_{cr}$$
(3.28)

con una regla de flujo no asociada.

Para que el modelo reconozca si el estado de tensiones está sobre la superficie de fluencia, y si una carga adicional generará una actualización del dominio elástico actual, se define un parámetro auxiliar η_{iso} que define el estado de "Carga" y "Descarga".

$$\eta_{iso} = F_{iso} + F_{iso} \tag{3.29}$$

• Rango Elástico ($\eta_{iso} \leq 0$):

El radio de movilización monótono se definirá en función de las variables que caracterizan el estado del material y los parámetros del mecanismo:

$$r_{iso} = \frac{p'}{p'_{cr} \cdot d} \tag{3.30}$$

Y como la descarga es elástica, se define el radio cíclico,

$$r_{iso}^{cyc} = r_{iso}^{ela} \tag{3.31}$$

• Rango Plástico ($\eta_{iso} > 0$):

Como el material es cargado isotrópicamente, el vector de flujo se define como:

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\dot{p}'}{p'} \tag{3.32}$$

1.2.4. Endurecimiento

Cada mecanismo tiene una evolución del endurecimiento.

Para el mecanismo desviador (corte), se asocian los términos a_{cyc} y a, tal que:

$$\dot{r}_{k} = \dot{\lambda}_{k}^{p} \frac{(1 - r_{k})^{2}}{a_{cyc} + \alpha(r_{k}) \cdot (a - a_{cyc})}$$
(3.33)

de la misma forma, para el mecanismo isotrópico, se asocian los términos c_{cyc} y c, tal que

$$\dot{r}_{iso} = \dot{\varepsilon}_{v_{iso}}^{p} \frac{(1 - r_{iso})^2}{c^*} \cdot \frac{p'_{ref}}{p'_{cr}}$$
(3.34)

con c^* según carga monótona (c) o cíclica. (c_{cyc}) La actualización de la historia del material se realiza por incremento, actualizando el estado [n] al [n + 1]:

$$r_k^{[n+1]} = r_k^n + \dot{r}_k \tag{3.35}$$

$$r_{iso}^{[n+1]} = r_{iso}^n + \dot{r}_{iso}$$
(3.36)

1.3. Parámetros del modelo de Hujeux

• Elasticidad y Plasticidad perfecta:

Parámetro	Función
K_{ref}	Módulo de compresión isotrópica a la presión de referencia
G_{ref}	Módulo de corte a la presión de referencia
n_e	Exponente de ley elástica no lineal
ϕ	Ángulo de fricción en plasticidad perfecta
β	Compresibilidad plástica
d	Distancia entre rectas CSL (critical state line) y NCL (normal consolidation line)
ψ	Ángulo característico de dilatancia

• Endurecimiento:

Tabla 3.2. Parámetros de endurecimiento

Parámetro	Función
a	Coef. de endurecimiento de mec. desviadores. Trayectoria de carga monótona
a_{cyc}	Coef. de endurecimiento de mec. desviadores. Trayectoria de carga cíclica
b	Coef. de modelamiento de reorganización debido a fluencia por corte
c	Coef. de endurecimiento del mec. isotrópico. Trayectoria de carga monótona
c_{cyc}	Coef. de endurecimiento del mec. isotrópico. Trayectoria de carga cíclica

• Parámetros de evolución de plasticidad:

Parámetro	Función
r_{ela}	Radio límite de dominio elástico
r_{hys}	Radio límite de dominio histerético
r_{mbl}	Radio límite de dominio movilizado
r^{ela}_{iso}	Radio límite de dominio elástico isotrópico
α	Parámetro asociado a la forma de la evolución de la movilización
m	Coeficiente del dominio de comportamiento de la ley del endurecimiento

Tabla 3.3. Parámetros de evolución

2. Incorporación de rotura de partículas: Modelo Daouadji

Daouadji et al.(2001) propone una extensión del modelo ECP (Hujeux). En este modelo, se relaciona el trabajo plástico del material a la rotura de partículas, por medio de la disminución de la presión crítica efectiva p_{cr} .

2.1. Hipótesis y consideraciones

El modelo de Daouadji et al.(2001) relaciona el trabajo plástico con la rotura de partículas, ya que como Kim(1995) concluye de sus ensayos experimentales, el trabajo plástico que genera rotura queda definido en función del área que representa la evolución de la granulometría: $S = S(W^p)$, como muestra la Figura 3.6.



Figura 3.6. Granulometría después de la rotura de partículas (Kim, 1995).

El modelo de Daouadji define el trabajo plástico como sigue:

$$W^{p} = \int \underline{\underline{\sigma}} : \|\underline{\underline{d}\varepsilon^{p}}\|$$
(3.37)

Esta variable modifica la presión crítica de Hujeux de la siguiente forma:

$$p_{cr} = p_{ci}^{'} (1 - f[S]) e^{\beta e_v^p}$$
(3.38)

$$f[S] = \frac{W^p}{W^p + B} \tag{3.39}$$

en donde *B* es un parámetro representa la propensión de un material a sufrir rotura de partículas. Con esta modificación, la curva CSL (*critical state line*) se desplaza. Por ejemplo en el caso de Hujeux, en la Figura 3.7 (a), la ICL (*isotropic consolidation line*) se mantiene a una distancia *d* de la CSL para una trayectoria de cargas de $a \rightarrow b$, en donde la proyección a la CSL sólo está en función de la compresibilidad plástica β . Ahora, para Daouadji, en la Figura 3.7 (b), la trayectoria $a \rightarrow b$ está asociada también al traslado de la CSL dado por el trabajo plástico W^p , que depende de la deformación plástica ε_p .



Figura 3.7. Efecto de la rotura en e_v^p -log(p').

La implementación de la extensión de Daouadji, realiza algunas correcciones a los términos presentados en la sección 1.1. Los términos destacados en negro, corresponden a los que aparecen exclusivamente por la incorporación del trabajo plástico. Los demás términos, corresponden a los obtenidos a partir de la formulación original de Hujeux, como para Daouadji. Cabe destacar que Daouadji genera términos adicionales, pero no elimina términos provenientes de Hujeux. A continuación se desarrollan las ecuaciones más importantes del mecanismo de Dauodadji.

2.2. Mecanismo Desviador

Se plantea la ecuación de consistencia, para el mecanismo desviador:

$$\dot{F}_{k} = \frac{\partial F_{k}}{\partial \underline{s}_{k}} \cdot \underline{\dot{s}}_{k} + \frac{\partial F_{k}}{\partial p'_{k}} \cdot \dot{p'_{k}} + \frac{\partial F_{k}}{\partial r_{k}} \cdot \dot{r}_{k} + \frac{\partial F_{k}}{\partial \varepsilon_{v}^{p}} \cdot \dot{\varepsilon_{v}^{p}} = 0$$
(3.40)

En el caso de la derivada parcial del mecanismo desviador, queda:

$$\frac{\partial F_{k}}{\partial \underline{s}_{k}} = \frac{\underline{s}_{k}}{\|\underline{s}_{k}\|} + \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{p}_{k}^{'} \cdot \mathbf{r}_{k} \cdot \sin(\phi)}{\mathbf{B}_{k} + \mathbf{W}_{k}^{\mathbf{p}}} \cdot \|\overline{\underline{\varepsilon}_{k}^{\mathbf{p}}}\|$$
(3.41)

$$\frac{\partial F_k}{\partial p'_k} \cdot \dot{p}'_k = b \cdot r_k \cdot \ln\left(\frac{p'_k}{p_{cr_k}}\right) - r_k \cdot \sin(\phi) + \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{r_k} \cdot \sin(\phi)}{\mathbf{B_k} + \mathbf{W_k^p}} \cdot \mathbf{p'_k} \cdot \|\varepsilon_{\mathbf{vk}}^{\mathbf{p}}\|$$
(3.42)

$$\frac{\partial F_k}{\partial r_k} = p'_k \cdot \sin(\phi) \left(b \cdot \ln \frac{p'_k}{p'_{cr_k}} - 1 \right)$$
(3.43)

$$\frac{\partial F_k}{\partial \varepsilon_v^p} = -b \cdot p'_k \cdot r_k \cdot \sin(\phi) \cdot \beta \tag{3.44}$$

2.3. Mecanismo Isotrópico

Se plantea la ecuación de consistencia para el mecanismo isótropo:

$$\dot{F}_{iso} = \frac{\partial F_{iso}}{p'} \cdot \dot{p}' + \frac{\partial F_{iso}}{r_{iso}} \cdot \dot{r}_{iso} + \frac{\partial F_{iso}}{p'_{cr}} \cdot \dot{p}'_{cr}$$
(3.45)

En el caso de la derivada parcial del mecanismo de isotrópico, queda:

$$\frac{\partial F_{iso}}{\partial p} = \frac{p}{\|p\|} - \frac{\mathbf{d} \cdot \varepsilon_{\mathbf{v}_{iso}}^{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{r}_{iso} \cdot \mathbf{p}_{c\mathbf{r}_{iso}}^{'}}{\mathbf{B}_{iso} + \mathbf{W}_{iso}^{\mathbf{p}}}$$
(3.46)

$$\frac{\partial F_{iso}}{\partial r_{iso}} = -d \cdot p'_{cr_{iso}} \tag{3.47}$$

$$\frac{\partial F_{iso}}{\partial \varepsilon_{v}^{p}} = -d \cdot r_{iso} \cdot p_{cr_{iso}}^{'} \cdot \beta$$
(3.48)

2.4. Evaluación del Trabajo Plástico

Las ecuaciones anteriores consideran que el trabajo plástico puede ser desacoplado por mecanismo, luego:

• Trabajo plástico del mecanismo desviador K:

$$\dot{W}_{k}^{p} = p_{k}^{'} \cdot \|\dot{\varepsilon}_{v_{k}}^{p}\| + \underline{s}_{k}^{'} \cdot \|\underline{\dot{\varepsilon}}_{k}^{p}\| \to W_{k}^{p} = \int \left(p_{k}^{'} \cdot \|\dot{\varepsilon}_{v_{k}}^{p}\| \cdot dt\right) + \int \left(\underline{s}_{k}^{'} \cdot \|\underline{\dot{\varepsilon}}_{k}^{p}\| \cdot dt\right)$$
(3.49)

$$p_{cr_k}' = p_{ci} \frac{B_k}{B_k + W_k^p} \cdot e^{\beta \varepsilon_v^p}$$
(3.50)

• Trabajo plástico del mecanismo isotrópico:

$$\dot{W}_{iso}^p = p \cdot \|\dot{\varepsilon}_{v_{iso}}^p\| \to W_{iso}^p = \int \left(p \cdot \|\dot{\varepsilon}_{v_{iso}}^p\| \cdot dt\right)$$
(3.51)

$$p_{cr_{iso}}^{'} = p_{ci} \frac{B_{iso}}{B_{iso} + W_{iso}^{p}} \cdot e^{\beta \varepsilon_{v}^{p}}$$
(3.52)

en donde

$$\underline{s}_{k} = \left[\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2}; \sigma_{ij}\right] = \left[\underline{s}_{k_{1}}, \underline{s}_{k_{2}}\right]$$
(3.53)

Esto es posible ya que así como el conjunto de tensiones pricipales es linealmente independiente, el conjunto p'_k , \underline{s}_{k_1} también lo es.

Cabe recalcar que Dauoadji presenta 2 versiones del modelo a implementar. Su primer modelo de comportamiento con rotura de partículas consideraba el Trabajo Plástico acoplado para todos los mecanismos, por lo que cualquier incremento de trabajo plástico, afectaba a los mecanismos isotrópicos y desviatorios, sin distinción. Sin embargo, en una versión posterior, presentó la versión actual del modelo, que desacopla el trabajo plástico para cada mecanismo por separado.

La versión implementada en GEFDyn es esta última, ya que desacopla el trabajo plástico para cada mecanismo y permite incorporar propensiones distintas a generar rotura ya sea por corte o cambio de volumen.

3. Implementación en GEFDyn

La intervención del código GEFDyn involucró la modificación de muchos archivos, y la creación de algunos otros, no todos relacionados directamente con modificar el modelo Hujeux para dar origen al modelo Dauoadji. A continuación, se explicará brevemente el diagrama de flujo de GEFDyn, mencionando las funciones(f) involucradas y las intervenciones directas al mecanismo de Hujeux. Además se incluye la Figura 3.8, que señala el diagrama de flujo de la implementación. Las funciones están dentro de rectángulos y se indican los aspectos más importantes en el diagrama.

A cada elemento se le asigna una ley de comportamiento (modelo constitutivo), en este caso, llamada loiDAO (*loi* significa ley en francés). Para una etapa de carga/desplazamiento definida por el usuario, GEFDyn procederá a solucionar el problema de la siguiente forma:

- Al inicio de la etapa, la memoria del elemento está vacía. Se procede a leer la memoria almacenada con *histle*(f), que recupera las deformaciones, presiones de poros y variables internas del material. Aquí se incorpora la lectura de la variable de Trabajo Plástico.
- El comando *xyzrtz*(f) calcula las deformaciones en coordenadas cilíndricas, a partir de las coordenadas cartesianas (ortogonales) si el modelo lo requiriera. No se requiere intervenir esta función.

- El comando *calsat*(f) calcula las presión de poros y permeabilidad (si varía) según saturación. No se requiere intervenir esta función.
- Luego *cycmoh*(f) toma esta información y entrega las deformaciones, radios, trabajo plástico y tensiones que se obtengan de la solución. Para esto, utiliza sub-incrementos (i=1 a i=n) de carga, para desplazar lentamente las superficies de fluencia desviadoras e isotrópica, de acuerdo a un algoritmo de integración explícito.
- princ(f) calcula los valores propios del tensor de 2^{do} orden, propio de los modelos no lineales.
- *calpri*(f) calcula las tensiones (incremento) y deformaciones principales, además de la dirección actual de carga, en base a las tensiones.
- La función *trccal*(f) determiná si se está en un caso de tracción, si se está en un caso isotrópico o desviador.
- La función mecmoh(f) corresponde al desacoplamiento del mecanismo desviador, para un plano ortogonal. Aquí, se calculan las cargas en el plano del mecanismo (p'_k q_k), y se contrasta la dirección de sentido último con la actual, determinando si corresponde a un caso de carga monótona o cíclica. Luego, determina si corresponde a un caso elástico, o el estado de tensiones está en carga plástica. Es por esto que en cycmoh(f) se revisa la convergencia de la solución (loop), para que la solución no sobrepase las superficies de fluencia (f ≤ 0), además de realizar sub-incrementos. También se definen los argumentos propios del mecanismo que forman parte de la matriz elastoplástica. Finalmente, se determinan los radios (y centro) del dominio correspondiente en el mecanismo. Las modificaciones principales aquí son: la incorporación del trabajo plástico

en el cálculo de p'_{cr} , la posibilidad de recuperar el esfuerzo desviador $\underline{s_k}$ y su dirección, y la modificación de los argumentos que intervendrán en la matriz elastoplástica, entre otros.

- La siguiente función es meciso(f), que corresponde al desacoplamiento en el mecanismo isotrópico. Se calculan las carga de confinamientos p' y la presión crítica p_{cr} modificada debido al trabajo plástico. Al igual que cycmoh(f), determina si corresponde a un caso de carga monótona o cíclica. Luego determina si corresponde a un caso elástico o el estado de tensiones está en carga plástica. Calcula los argumentos propios del mecanismo que forman parte de la matriz elastoplástica y actualiza el radio del dominio correspondiente en el mecanismo. Las modificaciones principales aquí son: la incorporación del trabajo plástico en el cálculo de p_{cr} y la modificación de los argumentos que intervendrán en la matriz elastoplástica, entre otros.
- Al finalizar estas funciones, de regreso en *cycmoh*(f) se procede a formar la matriz elastoplástica que acopla todos los mecanismos para la solución del sistema mediante *Gaunsy*(f) (solución de Gauss para sistemas no-simétricos). Si algún mecanismo está en carga plástica, se forma la matriz elastoplástica que se resolverá. Cabe destacar que la matriz de rigidez que acopla todos los elementos de la malla no se recalcula en todos los pasos ya que el cálculo será mucho más lento, y por tanto sólo se modifican los términos de los puntos de integración que aparecen o desaparecen según la secuencia constructiva.
- Las función *ludcmp*(f) es un procedimiento para resolver matrices. Reemplaza la matriz elastoplástica con su descomposición *LU* con permutaciones de filas de sí mismas.

- Las función *ludksi*(f) resuelve un conjunto lineal de ecuaciones Ax = b, que fue formulado por *ludcmp*(f). Después de esto, se tiene la solución al problema matricial (multiplicadores plásticos), y se pueden calcular las deformaciones plásticas.
- Luego se procede a acoplar los mecanismos. Vale decir, calcular las deformaciones volumétricas proporcionadas por cada mecanismo, y sumarlas. A esto, se agrega el cálculo del incremento del Trabajo Plástico, incorporación que representa la rotura de partículas.
- Para finalizar, *calpri*(f) procede a calcular las tensiones principales de corte, y su dirección, que son variables a almacenar.
- Cuando los sub-incrementos de la integración explícita del modelo constitutivo llegan a su etapa final, la función *cycmoh*(f) termina. Se regresa a *LoiDAO*(f), y luego el problema de coordenadas cilíndricas a cartesianas, si fuera necesario.
- *auxelt*(f) Calcula la matriz de rigidez tangente, para ser utilizada en la próxima etapa. No es recomendable calcularla para cada paso de tiempo debido al gasto computacional que requiere. Sin embargo es necesaria recalcularla cada vez que se inicia una nueva etapa de construcción del depósito.
- Finalmente *histec*(f) almacena las variables obtenidas, entre ellas, el trabajo plástico, para una siguiente etapa. Todos los elementos activos en una misma etapa ejecutan esta rutina.



Figura 3.8. Diagrama de flujo (GEFDyn).

Capítulo 4. CALIBRACIÓN DEL MATERIAL SEGÚN EL MODELO DE COM-PORTAMIENTO

La calibración consiste en ajustar los parámetros propios de un modelo constitutivo de acuerdo a los valores experimentales entregados por los ensayos de laboratorio, de forma tal de reproducir el comportamiento del material. Los resultados experimentales disponibles son de dos tipos: ensayos edométricos (COD) y ensayos triaxiales drenados (TXD).

Idealmente al calibrar un material se busca un grupo único de parámetros que lo represente, pero dependiendo del comportamiento de este material, y las características del modelo constitutivo, esto no siempre es posible. En estos casos, la calibración consistirá en encontrar distintos grupos de parámetros, buscando que la variación entre los distintos parámetros sea la menor posible, y que sea lógica respecto al sentido físico de cada uno de ellos en relación al aumento del confinamiento inicial de los ensayos. Se ha optado por calibrar cinco grupos de parámetros para cada modelo constitutivo, que se relacionen al confinamiento inicial del ensayo triaxial. Estos son:

- Grupo $_{0.1}$ calibrado según TXD a confinamiento de p' = 0.1 [MPa]
- Grupo $_{0.2}$ calibrado según TXD a confinamiento de p' = 0.2 [MPa]
- Grupo $_{0.5}$ calibrado según TXD a confinamiento de p' = 0.5 [MPa]
- Grupo _{1.0} calibrado según TXD a confinamiento de p' = 1.0 [MPa]
- Grupo _{2.0} calibrado según TXD a confinamiento de p' = 2.0 [MPa]

1. Simulación de la probeta de los ensayos

La simulación de la probeta se realizó en el código GEFDyn, que calcula mediante el método de elementos finitos el comportamiento de un modelo en condiciones iniciales conocidas sujeto a una trayectoria de carga. El modelo implementado a ensayar consiste en un octavo de probeta cúbica en tres dimensiones (3D), modelado por un único elemento hexaédrico. Los grados de libertad (GDL) variarán según el ensayo a modelar, y la trayectoria de carga.

1.1. Ensayo Edométrico (COD)

Este ensayo considera que los GDL (grados de libertad) bloqueados son todos los desplazamientos, excepto el desplazamiento vertical de la cara superior que se cargará lentamente mediante fuerza, tal como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Modelo tridimensional del ensayo COD, en donde los GDL libres son los que se indican.

1.2. Ensayo Triaxial Drenado (TXD)

Este ensayo considera que los GDL (grados de libertad) bloqueados son los desplazamientos verticales de la cara inferior y los GDL impuestos son los desplazamientos verticales de la cara superior, tal como se muestra en la Figura 4.2. Como condición inicial, se impondrán tensiones iniciales de confinamiento dadas por un confinamiento isotrópico.



Figura 4.2. Modelo tridimensional del ensayo TXD, en donde los GDL libres son los que se indican.

1.3. Trayetoria de cargas para simular el ensayo triaxial drenado

En este caso, el ensayo se divide en dos partes, la Consolidación Isotrópicamente Drenada, y luego el Ensayo Triaxial Drenado.

- **Consolidación Isotrópicamente Drenada** (**CID**): Inicialmente la probeta tendrá todos sus GDL impuestos en tensión, y se cargará lentamente hasta llegar al estado de confinamiento requerido.
- Ensayo Triaxial Drenado (TXD): Este ensayo considera que los GDL bloqueados son los desplazamientos verticales de la cara inferior, y los GDL impuestos son los desplazamientos verticales de la cara superior. Como condición inicial, se retomará el cálculo desde el último paso del CID.

Cabe destacar que la Consolidación Isotrópica podría conseguirse al imponer directamente la tensión, pero simular esta trayectoria de carga reproducirá de forma exacta lo realizado en el ensayo de laboratorio y se permite la evolución de las variables de endurecimiento del modelo constitutivo.

2. Estrategia de Empalme de propiedades

Al interior del depósito de lastre, el nivel de tensiones alcanzado varía importantemente durante el proceso de simulación de la construcción. Lo ideal es que sólo un grupo de parámetros represente al material de lastre desde un estado inicial de confinamiento. Ya que esto genera problemas de convergencia y de representatividad de comportamiento, es necesario realizar un empalme de grupos de parámetros obtenidos con el objetivo de controlar estos problemas. Para verificar que la transición en el comportamiento del material sea aceptable, se comparará la simulación de los ensayos con el empalme de grupos y las correspondientes simulaciones de los ensayos COD y TXD con los grupos sin empalmar. Se desea que la solución empalmada se aproxime de mejor manera a la respuesta experimental que el utilizar un único grupo de parámetros.

2.1. Elección del confinamiento de transición

Basados en los resultados de ensayos de laboratorio, se relaciona el cambio del grupo de propiedades a un confinamiento específico. Para determinar dicho confinamiento se consideró lo siguiente:

- Se utilizará la última curva mejor ajustada en COD y TXD, y las propiedades se cambiarán en el momento en que el material alcance un determinado nivel de confinamiento.
- Por otro lado, en la construcción real del depósito, las etapas de crecimiento son de aproximadamente 60 metros. Como en 60 metros se tiene un confinamiento promedio de p['] = 1.1 [MPa], se asumirá que el primer material puesto en el depósito, tendrá las propiedades ajustadas al ensayo TXD de confinamiento p['] =

1.0 [MPa]. Para una segunda etapa de crecimiento, se consideran 120 metros de altura, lo que implica un p' = 2.2 [MPa].

3. Respuestas esperadas a confinamientos mayores

El mayor problema que tienen los modelos constitutivos complejos, es la convergencia de resultados al considerar más aspectos del comportamiento real de suelos. No es de extrañar que ciertos grupos de parámetros representen muy bien a los materiales a bajos confinamientos, pero al aumentar el confinamiento, la solución computacional no converge y los resultados no responden a la física del problema.

Como el autor de esta investigación experimentó de primera mano, es posible encontrar varios grupos de parámetros que se ajusten muy bien a los ensayos obtenidos, pero que no son capaces de llegar a los confinamientos requeridos del problema analizado. Luego, es necesario asegurar que los parámetros elegidos, además de cumplir las condiciones ya mencionadas, puedan llegar a valores de confinamiento muy altos. En términos generales, se optó por asegurar que el Grupo _{2.0} de parámetros permitiera llegar a confinamientos representativos de 650 metros de altura del depósito debido a que representa el ensayo experimental de mayor confinamiento disponible y del que se obtuvo una calibración.

4. Rango de aceptabilidad para la calibración de los Grupos

Al definir cinco grupos para calibrar el material basados en un confinamiento específico, es necesario establecer un rango de aceptabilidad. Dentro de este rango, que será definido según el confinamiento, se espera que la respuesta observada responda satisfactoriamente al ensayo de laboratorio correspondiente. Fuera de este rango, no se requiere que la respuesta obtenida sea exactamente lo observado en laboratorio pues se cambiará el grupo de parámetros a uno calibrado para dicho rango. Se definirán los rangos de la siguiente forma:

- Rango de aceptabilidad para Grupo _{0.1} : Confinamientos hasta 0.1 [MPa]
- Rango de aceptabilidad para Grupo _{0.2}: Confinamientos entre 0.1 [MPa] y 0.35 [MPa]
- Rango de aceptabilidad para Grupo _{0.5}: Confinamientos entre 0.35 [MPa] y 0.75 [MPa]
- Rango de aceptabilidad para Grupo 1.0 : Confinamientos entre 0.75 [MPa] y 1.5 [MPa]
- Rango de aceptabilidad para Grupo _{2.0} : Confinamientos desde 1.5 [MPa] en adelante

Este criterio de aceptabilidad será aplicado tanto para los ensayos edométricos, como para los ensayos triaxiales.

5. Modelo de Hujeux (HUJ)

Los parámetros ajustados para el modelo Hujeux se presentan en la Tabla 4.1. En esta Tabla, puede observarse la variación de los parámetros del modelo en función del confinamiento.

- Ángulo de fricción φ : Se observa una disminución de este parámetro a medida que el confinamiento crece. La relación de φ con la resistencia implica que para que se pierda resistencia a gran deformación, es necesaria su disminución. Este efecto se asocia a la erosión (y eventual ruptura) que experimentan los granos conforme crece el confinamiento.
- Ángulo de dilatancia ψ : La disminución de este parámetro es directa, ya que ψ ≤ φ. Destaca el hecho que se ha escogido el mayor ángulo de dilatancia posible, que está íntimamente relacionado con la contracción del material. Se desea que el material contraiga lo más que pueda, y sólo a gran deformación axial ε_{axial} se genere dilatancia producto de la propia evolución del esqueleto

sólido del material.

- Compresibilidad Plástica β : En la medida que este parámetro aumenta, la deformación volumétrica plástica aumenta. Esto se observó en la Figura 3.7, en donde la línea de consolidación isotrópica (ICL) se inclina, ya que el esqueleto sólido fracturado es más compresible que el inicial.
- Módulos elásticos K_{ref} y G_{ref} : No tiene mayor importancia en el comportamiento a gran deformación, ya que su influencia se extiende sólo en el rango elástico. Pero debido a que colabora en el mejor ajuste a pequeñas deformaciones, se consideró su modificación. También es relevante en el caso cíclico pues controla los módulos en la descarga.
- Parámetro α : No existe relación directa con la ruptura de partículas del material para ajustarlo. Sin embargo, sólo en 0.1 MPa este parámetro es diferente. Para confinamientos mayores, se observa una estabilización de este parámetro para el material.
- Parámetro a_m: El coeficiente de la ley de endurecimiento de mecanismos desviadores en trayectoria monótona aumenta para confinamientos altos. Es esperable una mayor deformación total, ya que la deformación plástica aumenta con el incremento de este parámetro. Además, la resistencia disminuye.
- Radios límite r_{ela}, r_{hys}, r_{mbl} y r_{iso}: Su influencia es importante en la calibración ya que definen el dominio de comportamiento. La dificultad en calibrar estos parámetros es alta, ya que deberían ser los mismos para un mismo material, sin importar el confinamiento.

- Parámetros cíclicos a_{cyc}, c_{cyc}: No se dispone de información específica para calibrarlos, ya que no se dispone de ensayos cíclicos en este tipo de material. Se usan valores estándares y constantes.
- Otros parámetros : La influencia de los otros parámetros en la calibración no es relevante, por lo que se opta por usar valores estándares y mantenerlos constantes para el material.

	Grupo _{0.1}	Grupo _{0.2}	Grupo _{0.5}	Grupo _{1.0}	Grupo _{2.0}
Confinamiento	0.1 [MPa]	0.2 [MPa]	0.5 [MPa]	1.0 [MPa]	2.0 [MPa]
K_{ref} [MPa]	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
G_{ref} [MPa]	13.0	13.0	13.0	25.0	25.0
n	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ϕ °	43.5	42	40	38.5	33.5
ψ °	43.5	42	40	38.5	33.5
eta	1	10	21	34	37
p_{ci} [MPa]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a_m	0.0025	0.0055	0.0060	0.007	0.009
b	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
a_{cyc}	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
α	2.5	3.0	3.0	3.7	3.7
r_{elas}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
r_{hys}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
r_{mbl}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
С	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
d	12	12	12	12	12
C_{cyc}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
r^{elas}_{iso}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabla 4.1. Parámetros HUJ para Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$

5.1. Calibración del modelo para ensayo edométrico

De acuerdo a los criterios de aceptabilidad, las Figuras 4.3 a 4.5 representan la calibraciones efectuadas para los tres ensayos COD disponibles.

- Figura 4.3 : se presenta (a) la respuesta para el grupo calibrado para p' = 0.1 [MPa], y (b) la respuesta para el grupo calibrado para un confinamiento de p' = 0.2 [MPa].
- Figura 4.4 : se presenta (a) la respuesta para el grupo calibrado para un confinamiento de p' = 0.5 [MPa], y (b) la respuesta para el grupo calibrado para p' = 1.0 [MPa].
- Figura 4.5 : se presenta (a) la respuesta para el grupo calibrado para p' = 2.0 [MPa].



Figura 4.3. Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)



Figura 4.4. Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)



Figura 4.5. Calibración de ensayos Edométricos (HUJ)

La respuesta con los Grupos a confinamientos de 0.1 [MPa], 0.2 [MPa] y 0.5 [MPa] representa correctamente el comportamiento presentado por los datos experimentales. Para

los Grupos de confinamientos a 1 [MPa] y 2 [MPa], la respuesta se aleja de los datos experimentales, aunque son aceptables dentro del rango de aceptabilidad.

5.2. Calibración del modelo para ensayo triaxial drenado

En la Figura 4.6 se presenta la calibración TXD obtenida para los distintos confinamientos, considerando previamente una fase de consolidación isotrópica.



Figura 4.6. Calibración para Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$

Se observa que para confinamientos p' = 0.1 [MPa], p' = 0.2 [MPa] y p' = 0.5 [MPa], la calibración se ajusta bastante bien, tanto en $q - \varepsilon_a$, como en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$. Para Grupo_{1.0}, el ajuste en $q - \varepsilon_a$ es aceptable, pero en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ se observa al final del tramo simulado el comienzo de la dilatancia, lo que no necesariamente debiera ocurrir, pues la rotura de partículas podría cambiar la tendencia a contracción a ese nivel de tensiones.

El ajuste de Grupo_{2.0}, para p' = 2.0 [MPa] no logra los resultados deseados. Su ajuste en $q - \varepsilon_a$ es aceptable, pero en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$, no se logra la deformación volumétrica deseada (se espera un 50% más de lo logrado), además se observa una tendencia a comenzar a dilatar después de $\varepsilon_a = 0.2$.

5.3. Respuesta del modelo con empalme por confinamiento

La respuesta de la simulación de ensayos obtenida con el empalme permite analizar la representatividad de los grupos calibrados, y estudiar el efecto de este empalme en la simulación de la construcción y posterior análisis sísmico. Si los parámetros elegidos no representan la física de su variación con el confinamiento, el empalme observado acusará esta situación. Cabe destacar que si el empalme es satisfactorio, la respuesta observada no será la misma que la obtendida sin empalmar.

En el caso del ensayo COD, el empalme se muestra en la Figura 4.7. El empalme se realiza para p' = 2.2 [MPa]. La respuesta lograda al empalmar (cambiar los parámetros) es mejor que las individuales.


Figura 4.7. Respuesta del empalme para COD

En el caso TXD, se presenta la respuesta obtenida al empalmar parámetros en la Figura 4.8. Se presentan los dos ensayos experimentales, que podrían requerir empalme de parámetros.

Respuesta obtenida para un ensayo TXD a confinamiento de p' = 1.0 [MPa]: Al inicio, se utilizará el Grupo _{1.0}, y al final de este ensayo para $\varepsilon_a = 0.2$ aún no se ha alcanzado un confinamiento de p' = 2.2 [MPa] por lo que no se realiza el cambio de grupo.

Respuesta obtenida para un ensayo TXD a confinamiento de p' = 2.0 [MPa]: Al inicio, se utilizará el Grupo _{1.0}, y para $\varepsilon_a = 0.025$, se ha llegado a un confinamiento de p' = 2.2 [MPa], por lo que se realiza el cambio al Grupo _{2.0}.

El empalme realizado con Hujeux es evidente, como se ve en el gráfico $q - \varepsilon_a$, pero no presenta discontinuidades en el gráfico $\varepsilon_v - \varepsilon_a$.



Figura 4.8. Respuesta del empalme para TXD

5.4. Respuesta del modelo a confinamientos mayores

El objetivo de simular confinamientos mayores a los disponibles en experimentos, es observar el comportamientos que inducirá el grupo de parámetros sobre el material, a tensiones como las esperadas en la construcción del depósito. En la Figura 4.9 se presentan ensayos TXD a confinamientos de 4.0 [MPa], 6.0 [MPa], 8.0 [MPa], 10.0 [MPa] y 12.0 [MPa]. Se observa que la deformación volumétrica se "satura" a $\varepsilon_v = 13\%$ aproximadamente, y no se consiguen reducciones mayores de volumen.



Figura 4.9. Ensayo TXD a mayores confinamientos

6. Modelo de Daouadji (DAO)

Los parámetros ajustados para el modelo Daouadji se presentan en la Tabla 4.2. En la Tabla, se puede observar la variación de los parámetros del modelo en función del confinamiento. Se comentarán las diferencias de calibración con el modelo de Hujeux, las que se explican en su mayoría porque ya no es necesario forzar tanto el cambio de parámetros según confinamiento, como con el caso de Hujeux. Lo ideal de la calibración es encontrar grupos lo más parecidos entre sí.

- Ángulo de fricción φ : En este caso, se puede manterner un φ más alto, según confinamiento, ya que la pérdida de resistencia también será incorporada mediante el trabajo plástico y la actualización de la posición de la recta de estado crítico.
- Ángulo característico ψ : Se busca que ψ = φ, para dar el mayor rango posible de contracción del material.
- Compresibilidad Plástica β : El parámetro β se estabiliza para mayores confinamientos, debido principalmente a que la disminución del índice de vacíos es incorporada por el trabajo plástico. Es importante recalcar que al empalmar parámetros, si β varía mucho, la solución empalmada combinada tiende a empeorar, por lo que dejar constante este valor es deseable.
- Parámetro a_m: A pesar que aún es necesario modificar este parámetro, destaca el hecho que para mayores confinamientos, no es necesario aumentar tanto su valor ya que una parte importante de las deformaciones se genera gracias al trabajo plástico incorporado.
- Parámetro B_k: Este parámetro disminuye a mayor confinamiento. La razón es que este "ponderador" que mide la propensión a experimentar ruptura de partículas, le da más peso al trabajo plástico del mecanismo desviador en la pérdida de resistencia por rotura de partículas. Además, incrementa las deformaciones plásticas en general.
- Parámetro B_{iso}: Este parámetro se mantuvo constante para los grupos a empalmar, sin ser requerida su modificación.

	Grupo _{0.1}	Grupo _{0.2}	Grupo _{0.5}	Grupo _{1.0}	Grupo _{2.0}
Confinamiento	0.1 [MPa]	0.2 [MPa]	0.5 [MPa]	1.0 [MPa]	2.0 [MPa]
K_{ref} [MPa]	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
G _{ref} [MPa]	13.0	13.0	13.0	25.0	25.0
n	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ϕ °	43.5	42.0	40.5	40.5	40.5
ψ °	43.5	42.0	40.5	40.5	40.5
eta	1	10	21	30	30
p_{ci} [MPa]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a_m	0.0025	0.0055	0.0060	0.0060	0.0060
b	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
a_{cyc}	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
α	2.5	3.0	3.0	3.0	3.0
r_{elas}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
r_{hys}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
r_{mbl}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
С	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
d	12	12	12	12	12
c_{cyc}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
r_4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
B_k	$2.5 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$
B_{iso}	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$

Tabla 4.2. Parámetros DAO para el Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$

6.1. Calibración del modelo para ensayo edométrico

Resultados edométricos para Daouadji:

- Figura 4.10: se presenta (a) la respuesta para el grupo calibrado para p' = 0.1[MPa], y (b) la respuesta para el grupo calibrado para un confinamiento de p' = 0.2 [MPa].
- Figura 4.11: se presenta (a) la respuesta para el grupo calibrado para un confinamiento de p' = 0.5 [MPa], y (b) la respuesta para el grupo calibrado para p' = 1.0 [MPa].
- Figura 4.12: se presenta (a) la respuesta del grupo calibrado para p' = 2.0 [MPa].



Figura 4.10. Calibración de ensayos Edométricos (DAO)



Figura 4.11. Calibración de ensayos Edométricos (DAO)



Figura 4.12. Calibración de ensayos Edométricos (DAO)

La respuesta con los Grupos a confinamientos de 0.1 [MPa], 0.2 [MPa] y 0.5 [MPa] representan correctamente el comportamiento dentro del rango de aceptabilidad, pero a mayor confinamiento el índice de vacíos esperado es más bajo. A confinamientos de 1

[MPa] y 2 [MPa] la respuesta se ajusta correctamente, dentro y fuera del rango de aceptabilidad.

6.2. Calibración del modelo para ensayo triaxial drenado

En la Figura 4.13 se presenta la calibración TXD obtenida para los distintos confinamientos.



Figura 4.13. Calibración para el Grupo $_{0.1},$ Grupo $_{0.2},$ Grupo $_{0.5},$ Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$

Se observa que para confinamientos p' = 0.1 [MPa], p' = 0.2 [MPa] y p' = 0.5 [MPa], la calibración se ajusta bastante bien, tanto en $q - \varepsilon_a$, como en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$. Para el Grupo _{1.0}, el ajuste en $q - \varepsilon_a$ es muy bueno, y en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ se observa que al final del tramo simulado no hay indicio de cambiar su comportamiento contractante, lo que es consistente con el efecto macroscópico ligado a la rotura de partículas del material y a lo observado en los resultados experimentales.

El ajuste del Grupo_{2.0}, para p' = 2.0 [MPa] logra una mejora con respecto a Hujeux, pero no tan significativa. Su ajuste en $q - \varepsilon_a$ es aceptable, pero en $\varepsilon_v - \varepsilon_a$, no se logra la deformación volumétrica deseada, aunque se llega a $\varepsilon_v = 10\%$, y sólo una diferencia de 3% de deformación volumétrica para llegar al resultado experimental aún cuando la forma es bastante distinta. Además, no se observa una tendencia a cambiar su comportamiento contractivo.

6.3. Respuesta del modelo con empalme por confinamiento

Por las mismas razones explicadas en el modelo de Hujeux, es necesario evaluar la respuesta empalmada, que finalmente es la que se simulará durante la construcción del depósito. En el caso del ensayo COD, el empalme se muestra en la Figura 4.7. El empalme se realiza para p' = 2.2 [MPa]. La respuesta lograda al empalmar se ajusta bastante bien a los datos experimentales. Cabe destacar que la respuesta es similar a las obtenidas para 1 [MPa] y 2 [MPa] de confinamiento, ya que los parámetros ajustados son similares.



Figura 4.14. Respuesta del empalme para COD

En el caso TXD, el empalme se presenta en la Figura 4.15. Esta respuesta se compara a los dos ensayos experimentales, que se adaptan al empalme de parámetros.

Respuesta obtenida para un ensayo TXD a confinamiento de p' = 1.0 [MPa]: Al inicio, se utilizará el Grupo _{1.0}, y al final de este ensayo, para $\varepsilon_a = 0.2$, aún no se ha llegado a un confinamiento de p' = 2.2 [MPa], por lo que no se realiza el cambio de Grupo.

Respuesta obtenida para un ensayo TXD a confinamiento de p' = 2.0 [MPa]: Al inicio, se utilizará el Grupo _{1.0}, y para $\varepsilon_a = 0.025$, se ha llegado a un confinamiento de p' = 2.2 [MPa], por lo que se realiza el cambio al Grupo _{2.0}.

Destaca que el empalme realizado con Daouadji no presenta los saltos observados al cambiar parámetros con Hujeux, como se ve en el gráfico $q - \varepsilon_a$ de la Figura 4.15.



Figura 4.15. Respuesta del empalme para TXD

6.4. Respuesta del modelo a confinamientos mayores

El objetivo de simular confinamientos mayores es observar el comportamientos que tendrá en el material, para el nivel de tensiones esperado en la construcción del depósito. En la Figura 4.16 se presentan ensayos TXD a confinamientos de 4.0 [MPa], 6.0 [MPa], 8.0 [MPa], 10.0 [MPa] y 12.0 [MPa]. Similarmente a Hujeux, se observa que la deformación volumétrica se "satura" a $\varepsilon_v = 13\%$.

Destaca que la resistencia en $q - \varepsilon_a$ sea notoriamente menor que para el caso de Hujeux, lo que es esperable cuando la rotura de partículas aumenta debido al aumento de confinamiento.



Figura 4.16. Ensayo TXD a mayores confinamientos

Capítulo 5. COMPARACIÓN DE MODELOS CONSTITUTIVOS

1. Comparación de calibraciones para ensayo edométrico

Se presentan los resultados de la simulación del ensayo edométrico:

- Figura 5.1 se presenta (a) la comparación de los grupos calibrados para p' = 0.1 [MPa], y (b) la comparación de los grupos calibrados para un confinamiento de p' = 0.2 [MPa].
- Figura 5.2 se presenta (a) la comparación de los grupos calibrados para p' = 0.5[MPa], y (b) la comparación de los grupos calibrados para un confinamiento de p' = 1.0 [MPa].
- Figura 5.3 se presenta (a) la comparación de los grupos calibrados para p' = 2.0 [MPa].



Figura 5.1. Calibración de ensayos Edométricos



Figura 5.2. Calibración de ensayos Edométricos



Figura 5.3. Calibración de ensayos Edométricos

Para los grupos a confinamientos de 0.1 [MPa], 0.2 [MPa] y 0.5 [MPa], ambos modelos representan correctamente los datos experimentales dentro del rango de aceptabilidad. Esto quiere decir que hasta 0.75 [MPa], no existe una gran diferencia entre representar el material con un modelo con ruptura de partículas, o sin ruptura de partículas.

Con los grupos a confinamientos mayores de 1 [MPa] y 2 [MPa], el modelo de Daouadji representa de mejor forma el comportamiento observado en laboratorio. Esto se debe a que la deformación volumétrica es mayor por el hecho de incorporar la rotura de partículas. Además, como también se utilizará el Grupo ₂ para representar el material a confinamientos mayores a 2 [MPa], se espera que el modelo de Daouadji represente de mejor forma al materia del depósito, ya que el confinamiento máximo esperado a representar en el depósito será aproximadamente de 10 [MPa].

2. Comparación de calibraciones para ensayo triaxial drenado

En la Figura 5.4 se presenta la comparación TXD de los grupos calibrados para confinamientos de p' = 0.1 [MPa], p' = 0.2 [MPa] y p' = 0.5 [MPa]. De la comparación, se observa que ambos modelos permiten representar bastante bien el comportamiento del material a confinamientos por debajo de 0.5 [MPa]. Estas diferencias menores se deben a que a este nivel de confinamiento, el rol de la ruptura de partículas es pequeño con respecto a la respuesta global del material.

Específicamente para el grupo calibrado a p' = 0.5 [MPa] se observa que para una deformación axial mayor a 10%, ambos modelos presentan un comportamiento notoriamente diferente. Según $q - \varepsilon_a$, el modelo de Daouadji predice un comportamiento similar al experimental, y Hujeux predice una resistencia levemente major a Daouadji. En $\varepsilon_v - \varepsilon_a$, el modelo de Hujeux predice un comportamiento similar al experimental, y Daouadji predice una deformación volumétrica levemente mayor, a igual deformación axial.

Esto se debe a que cuando ocurre ruptura de partículas, el material pierde resistencia al corte q y genera mayor deformación volumétrica. Esto explica por qué los modelos de comportamiento entregan resultados diferentes a mayor confinamiento.



Figura 5.4. Comparación ensayo TXD a $p^{\prime}=0.1,\,p^{\prime}=0.2$ y $p^{\prime}=0.5$ MPa

En la Figura 5.5 se presenta la comparación TXD de los grupos calibrados para confinamientos de p' = 1.0 [MPa] y p' = 2.0 [MPa].

De la comparación, se observa que para TXD a confinamiento p' = 1.0 [MPa], la respuesta del Modelo de Daouadji es un poco mejor, ya que se ajusta mejor en $q - \varepsilon_a$, y presenta la tendencia a continuar con la contracción a gran deformación, como se observa en el gráfico $\varepsilon_v - \varepsilon_a$.

En el caso de TXD a confinamiento de p' = 2.0 [MPa], la respuesta del Modelo de Daouadji también es algo mejor ya que, del gráfico $\varepsilon_v - \varepsilon_a$, se observa mayor deformación volumétrica y la tendencia del material es a seguir contrayendo a gran deformación. De todas formas, las respuestas simuladas a este confinamiento en el plano $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ se alejan bastante de la respuesta experimental. En el gráfico $q - \varepsilon_a$, a baja deformación Daouadji se ajusta mejor a los datos experimentales en el rango de 0% a 12% de deformación axial, pero no es una diferencia significativa.



Figura 5.5. Comparación ensayo TXD a $p^{\prime}=1.0~{\rm y}~p^{\prime}=2.0~{\rm MPa}$

3. Efecto de la rotura de partículas en la línea de estado crítico (CSL)

Como se presentó en el Capítulo 3, al explicar los aspectos teóricos del modelo de Daouadji, la ruptura de partículas de material se modela como un traslado de la CSL (*Critical State Line*) ya que la capacidad contractiva del material aumenta. En la Figura 5.6 se presentan las CSL obtenidas para el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) y para el modelos con ruptura de partículas (DAO). Este lugar geométrico se obtiene encontrando los estados últimos obtenidos para los ensayos triaxiales modelados.



Figura 5.6. Comparación de la CSL (Critical State Line)

Debido a que los parámetros utilizados en estos modelos constitutivos varían para los distintos grupos, la CSL se representa con segmentos cuyas pendientes varian en función de los estados críticos de cada grupo. Los parámetros que producen esta variación de la curva son todos aquellos que intervienen en el cálculo de la presión crítica p'_{cr} . Es decir, β que se modifica según p', y p_{ci} que no varía. En el modelo de Daouadji, los parámetros de susceptibilidad a la rotura B_k y B_{iso} también producen una variación en la CSL, en la medida que el trabajo plástico aumenta.La Tabla 5.1 presenta la evolución del parámetro β para cada grupo de los modelos calibrados.

Tabla 5.1. Parámetro β utilizado por los modelos.

	HUJ	DAO
Grupo _{0.1}	1	1
Grupo _{0.2}	10	10
Grupo _{0.5}	21	21
Grupo _{1.0}	34	30
Grupo _{2.0}	37	30

En base a la Figura 5.6 y la Tabla 5.1 se observa una similitud en la pendiente de la CSL que que se obtiene de los modelos Hujeux y Daouaji, para los primeros cuatro ensayos simulados. Esta pendiente, que se define por segmento según el grupo calibrado, está influenciada principalmente por el parámetro β , ya que la ruptura de partículas no es importante. En el último ensayo correspondiente a un confinamiento de 2[MPa] se observa que el modelo Hujeux define otro segmento para representar la CSL, en cambio Daouadji extiende la CSL definida para el ensayo de 1[MPa] de confinamiento. Esto se debe a que en el modelo Daouaji, que considera ruptura de partículas, la compresibilidad plástica β es la misma para el Grupo_{1.0} y Grupo_{2.0}, y es la ruptura de partículas la causa del incremento en la pendiente de la CSL, lo que permite desarrollar un comportamiento contractivo a medida que el confinamiento aumenta.

4. Comparación del empalme por confinamiento

Cabe destacar que tanto en el modelo de Hujeux, como en el modelo de Daouadji, el Grupo $_{1.0}$ y Grupo $_{2.0}$ logran empalmarse de buena manera, sin presentar una alteración significativa de resultados. Esto se pudo observar en las respuestas COD y TXD de cada modelo, considerando empalme de parámetros.

4.1. Ensayo edométrico a 1 MPa, 2 MPa y empalme por confinamiento

Respecto a los ensayos COD, en la Figura 5.7 se observa que para Daouadji, el índice de vacíos decrece más que en el Modelo de Hujeux, ya que la rotura de partículas tiene mayor ocurrencia al aumentar el confinamiento.

Para confinamientos de p' = 2.0 [MPa] aproximadamente, recién comienza a diferenciarse la respuesta del ensayo COD, para los modelos utilizados. En confinamientos mayores a p' = 2.0 [MPa], ambos modelos tienen una diferencia con los resultados experimentales, pero el modelo que representa de mejor forma el comportamiento esperado para el material de lastre es Daouadji. Cuando la tensión vertical alcanza los 10 [MPa], Daouadji predice un índice de vacíos de 0.25, coincidiendo con el ensayo experimental, mientras que al mismo confinamiento la respuesta de Hujeux es un 15% mayor.



Figura 5.7. Comparación del empalme ensayo COD.

4.2. Ensayo triaxial a 1 MPa, 2 MPa y empalme por confinamiento

Como pudo observarse en la Figura 4.8 y en la Figura 4.15, el empalme obtenido permite representar de mejor forma el ensayo TXD a p' = 2.0 [MPa] de confinamiento inicial en relación a utilizar un sólo grupo de parámetros. Además, para la modelación de la construcción del depósito, se realizará el empalme de propiedades conforme crezca el confinamiento del material en el modelo completo en función de la altura del material depositado. Por tanto, cuanto mejor se ajuste el empalme a los resultados experimentales TXD, mejor podría ser la respuesta entregada por la modelación completa del depósito. De la Figura 5.8 se observa que:

TXD a p' = 1.0 [**MPa**]: Para el gráfico q- ε_a , se observa que la curva que se ajusta mejor al ensayo TXD es la entregada por Dauoadji, especialmente hasta 13% de deformación axial. De la misma forma, para el gráfico ε_v - ε_a , se observa que el comportamiento contractivo del material queda mejor representado por Dauoadji.

TXD a p' = 2.0 [MPa]:

El empalme para este ensayo se realiza a una deformación axial ε_a de 0.035. En el gráfico q- ε_a se observa que las mejores curvas obtenidas, corresponden a Daouadji empalmado (hasta 10% de ε_a), y a gran deformación, a Hujeux no empalmado. Cabe notar que Hujeux empalmado entrega el peor resultado, debido principalmente a la brusca variación de parámetros que experimenta. Del gráfico ε_v - ε_a , se observa que la solución más cercana es la entregada por Daouadji sin empalmar, y en segunda instancia, Daouadji empalmado, pero con una diferencia menor.



Figura 5.8. Comparación del empalme ensayo TXD

El estudio de las respuestas entregadas por los modelos, es posible concluir dos aspectos a considerar al momento de modelar el depósito completo:

Al modelar el lastre con Hujeux: debido a que se debe realizar forzosamente el empalme de parámetros, la solución obtenida puede ser muy dependiente de la etapa de crecimiento en la que se efectúe el cambio de parámetros, en referencia a las calibraciones individuales TXD de la Figura 4.6.

Al modelar el lastre con Daouadji: el empalme ayudará a reproducir de forma más precisa la contrucción del depósito. Esto también es debido a que al incorporar la rotura de partículas del material, fue posible lograr una calibración más cercana a los datos experimentales, sin alterar tanto los parámetros entre confinamientos, ya que la variación de las propiedades intrínsecas del modelo constitutivo son menores.

Grupos a empalmar: El Grupo $_1$, que responde al confinamiento de 1 [MPa], representa aproximadamente 60 metros de altura de material y equivale a la construcción de una etapa. Al construir un stage que aumente la altura a 120 metros, se modificarán las propiedades del material al Grupo $_2$.

Incremento de carga lento: Debido a que un cambio brusco de propiedades puede afecta la respuesta del depósito, se cargará lentamente el incremento de 60 metros, evitando que la definición de las etapas sea una causa de error importante.

Capítulo 6. MODELACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DEL DEPÓSITO

1. Antecedentes

Debido a que las etapas constructivas del Depósito de Lastre San Francisco no han sido establecidas para su condición final, para efectos de modelación se considerarán los niveles topográficos proyectados hasta el año 2019, como se presentó en la Figura 2.3 (a) del Capítulo 2 de acuerdo a la información entragada por Arcadis Chile.

2. Secuencia constructiva proyectadas para después del año 2019

Para las etapas constructivas sin información se procederá a construir etapas cada 60 metros, respetando la topografía última proyectada de la Figura 2.3 (b) del Capítulo 2. La proyección final del depósito de lastre se presenta en la Figura 6.1, y la secuencia constructiva en detalle se presenta en el apéndice A.



Figura 6.1. Proyección del depósito de lastre en la etapa final.

3. Modelación de las etapas constructivas

La modelación de una etapa constructiva consiste en activar la malla de elementos finitos que define la etapa en cuestión. Además de esto, se ha optado por modelar la construcción de cada etapa activando progresivamente la gravedad de cada capa nueva. Así, el peso (γ) del material correspondiente a la etapa activada se subdivide en diez subetapas hasta llegar a su peso real. Esto permite ir cargando el material en forma más gradual.

En total se han considerado 22 etapas de construcción para modelar el depósito de lastre, como se presenta en la Figura 6.2.



Figura 6.2. Diseño proyectado al final de la construcción del depósito. En café se presenta la topografía original del terreno.

4. Malla de elementos finitos definida para el depósito

Como GEFDyn utiliza el método de elementos finitos, es necesario definir una malla acorde al problema a modelar. El depósito se modelará con elementos triangulares de 3

nodos, y el tamaño de estos será tal que existan al menos 8 elementos por longitud de onda λ . Además, se considera evaluar la respuesta sísmica hasta 10 [Hz], con lo que la longitud máxima de los elementos se define como:

$$l_{max} = \frac{1}{8} \frac{v_s[m/s]}{10[Hz]} \tag{6.1}$$

en donde $v_s[m/s]$ es la velocidad de propagación las ondas en el medio. La Figura 6.3 presenta la malla definida para el depósito.

Considerando un v_s de 1600[m/s] se determinó un tamaño máximo de 20 metros para los elementos. La malla está compuesta por 28593 elementos triangulares, 409 elementos paraxiales, 14285 nodos y 2 grados de libertad por cada uno. Además la modelación se realizará en condición seca.



Figura 6.3. Malla de elementos finitos.

5. Representación del borde inferior del terreno

Para incorporar la onda sísmica es necesario definir el borde inferior como un borde consistente modelado mediante elementos paraxiales. La aproximación paraxial (Engquist y Majda, 1977) permite desarrollar una expresión para la impedancia dinámica en tiempo/espacio para este borde. Esta aproximación permite que el elemento sea tanto un borde absorvente, como una herramienta para imponer un campo incidente (Modaressi, 1987).

Asimismo, como se observa en la Figura 6.3, el borde inferior del terreno se modela con forma curva evitando la existencia de ángulos o quiebres en el contorno externo de forma de controlar las reflecciones parásitas en las esquinas. En efecto, al incorporar una onda sísmica, se generan rebotes de onda en zonas de quiebre abrupto, que no dejarían escapar toda la energía disipada por la radiación, como ocurre en una situación real.

Capítulo 7. COMPORTAMIENTO DEL DEPÓSITO MODELADO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

El comportamiento esperado a reproducir en la construcción del depósito es la ruptura de partículas. Para comprender cual es el efecto de la rotura en el depósito, se usarán dos modelos de comportamiento mecánico. Uno, que no considera ruptura de partículas (HUJ) y otro que incorpora la rotura de partículas mediante el trabajo plástico del esqueleto sólido (DAO). Así, al comparar ambos modelos permitirá analizar el efecto de la rotura en el comportamiento global del depósito de lastre.

Para la evaluación del proceso de construcción, se presentarán las Etapas 5, 10, 15 y 22. Estas ilustran el comportamiento del depósito en su construcción, ya que son etapas suficientemente distintas. Las variables a contrastar serán los asentamientos, deformaciones, tensiones, y trabajos plásticos en el caso del modelo con ruptura de partículas (DAO).

1. Deformación Volumétrica y Desplazamientos

En principio, al modelar la construcción del depósito, cada etapa debiera producir deformaciones, las que se acumularían a medida que se construye el depósito. Sin embargo, este tipo de modelación tiene consecuencias en la convergencia del modelo, ya que se pierde la geometría de referencia, que es la utilizada para construir las siguientes etapas.

Para evitar este problema sin comprometer la validez del cálculo, se opta por devolver a cero los desplazamientos y la deformación volumétrica total ε_v al inicio de cada etapa de construcción. Esto significa que al inicio de cada etapa, el depósito estará en la posición de diseño, pero conservará sus variables de historia, como lo es la deformación volumétrica plástica ε_v^p , radios plásticos, trabajo plástico, entre otros. Lo anterior implica que el estado de tensiones también se conservará. Por lo tanto, la deformación volumétrica obtenida corresponderá al incremento ε_v debido a la construcción de la etapa activa, y los asentamientos también corresponden sólo al incremento del desplazamiento vertical en dicha etapa.

1.1. Incremento de Deformación Volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ y Asentamiento Vertical

La deformación volumétrica ε_v está relacionada con la evolución de la densidad del material, y por lo tanto, con su resistencia y posible plastificación. En su defecto, y por las razones explicadas anteriormente, se presenta el incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ asociada a la etapa modelada. En conjunto se presenta el asentamiento de los perfiles longitudinales definidos en el depósito, los que permiten evaluar potenciales desplazamientos de sus taludes.

Para la etapa 5 se presenta la $\dot{\varepsilon_v}$ (7.1) y el asentamiento para dos perfiles longitudinales (Figura 7.2 y Figura 7.3), que incluyen un detalle de la zona evaluada. Los otros resultados de este capítulo se entregan de forma similar.



Figura 7.1. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 5.

Como se aprecia en la Figura 7.1, ambos modelos predicen un incremento de deformación volumétrica similar en la cara superior del talud que se forma. La diferencia radica en que el modelo con ruptura de partículas(DAO) predice una deformación de 0.5 % en la base de este talud, a diferencia del modelo HUJ que no predice esta deformación.



Figura 7.2. Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 5.

En la Figura 7.2 observa con mayor detalle la base del talud en cuestión. La deformación volumétrica predicha por el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de un 1%, hasta 5 veces mayor que la predicha por el modelo sin ruptura de partículas (HUJ). Con respecto al perfil longitudinal evaluado, DAO predice un asentamiento de 0.3 [m], 3 veces mayor a HUJ en la base del talud.



Figura 7.3. Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 5.

En la Figura 7.3 se observa con mayor detalle la cara superior del mismo talud. La deformación volumétrica predicha por ambos modelos es similar, aunque el modelo con ruptura de partículas (DAO) predice un asentamiento de 7[m] al acercarse al borde, 13% más que Hujeux.



Figura 7.4. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 10.

En la Figura 7.4, se aprecia que el modelo con ruptura de partículas (DAO) produce unas bandas de deformación que se extienden en conjunto con la deformación volumétrica, lo que no ocurre en el modelo sin ruptura (HUJ). Estas bandas alcanzan una deformación de 1.5 %.



Figura 7.5. Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 10.

En la Figura 7.5 se observa que el nivel de deformación es similar, aunque la distribución varía un poco ya que en la base del talud el modelo DAO experimenta mayor deformación. El perfil de asentamientos predice que el modelo con ruptura de partículas (DAO) alcanza 3.5[m], un 30% más de deformación volumétrica que el modelo sin ruptura (HUJ).



Figura 7.6. Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 10.

En la Figura 7.6 se observa que el nivel de deformación volumétrica en ambos modelos es similar, aunque a una profundidad mayor, el modelo con ruptura de partículas (DAO) predice mayor deformación y comienzan a distingirse ciertas bandas de deformación a mayor profundidad. El perfil de asentamiento sugiere que el modelo DAO produce una asentamiento de 17[m], levemente mayor al modelo de HUJ.



Figura 7.7. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 15.

En la Figura 7.7 se observa que ambos modelos responden similarmente cerca de la superficie, sin embargo a mayor profundidad, el modelo con ruptura de partículas (DAO) muestra un aumento en la deformación volumétrica debido a la tendencia a desarrollar bandas de deformación a lo largo del depósito. Esta deformación, que no se observa en el modelo HUJ, es de un 1.2%.


Figura 7.8. Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 15.



Figura 7.9. Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 15.

En la Figura 7.9 se aprecia que la distribución de la deformación volumétrica que produce el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) en el talud es mayor al estimado por

el modelo DAO. En el perfil de asentamiento se observa que en el borde inferior del talud de la derecha, el modelo con ruptura de partículas (DAO) alcanza 4.2[m], un 25% más de asentamiento que el modelo HUJ.



Figura 7.10. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.10 se observa que ambos modelos generan deformaciones de hasta un 2 % cerca de la superficie construída, y bajo esta, un bulbo con deformaciones que alcanzan un 1 %. En el modelo DAO además se forman bandas de deformación volumétrica en profundidad de un 1 %, las que no se forman en el modelo HUJ.



Figura 7.11. Perfil longitudinal 1 del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.11 se observa que la deformación volumétrica de ambos modelos es similar, principalmente por la escala global de deformaciones. El perfil de asentamiento

muestra que para ambos modelos, el terreno se asienta más al acercarse al centro del depósito, y al alejarse del centro el asentamiento es menor. El modelo DAO predice un asentamiento de 0.95 [m], 20% más que el modelo HUJ.



Figura 7.12. Perfil longitudinal 2 del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.12 se observa que la deformación volumétrica cercana a la superficie es similar para ambos modelos, pero a mayor profundidad el modelo DAO predice hasta el doble de deformación. El perfil de asentamientos del modelo DAO predice 34[m] de asentamientos, un 20% más en comparación al modelo HUJ, pero ambos presentan la misma forma. Los asentamientos son altos, principalmente por la altura alcanzada por el depósito.



Figura 7.13. Perfil longitudinal 3 del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.13 se observa que, contrario a la tendencia observada, el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) genera mayor deformación volumétrica en profundidad que

el modelo DAO. Además, en el borde superior cercano al talud se observa que el asentamiento en el modelo DAO es menor que el producido por el modelo HUJ que es de 0.2[m], pero al alejarse de este, el asentamiento del modelo DAO es mayor, alcanzando 0.6[m].

1.1.1. Análisis de resultados

La ε_v indica que la ruptura de partículas (DAO) se produce porque al aumentar la altura del depósito, se producen bandas en las que aumenta la deformación principalmente por el aumento del esfuerzo de corte. En el perfil longitudinal de asentamiento se observa que la ruptura de partículas (DAO) tiende a producir mayores asentamientos en los perfiles, pero la forma de asentamiento es similar con el modelo sin ruptura (HUJ). También destaca que entre más cerca del borde del talud se está, el comportamiento de HUJ y DAO se asemejan, e inclusive, DAO presenta menor asentamiento, como se observa en la Figura 7.13 que corresponde a la última etapa de construcción . Esto se debe a que esta última etapa no produce efectos de ruptura en el borde del talud que se ubica en el perfil mencionado, probablemente por la lejanía con la etapa construida. Al no producir efectos de ruptura de partículas, el modelo sin ruptura (HUJ) presenta un comportamiento menos resistente, ya que los parámetros definidos para el modelo con ruptura (DAO) son más rígidos que los del modelo sin ruptura (HUJ), porque no se genera ruptura de partículas.

2. Deformación Volumétrica Plástica (ε_v^p)

Para analizar el efecto de la ruptura de partículas sobre la deformación volumétrica plástica (ε_v^p), se debe tener presente que corresponde a la diferencia entre la deformación volumétrica elástica y la deformación volumétrica total:

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e \tag{7.1}$$

Esta deformación es una variable interna del material y se acumula en la medida que se construyen las etapas, por lo que complementa la información entregada por el incremento de la deformación volumétrica. A continuación se presenta la deformación volumétrica plástica ε_v^p en distintas etapas del depósito, asociadas a las etapas seleccionadas.



Figura 7.14. Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 5.

En la Figura 7.14 se observa que la deformación plástica en la base del depósito para el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 2%, el doble que la obtenida en el modelo HUJ, debido a que la formulación del modelo actualiza la compresibilidad del esqueleto sólido.



Figura 7.15. Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 10.

En la Figura 7.15 se observa que la deformación plástica alcanzada por el modelo DAO en la base es de 2%, el doble que la obtenida por el modelo HUJ. Además de poder reconocer cierta tendencia a formar bandas.



Figura 7.16. Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 15.

En la Figura 7.16 se observa que la deformación plástica alcanzada por el modelo DAO en la base es de 3%, el triple que la obtenida por el modelo HUJ. Además, se puede reconocer el inicio de la formación de bandas.



Figura 7.17. Deformación volumétrica plástica ε_v^p del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.17 se observa que la deformación plástica alcanzada por el modelo DAO en la base es de 3%, el triple que la obtenida por el modelo HUJ. También se observan bandas de deformación hacia el interior del depósito. Cerca de la superficie, las deformaciones volumétricas plásticas son similares.

2.0.2. Análisis de resultados

Se observa en general que el modelo con ruptura de partículas (DAO) presenta mayor deformación volumétrica plástica (ε_v^p) que el modelo sin ruptura (HUJ). El comportamiento plástico del material ocurre cuando el estado tensional produce cambios irreversibles, que físicamente se atribuyen en este caso a la ruptura y reordenamiento del esqueleto sólido.

El modelo sin ruptura (HUJ) sólo contempla efectos producidos únicamente por un reordenamiento de partículas en su formulación. El modelo con ruptura (DAO), contempla tanto ruptura de partículas como la reorganización del esqueleto sólido, de forma que naturalmente se producen deformaciones volumétricas plásticas (ε_v^p) mayores.

Cabe destacar que el material en la capa superficial del depósito, que está a bajo confinamiento, experimenta mayor deformación volumétrica plástica (ε_v^p) en el modelo sin ruptura (HUJ), que en el modelo con ruptura (DAO). La razón es la misma que se mencionó al comparar los asentamientos del perfil longitudinal, pues el comportamiento del material calibrado con ruptura (DAO), presenta mayor resistencia que los grupos calibrados sin ruptura (HUJ), cuando la ruptura es poca o nula. También se observa que en el caso del modelo con ruptura (DAO), se producen bandas de deformación en la zona que ε_v^p aumenta.

3. Tensión Vertical σ_{zz}

Se presenta a continuación la tensión vertical (σ_{zz}) del depósito, para el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) y para el modelo con ruptura de partículas (DAO). Además, se definen perfiles verticales para comparar la evolución de la tensión vertical debido a las etapas de construcción, que se presenta en la Figura 7.20.



Figura 7.18. Tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito. Etapa 5.

Como se observa en la Figura 7.18, no existen diferencias entre los modelos en la distribución o magnitud de las tensiones verticales, lo que es natural pues en ambos casos se resuelve el equilibrio y el peso del material es idéntico.



Figura 7.19. Tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito. Etapa 22.

En la Figura 7.19 se observa que ambos modelos entregan tensiones verticales similares, sin embargo en profundidad el modelo con ruptura de partículas (DAO) muestra una distribución en forma de bandas, lo que es producto de la formación de las bandas de deformación que actúan como discontinuidades.



Figura 7.20. Tensión vertical σ_{zz} MPa del depósito para las etapas a analizar.

3.0.3. Análisis de resultados

Se observa que la magnitud de la tensión vertical (σ_{zz}) es similar para ambos modelos de comportamiento, a pesar que el modelo con ruptura de partículas (DAO) muestra algunas bandas de deformación en la medida que se construye el depósito. También se observa en la Figura 7.20b, que no existe mayor diferencia en la distribución de tensiones para las distintas etapas evaluadas. Este comportamiento es de esperar ya que la solicitación tensional depende principalmente del peso y geometría del material, la que es idéntica en ambos casos. El modelo con ruptura (DAO) genera bandas de deformación que también se manifiestan en la distribución de tensiones.

El análisis para la tensión horizontal σ_{yy} es muy similar entre ambos modelos.

4. Esfuerzo de Corte τ_{uz}

La ditribución del esfuerzo de corte τ_{yz} será fundamental para entender la generación de ruptura durante la construcción del depósito, pues corresponde a uno de los principales mecanismos que provocan ruptura de partículas. Se presenta a continuación, el esfuerzo de corte τ_{yz} para el modelo con ruptura de partículas (DAO) y sin ruptura de partículas (HUJ). También se definen perfiles verticales, para comparar la evolución del corte durante la construcción del depósito.



Figura 7.21. Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 5.

Se observa en la Figura 7.21, que el modelo con ruptura de partículas (DAO) genera leves concentraciones de tensiones, aún cuando ambos modelos entregan resultados similares. Estas concentraciones con forma de bandas, se producen desde el interior del depósito hacia el exterior, como se observa debajo del talud superior.



Figura 7.22. Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 10.

En la Figura 7.22 se observa que el modelo DAO tiende mostrar bandas de corte en profundidad, a diferencia del modelo HUJ que no las presenta. Globalmente la distribución de tensiones es similar entre ambos modelos.



Figura 7.23. Tensión de corte τ_{yz} Pa del depósito. Etapa 22.



Figura 7.24. Tensión de corte τ_{yz} MPa del depósito para las etapas a analizar.

4.0.4. Análisis de resultados

El modelo con ruptura de partículas (DAO) forma bandas de corte, que no se observan en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ). Estas bandas se forman porque el mecanismo desviador es el principal generador de ruptura de partículas (parámetro B_k relativamente menor), ya que genera un trabajo plástico y reduce la resistencia del material. Por otro lado, los perfiles verticales de la Figura 7.24 muestran que la distribución de la tensión de corte es similar en ambos modelos, a medida que se construye el depósito. Esto se debe a que el equilibrio de fuerzas en el depósito debe cumplirse en los dos modelos, y el peso de los materiales y geometría es el mismo.

5. Tensión Lateral σ_{xx}

Se presenta a continuación la tensión lateral (σ_{xx}) del depósito, para el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) y para el modelo con ruptura de partículas (DAO). Esta tensión proviene del empuje lateral del material en deformación plana.



Figura 7.25. Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 5.

En los inicios de la construcción del depósito, no se aprecia mayor diferencia de tensiones horizontales entre los modelos, como se observa en la Figura 7.25 Figura 7.26.



Figura 7.26. Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 10.



Figura 7.27. Tensión en el plano σ_{xx} Pa del depósito. Etapa 22.

Como se observa en la Figura 7.27, el modelo con ruptura de partículas (DAO) tiende a mostrar las bandas de deformación en términos de tensión horizontal a profundidad, pero la distribución global entre modelos es muy similar.

5.0.5. Análisis de resultados

La formación de estas bandas proviene de la ruptura de partículas dada la activación del mecanismo desviador en el plano XZ y en el plano XY, los cuales efectivamente generan trabajo plástico. Por otro lado, el inicio de las bandas parece coincidir con las esquinas de la superficie del modelo, lo que sugiere que la concentración de tensiones que ocurre naturalmente cerca de estas singularidades gatillará la formación de estas bandas. De todas formas, la distribución general de tensión es muy similar.

6. Modelo Daouadji: Trabajo Plástico W y variable de rotura R_p

El modelo con ruptura de partículas de Daouadji (DAO), define un trabajo plástico para cada mecanismo por separado.

Como el problema es en deformaciones planas, para el mecanismo desviador se espera que la mayor generación de ruptura ocurra en el plano YZ, en segunda instancia, en el plano XZ, y en menor contribución en el plano XY, principalmente debido a la magnitud de las tensiones fuera del plano del modelo.

Para el mecanismo isotrópico, se espera una contribución mayor en el centro del depósito, debido a que este mecanismo es proporcional al confinamiento.

Además, debido a que el trabajo plástico no es una variable fácil de comparar ni un indicador de ruptura por si mismo, se definirá una variable de rotura R_p . Esta variable se relaciona con la presión crítica definida en el capítulo 3. Sea la presión crítica p'_{cr} para un plano cualquiera:

$$p'_{cr} = p'_{ci}(1 - f[S])e^{\beta e_v^p}$$
(7.2)

con

$$f[S] = \frac{W^p}{W^p + B} \tag{7.3}$$

entonces, se define la variable de rotura R_p como:

$$R_p = (1 - f[S]) \tag{7.4}$$

La variable de rotura R_p está limitada entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 implica que el material ha experimentado una rotura importante en el mecanismo analizado y por el contrario, un valor cercano a 1 indica que las partículas del esqueleto sólido están intactas.

6.1. Trabajo plástico W_k en el plano YZ y Trabajo plástico W_p isotrópico

Como se mencionó, el modelo de Daouadji (DAO), incorpora el fenómeno de la ruptura de partículas mediante el trabajo plástico. A continuación, se presenta el trabajo plástico W_k en el plano YZ y el trabajo plástico W_p isotrópico. En conjunto con esto, se presenta la rotura R_p para estos mecanismos.



Figura 7.28. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 5.

Se aprecia en la Figura 7.28, que se produce trabajo plástico W_k en el plano YZ a poca profundidad, y su rotura plástica R_p , muestra que sólo cerca de la superficie el material no sufre de rotura. El trabajo plástico W_{iso} presenta un aumento considerable en la base del depósito, pero no se aprecia rotura plástica producto de la componente isotrópica en el depósito.



Figura 7.29. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 10.

En la Figura 7.29 se observa un aumento del trabajo plástico W_k en el plano YZ en la base del depósito, llegando a valores del orden de $R_p = 0.2$ en la zona central.

El trabajo plástico W_{iso} , presenta un aumento sectorizado producto de las capas de construcción, pero no se aprecia rotura plástica isotrópica masivamente en el depósito.



Figura 7.30. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 15.

Se aprecia en la Figura 7.30, que el trabajo plástico W_k en el plano YZ sigue aumentando en la base del depósito, llegando incluso a $R_p = 0$ en la zona central.

El trabajo plástico W_{iso} presenta nuevos aumentos sectorizados, producto de las capas de construcción, con valores mínimos del orden de $R_p = 0.9$.



Figura 7.31. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 22.

Se aprecia en la Figura 7.31, que el trabajo plástico W_k en el plano YZ además de seguir aumentando en la base del depósito, se genera bandas nítidas de concentración de rotura, las que están en al interior del depósito. Su rotura plástica R_p , muestra que sólo cerca de la superficie el material no sufre de rotura, y el valor que predomina es de alrededor de $R_p = 0.2$. El trabajo plástico W_{iso} presenta nuevos aumentos, formando bandas, y aunque sí se aprecia rotura plástica R_p en el depósito, no es tan importante y está más bien localizada.

6.1.1. Análisis de resultados

Los resultados muestran que el trabajo plástico W_k en el plano YZ, aumenta principalmente en bandas de 45°, asociadas al mecanismo desviador en el plano YZ y direcciones de corte máximo. Recordando la definición del trabajo plástico para el mecanismo desviador, se tienen dos términos que contribuyen al aumento de rotura de partículas:

$$\dot{W}_k^p = p'_k \cdot \|\dot{\varepsilon}_{v_k}^p\| + \underline{s}'_k \cdot \|\dot{\overline{\varepsilon}}_k^p\| \tag{7.5}$$

en donde $p'_k \cdot \|\dot{\varepsilon}^p_{v_k}\|$ corresponde a la contribución de la tensión reducida p_{yz} , y $\underline{s'_k} \cdot \|\underline{\dot{\varepsilon}}^p_k\|$ corresponde a la contribución de la tensión desviadora s_k sobre dicho plano.

Por lo tanto, debido a que las tensiones verticales σ_{zz} son altas y las horizontales σ_{yy} son bajas, la tensión desviadora s_k en el plano YZ, generará mayor rotura en comparación a la tensión desviadora s_k en los otros planos.

Además, la tensión reducida p_{yz} generará mayor trabajo plástico en el plano YZ, debido a que las únicas deformaciones posibles son en el plano YZ ya que el problema es de deformaciones planas.

Del trabajo plástico W_p isotrópico, se puede observar según la rotura R_p , que no genera una ruptura de partículas importante. Esto se observó al momento de calibrar el modelo con ruptura de partículas (DAO), ya que al realizar el ensayo triaxial, el efecto de este mecanismo contribuía poco en mejorar la calibración. Por otro lado, los mecanismos desviadores sí contribuían en mejorar la respuesta, y por lo tanto el mecanismo desviador fue el más activo en la calibración. Debido a la falta de resultados de ensayo de laboratorio, no fue posible determinar un valor B_{iso} que representara un estado a gran confinamiento, pero para el ensayo de mayor confinamiento, el mecanismo isotrópico se activaba en mayor medida.

6.2. Trabajo plástico W_k en el plano XZ y plano XY

Se presenta también el trabajo plástico W_k en el plano XZ y plano XY, en conjunto con sus respectivas roturas R_p .



Figura 7.32. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 5.

En la Figura 7.32, se observa que el trabajo plástico W_k en el plano XZ aumenta en la base del depósito, y su rotura plástica R_p muestra que la rotura es importante en la base del depósito, pero no en superficie. En el plano XY, se observa un aumento de W_k en puntos locales del depósito que probablemente estén asociados a etapas constructivas. Su R_p también es localizada y no debería ser importante para la respuesta global del modelo.



Figura 7.33. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 10.

La Figura 7.33 muestra que el trabajo plástico W_k en el plano XZ aumenta en la base del depósito, con cierta tendencia a formar bandas, mientras que su rotura plástica R_p se incrementa en gran parte de la base del depósito, sin causar rotura en superficie.



Figura 7.34. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 15.

En la Figura 7.34 se observa que W_k en el plano XZ sólo aumenta en zonas localizadas, y se muestra la tendencia a generar bandas. La distribución de R_p indica que existe una zona en la base del depósito que no sufre rotura, tal como se observó en superficie. En el plano XY, existe un aumento de R_p en puntos localizados al interior del depósito, pero de todas formas los valores son superiores a $R_p = 0.6$ aproximadamente.



Figura 7.35. Trabajo plástico en el depósito. Modelo DAO. Etapa 22.

En la Figura 7.35 se observa que W_p en el plano XZ genera bandas en la base del depósito y la R_p indica que en el interior sufre rotura. En el plano XY, existe un aumento de W_k y por lo tanto de R_p en puntos localizados dentro del depósito.

6.2.1. Análisis de resultados

El trabajo plástico W_k en el plano XZ se localiza en bandas, asociado principalmente a la tensión desviadora s_k . Esto, al igual como ocurre para W_k en el plano YZ, ocurre porque la tensión vertical σ_{zz} es alta y la tensión en el plano σ_{xx} es baja. Además, la tensión reducida p_k contribuye bastante poco al trabajo plástico, ya que en el plano XZ, sólo puede haber deformación en la dirección vertical z. Se observa también que la rotura R_p es nula en la superficie del depósito, y aumenta hacia el interior de éste. Pero existe una zona interna en la que la rotura R_p también es baja, debido a que en esa zona la tensión vertical σ_{zz} es baja debido a la altura del depósito y consecuentemente también lo es la tensión lateral σ_{xx} .

En el caso del trabajo plástico W_k en el plano YZ, no se observa el mismo efecto ya que la tensión horizontal σ_{yy} en ese sector, es provocada por un empuje generado por el depósito completo.

Del trabajo plástico W_k en el plano XY, no se observa mayor incremento. Su rotura R_p muestra que el mecanismo se activa, aunque es el mecanismo desviador que menos ruptura de partículas genera. Esto se debe a que la tensión lateral σ_{xx} y la tensión horizontal σ_{yy} son bastante bajas. Además, la deformación horizontal Y es menor que la deformación vertical Z durante la construcción del depósito, de forma que la acumulación del trabajo plástico de este mecanismo es menor.

Capítulo 8. COMPORTAMIENTO DEL DEPÓSITO MODELADO AL EVALUAR UN SISMO

Para evaluar el comportamiento del depósito ante un sismo, se ha optado por utilizar el registro del terremoto de 1985 medido en roca en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Quinta Región, debido a que sus aceleraciones máximas son compatibles con la zona donde se emplaza el depósito. Las características sísmicas se presentan en la Figura 8.1.



Figura 8.1. Registro de aceleración de UTFSM 1985, Valparaíso, Quinta Región.

Las variables a analizar serán el incremento de deformación volumétrica total (ε_v) , la deformación volumétrica plástica (ε_v^p) , el incremento de tensiones en los planos solicitados por el sismo, los desplazamientos producido por el sismo (co-sísmicos). Para Daouadji, se presenta adicionalmente el incremento de la rotura plástica R_p para cada mecanismo desviador y para el mecanismo isotrópico.

1. Consideraciones de la Evaluación Sísmica

1.1. Incorporación Sísmica al Depósito Construido

Para reproducir un sismo en GEFDyn, se requiere definir elementos de borde dinámico consistentes (paraxiales) que se han ubicado en el borde curvo inferior de la malla, en donde localmente se acepta que el material sea elástico.

El registro de aceleración permite calcular los campos de esfuerzo equivalentes, tomando en cuenta los retardos en el tiempo de llegada de las ondas incidentes directas y reflejadas.

1.2. Restricción a la Deformación Volumétrica Total (ε_v)

Para la evaluación del comportamiento del depósito ante una onda sísmica, ha sido necesario imponer una restricción cuando las deformaciones volumétricas crecen demasiado por dilatancia en zonas de bajo confinamiento. La razón principal es que existen algunas zonas en que el material debido a los estados tensionales debe "separarse" (por tracción), y que no necesariamente implica una potencial inestabilidad. Sin embargo, debido a que la malla debe moverse como un conjunto por tratarse de una metodología continua, y dado que la resistencia a tracción del material es baja, aumentan su tendencia a la dilatancia lo que no es realista.

Esta situación causa tres problemas:

- Solución matricial: La dilatación descontrolada de un elemento provoca que los valores numéricos de la ε_v de los otros elementos sea relativamente despreciable.
 El aumento descontrolado del volumen genera problemas de condicionamiento en la matriz de rigidez, lo que genera una matriz no invertible y sin solución.
- Elementos en la cercanía: Son "arrastrados" por el elemento dilatante, lo que no ocurre en la realidad.
- **Presentación de resultados:** Al presentar graficamente la solución mediante barra de colores según una escala, el elemento dilatante controla los resultados, ya que pareciera ser el único deformado.

En general, cuando la deformación volumétrica total es $\varepsilon_v \ge 0.05$ (dilatancia), se desestabiliza la integración del modelo constitutivo. Esto aplica tanto para Hujeux como para Daouadji. El problema numérico se resolvió incorporando una restricción de cut-off en dilatancia según la siguiente lógica:

- Estado Tensional: Las tensiones del elemento finito con ε_v ≥ 0.05 no variarán.
 Para esto, se toman las tensiones últimas como las tensiones actuales, evitando usar la función cycmoh (Ver Figura 3.8).
- **Deformación Volumétrica:** Este elemento ya no actualizará deformaciones volumétricas totales ni plásticas. Se asume que el material se deslizó (se desprendieron del modelo).
- **Trabajo Plástico:** No se actualiza trabajo plástico, por lo que se mantiene el último valor registrado como el actual.
- Otras variables: Los parámetros propios de los distintos mecanismos y dominios de comportamiento tampoco se actualizan, por lo que mantiene el último valor almacenado como el actual.

De todas formas, un sector del modelo que entra en esta condición, se interpreta como que se desprendió y sus resultados locales ya no tienen sentido físico.

1.3. Tiempos de Control

Los tiempos de control durante el sismo serán cada 10 segundos, hasta los 60 segundos. Para tiempos mayores a 60 segundos, el efecto del sismo es despreciable por tratarse de un problema sin agua (perfectamente drenado) y la condición del depósito no varía.

1.4. Incremento de Deformaciones

Para analizar el efecto sísmico en el depósito y poder comparar el comportamiento del modelo con ruptura de partículas (DAO) con el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), se presenta el incremento deformaciones debido al sismo.

Sea ε_c^t la deformación total al final de la construcción del depósito, y sea ε^t la deformación total en cualquier instante del sismo, se define el incremento de deformación co-sísmico como:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^t - \underline{\underline{\varepsilon}}^t_{\underline{c}} \tag{8.1}$$

Esta variable permitirá visualizar el efecto sísmico en el depósito en términos de deformaciones inducidas.

2. Aceleración, Espectro y Amplitud de Aceleración

Debido a las caracteristicas propias de los materiales y de la geometría del problema, las aceleraciones en cada punto del depósito variarán respecto al registro UTFSM 1985.

Es por esto que con la respuesta de aceleración se pueden reconocer zonas con potenciales inestabilidades, ya que podría existir una amplificación importante de la onda incidente.

Además de la aceleración, es necesario conocer la frecuencia natural del depósito, debido a que permite reconocer si el sistema puede entrar en resonancia con el movimiento incidente, y con esto, generar mecanismos de potenciales inestabilidades. El efecto de resonancia ocurre, cuando el contenido de frecuencia de un campo incidente se acerca a la frecuencia natural de un sistema, lo que produce oscilaciones descontroladas. Para esto, se presenta el espectro de aceleración que permite conocer los períodos de resonancia, y con ello la frecuencia natural de resonancia.

La Figura 8.2 presenta un diagrama sísmico del depósito. En el borde inferior, se ingresa como input el Registro Sísmico (UTFSM 1985). Esta onda se propaga por el terreno natural hasta la base del depósito, cuyos puntos de control son los señalados. Los otros puntos de control corresponden a un borde a la izquierda, a la derecha, y un nodo en el centro del depósito.



Figura 8.2. Diagrama sísmico del depósito y puntos de control elegidos.

Para realizar el análisis de aceleración, espectro y amplitud de aceleración, se utilizará la componente horizontal de aceleración, que es la variable de mayor interés en este análisis.

2.1. Respuesta de Aceleración

La aceleración en los distintos puntos de control, permite determinar hasta que instante el sismo causa efectos relevantes en el depósito, y además evaluar la amplificación con respecto a la onda incidente.



Figura 8.3. Registro de aceleración en la Base del depósito.

En la Figura 8.3, se observa que en la base del depósito, la aceleración máxima en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 0.18 [g], mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 0.2[g]. Ambos ocurren antes de los 5 segundos. La

razón radica en que el modelo DAO es relativamente más rígido que HUJ a deformaciones de rango pequeño (inicio del sismo).



Figura 8.4. Registro de aceleración en el Nodo lateral izquierdo del depósito.

En la Figura 8.4, se observa que en nodo lateral izquierdo, la aceleración máxima en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 0.12 [g] a los 16 [s], mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 0.18[g] a los 4 [s].


Figura 8.5. Registro de aceleración en el Nodo central del depósito.

En la Figura 8.5, se observa que en el nodo central del depósito, la aceleración máxima en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 0.32 [g] a los 3 segundos, mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 0.19[g] a los 4 segundos.



Figura 8.6. Registro de aceleración en el Nodo lateral derecho del depósito.

En la Figura 8.6, se observa que en el nodo lateral derecho del depósito, la aceleración máxima en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 0.32 [g], mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 0.28[g]. Ambos ocurren a los 4.5 segundos.

2.1.1. Análisis de resultados

En ambos modelos se destaca que el movimiento brusco del depósito ocurre antes de los primeros 10 [s]. Probablemente esto se debe a una importante desestabilización, y reorganización interna en el depósito. Después de los 10 [s], la aceleración en los puntos de control ha disminuido notoriamente, probablemente debido a la evolución de la rigidez del modelo.

En la Tabla 8.1, se presenta un resumen de la respuesta en aceleración para ambos modelos, y la variación que se produce al incorporar la ruptura de partículas.

	HUJ	DAO	Variación por Ruptura
Base del depósito	0.175 [g]	0.203 [g]	16%
Nodo lateral izquierdo	0.12 [g]	0.18 [g]	50%
Nodo central	0.315 [g]	0.19 [g]	-40%
Nodo lateral derecho	0.313 [g]	0.278 [g]	-11%

Tabla 8.1. Respuesta máxima de aceleración en los puntos de control.

La mayor aceleración en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 0.31 [g], en el centro y en el nodo lateral derecho del depósito. En estos puntos, el modelo con ruptura de partículas (DAO) presenta una disminución de un 40% y de un 11% respectivamente. La menor aceleración para el modelo HUJ es de 0.18 [g] en la base, y de 0.12 [g] en el nodo lateral izquierdo del depósito. En estos puntos, el modelo con ruptura de partículas (DAO) presena un aumento de 16% y 50% respectivamente. Por lo tanto, la ruptura de partículas tiende a generar una menor varianza en aceleraciones, ya que en las zonas de mayor amplificación, reduce aceleración, y en las zonas de menor amplificación aumenta la aceleración. Esto podría deberse a una cierta disipación de energía producida por la ruptura de partículas, ya que permite disminuir el movimiento en las zonas que son más solicitadas, a la vez que en las zonas menos solicitadas, el movimiento aumenta debido a que el material es proporcionalmente más rígido antes de que asuma la ruptura.

2.2. Espectro de Aceleración

El espectro de aceleración, presenta la pseudo-aceleración (PSA) para cada período (T) obtenida para los modelos con ruptura de partículas (DAO) y sin ruptura de partículas (HUJ). El PSA tiene relación con el esfuerzo de corte máximo, y la comparación entre ambos modelos entregaría un primer acercamiento del efecto de la ruptura de partículas en la evolución de la rigidez del material. Es necesario también verificar que no exista una diferencia notoria en el comportamiento y la frecuencia (que se relaciona con el período) entre ambos modelos, debido a que se desea realizar un análisis sísmico que conlleve una conclusión general. Esto es debido a que la frecuencia está relacionada con la energía liberada por el sistema y de existir diferencias importantes, los resultados obtenidos al comparar ambos modelos no serían extrapolables a otros sismos.



Figura 8.7. Espectro de aceleración en la Base del depósito.

En la Figura 8.7 se observa que en la base del depósito, el PSA máximo en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 1.15 [g], mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 1.18[g]. En el modelo DAO, el máximo PSA ocurren en el período de 1.3 [s] y el segundo máximo ocurre en el período de 1.9 [s], promediando un PSA de 1 [g] con una diferencia de 0.2 [g]. En el modelo HUJ se invierten los períodos de los máximos, promediando un PSA de 1 [g] con una diferencia de 0.1 [g], notando que el comportamiento del período en ambos modelos es similar. También se observa que en general las ordenadas espectrales de DAO están por sobre HUJ en todo el rango de períodos, lo que sugiere una respuesta menos amortiguada (más rígida) ante cargas sísmicas.



Figura 8.8. Espectro de aceleración en el Nodo lateral izquierdo del depósito.

En la Figura 8.8, se observa que en el nodo lateral izquierdo del depósito, el PSA máximo en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 2.3 [g] mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 1.8[g]. El máximo PSA en ambos modelos ocurre en el período de 1.85 [s] y el segundo ocurre en el períodod de 1.35 [s], y el comportamiento del período en ambos modelos es similar. También se observa que las ordenadas espectrales de DAO están por sobre HUJ, aún cuando los valores máximos que alcanza DAO son menores a los alcanzados por HUJ. Esto es válido hasta T = 3 [s], para períodos mayores las ordenadas espectrales de HUJ estás sobre las de DAO. Esto sugiere que DAO entrega una respuesta menos amortiguada para $T \le 3[s]$, y para T > 3[s] la respuesta es más amortiguada ante carga sísmica.



Figura 8.9. Espectro de aceleración en el Nodo central del depósito.

En la Figura 8.9 se observa que en el nodo central del depósito, el PSA máximo en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 2.5 [g] mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 1.6[g]. En el modelo DAO, el máximo PSA ocurre en el período de 1.3 [s] y el segundo máximo ocurre en el período de 1.7 [s], promediando un

PSA de 1.5 [g] con una diferencia de 0.2 [g]. En el modelo HUJ se invierten los períodos de los máximos, promediando un PSA de 2.4 [g] con una diferencia de 0.1 [g], notando que el comportamiento del período en ambos modelos es similar. También se observa que para T < 0.7[s] las ordenadas espectrales de DAO está por debajo de HUJ. En el rango entre 0.7[s] < T < 3[s] las ordenadas espectrales de DAO presentan una menor dispersión, y los valores máximos son menores que HUJ. Para T > 3[s], nuevamente las ordenadas espectrales de DAO está por debajo de las ordenadas espectrales de DAO está por debajo de las ordenadas espectrales de DAO está por debajo de las ordenadas espectrales de DAO está por debajo de las ordenadas espectrales, podría deberse al confinamiento alcanzado debido a la ruptura de partículas al interior del depósito.



Figura 8.10. Espectro de aceleración en el Nodo lateral derecho del depósito.

En la Figura 8.10, se observa que en el nodo lateral izquierdo del depósito, el PSA máximo en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) es de 1.97 [g], mientras que en el modelo con ruptura de partículas (DAO) es de 2.02[g]. En ambos modelos el máximo PSA ocurre en el período de 1.85 [s] y el segundo máximo ocurre en el período de 1.1 [s], notando que el comportamiento del período en ambos modelos es similar. También se observa que en general, las ordenadas espectrales de DAO son similares a las de HUJ en todo el rango de períodos, pero los valores máximos y la dispersión son menores.

2.2.1. Análisis de resultados

En ambos modelos destaca que la PSA es máxima entre los períodos de 1.3 [s] y 1.9 [s], además de presentar una forma muy similar independiente del modelo considerado.

En la Tabla 8.2 se presenta un resumen de los máximos PSA para ambos modelos y la variación que se produce al incorporar la ruptura de partículas.

	PSA Máximo		Período del Máximo		
	HUJ	DAO	HUJ	DAO	ΔPSA por fotura
Base del depósito	1.15 [g]	1.18 [g]	1.86 [s]	1.37 [s]	2%
Nodo lateral izquierdo	2.3 [g]	1.8 [g]	1.85 [s]	1.85 [s]	-22%
Nodo central	2.5 [g]	1.6 [g]	1.68 [s]	1.33 [s]	-36%
Nodo lateral derecho	1.97 [g]	2.02 [g]	1.85 [s]	1.84 [s]	3%

Tabla 8.2. Respuesta máxima de PSA en los puntos de control.

El PSA en la base y nodo lateral derecho del depósito para el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), es de 1.15 [g] y 1.97 [g] respectivamente. En estos puntos, el modelo con ruptura de partículas (DAO) presenta un leve aumento de un 2% y de un 3% respectivamente. El PSA en el nodo lateral izquierdo y nodo central del depósito para el modelo

sin ruptura de partículas (HUJ) es de 2.3 [g] y 2.5 [g] respectivamente. En estos puntos, el modelo con ruptura de partículas (DAO) presenta una disminución de 22% y 36% respectivamente. Por lo tanto, la ruptura de partículas tiende principalmente a disminuir la solicitación en corte. Esto se debe principalmente a que parte de la energía es disipada producto de la ruptura de partículas.

En relación a los períodos para los máximos PSA, se observa que existen dos períodos importantes que concentran la mayor liberacíon de energía (mayor PSA). Para los nodos laterales (izquierdo y derecho) del depósito, estos períodos coinciden, y en la base y centro del depósito estos períodos se invierten, pero la magnitud de estos PSA son similares. Esto permite aceptar que la respuesta de ambos modelos sean comparables.

3. Incremento de Deformación Volumétrica Total $\dot{\varepsilon_v}$

A continuación se presenta en la Figura 8.11 y Figura 8.12, el incremento de deformación volumétrica total acumulada $\varepsilon_v(t)$ a distintos instantes de la simulación en el depósito, tanto para el modelo con ruptura de partículas (DAO), como para el modelo sin ruptura de partículas (HUJ). Los valores positivos indican un comportamiento expansivo y los negativos indican un comportamiento contractivo.



Figura 8.11. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito de lastre.



Figura 8.12. Incremento de deformación volumétrica $\dot{\varepsilon_v}$ del depósito de lastre.

3.0.2. Análisis de resultados

En el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) se observa que en algunas zonas en la superficie del depósito el material presenta un comportamiento dilatante, y en otras zonas

presenta un comportamiento contractivo. Las zonas contractivas se presentan por dos razones. Principalmente por el asentamiento de algunas zonas del depósito debido a la deformación volumétrica, y también en potenciales inestabilidades observadas algunos taludes pero que no afectan al comportamiento global del depósito. Estas potenciales inestabilidades de taludes se observan nitidamente en el modelo sin rotura de partículas (HUJ), pero no en el modelo con rotura de partículas (DAO), debido a la mala representatividad de los parámetros calibrados con el modelo HUJ para el material a bajo confinamiento. Además, en el interior del depósito el modelo DAO sugiere la aparición de bandas de deformación de 1%, las que no se presentan en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ).

El modelo con ruptura de partículas (DAO), presenta un comportamiento contractivo en la superficie del depósito. Esta contracción se genera por una potencial inestabilidad, o bien el material se está asentando. No se observa dilatancia en superficie, por lo que no hay material desprendiéndose. Sí se observa la formación de bandas en donde la contracción aumenta.

4. Deformación Volumétrica Plástica ε_v^p

La deformación volumétrica plástica ε_v^p , que se presenta en la Figura 8.13 y Figura 8.14, permite reconocer cuantitativamente cuales son las zonas con mayor evolución de presión crítica p'_{cr} para los distintos mecanismos de ruptura, es decir, que han presentado una evolución considerable de la posición de la recta de estado crítico y por lo tanto una evolución de la granulometría en el caso del modelo DAO.



Figura 8.13. Deformación volumétrica plástica ε^p_v del depósito de lastre.



Figura 8.14. Deformación volumétrica plástica ε^p_v del depósito de lastre.

4.0.3. Análisis de resultados

En los instantes iniciales del sismo, se aprecia que el modelo con ruptura de partículas (DAO) posee una deformación volumétrica plástica ε_v^p contractiva mayor en el centro del

depósito, y en superficie esta deformación es mínima. La deformación se distribuye en forma de bandas, las que se han acentuado desde la construcción. En el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), esta deformación contractiva al interior del depósito es baja, y en la superficie existe una clara tendencia a la dilatancia del material, que ha aumentado desde la construcción. Durante el sismo, no se aprecia una variación significativa en el comportamiento de la deformación volumétrica plástica, en que el modelo DAO forma bandas de 3.5% de deformación y el modelo HUJ llega a 1.5% de deformación. En la sección siguiente, se presentan los incrementos de ε_v^p para ilustrar de mejor forma la evolución del material por efecto del sismo.

5. Incremento de Deformación Volumétrica Plástica ε_v^{p}

El incremento de deformación volumétrica plástica $\dot{\varepsilon}_v^p(t)$ que se presenta en la Figura 8.15 y Figura 8.16, permite reconocer el efecto sísmico en la plastificación del material, y por ende, la evolución de la densidad debido a la solicitación.



Figura 8.15. Incremento de Deformación volumétrica plástica $\dot{\varepsilon}_v^p(t)$ del depósito de lastre para distintos instantes.



Figura 8.16. Incremento de Deformación volumétrica plástica $\dot{\varepsilon}_v^p(t)$ del depósito de lastre para distintos instantes.

5.0.4. Análisis de resultados

En los instantes iniciales del sismo, tanto el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) como el modelo con ruptura de partículas (DAO), presentan un aumento de deformación

en la superficie del depósito. Esto se debe a las potenciales inestabilidades de los taludes, que provocan la plastificación en zonas que durante la construcción no eran tan solicitadas. El modelo con ruptura (DAO) además presenta un aumento de deformación volumétrica plástica en formación de bandas en el centro del depósito, influenciadas por la tensión de corte inducida por el movimiento. Durante el sismo, la deformación plástica en ambos modelos aumenta principalmente en la superficie de los taludes, por las potenciales inestabilidades y el bajo confinamiento. De todas formas, DAO predice incrementos del orden del 0.5% a 1% al interior del depósito, localizado en bandas de corte, mientras que HUJ no predice un aumento notorio.

6. Desplazamiento Sísmico

El desplazamiento que se presenta en la evaluación sísmica corresponde al generado únicamente por el sismo (co-sísmica), sin considerar los que han sido producidos en la etapa de construcción del depósito.

6.1. Asentamiento Vertical Cosísmico δ_z

En la Figura 8.17 y Figura 8.18, se presenta el asentamiento para el depósito modelado.



Figura 8.17. As entamiento cosísmico $\dot{\delta_z}$ [m] del depósito de las tre.



Figura 8.18. As entamiento cosísmico $\dot{\delta_z}$ [m] del depósito de las tre.

6.1.1. Análisis de resultados

En el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), parte superior del depósito se asienta, al igual que las bermas de gran ancho. Algunos taludes también experimentan un desplazamiento vertical importante. Dentro del depósito no se observa un comportamiento anómalo, pero los asentamientos llegan hasta los 20 metros.

En el modelo con ruptura de partículas (DAO), las bermas de gran ancho, y la parte superior del depósito también se asientan. También se observan mecanismo de desplazamiento de taludes, pero los isocontornos permiten señalar que no se ha alcanzado una condición de potencial inestabilidad, que sí ocurren para HUJ. Al interior del depósito se observa un desplazamiento vertical importante, lo que explica por qué en la parte superior de éste existe un mayor asentamiento (del orden del doble del que predice HUJ).

6.2. Perfil de Asentamientos Vertical

Se presenta el perfil longitudinal de los asentamientos verticales del depósito al final del sismo, como se ilustra en la Figura 8.19.



Figura 8.19. Asentamiento vertical cosísmico $\dot{\delta}_z$ [m] del depósito de lastre para t = 80 segundos.

Como se observa en la Figura 8.19, el desplazamiento vertical del depósito al final del sismo (t = 80 segundos) no presenta mayor variación con lo observado a los 60 segundos que se presenta en la Figura 8.18, de forma tal que a partir de los 60 segundos el comportamiento del depósito es principalmente elástico.



Figura 8.20. Asentamiento vertical cosísmico del Perfil 1.

Se observa en la Figura 8.20, que el asentamiento cosísmico del modelo sin ruptura de partículas (HUJ) presenta un mecanismo de desplazamiento cerca de la parte superior del talud de la izquierda. En el modelo con ruptura de partículas (DAO), también se observa un mecanismos de desplazamiento, aunque comparativamente menor. Antes de observar estos mecanismos de potenciales inestabilidades, el modelo DAO predice mayor

asentamiento (14[m]) que el modelo HUJ (5[m]), y al acercarse al pie del talud de la derecha, el asentamiento de ambos modelos tiende a un valor similar(3[m]).



Figura 8.21. Asentamiento cosísmico del Perfil 2.

Se observa en la Figura 8.21, que el asentamiento cosísmico en ambos modelos tiene un comportamiento similar en forma. El menor asentamiento se observa en el centro del perfil, y aumenta al acercarse a la parte superior de los taludes de la izquierda y derecha. El modelo DAO se asienta hasta 15[m] y el modelo HUJ 10[m], con una diferencia constante de 5 metros a lo largo del perfil. Esto podría deberse a que el sismo sigue ocasionando ruptura de partículas por debajo de este sector, pero de forma más controlada.



Figura 8.22. Asentamiento cosísmico del Perfil 3.

Se observa en la Figura 8.22 que el asentamiento vertical cosísmico del modelo con ruptura de partículas (DAO) presenta un comportamiento lineal creciente al acercarse a la parte superior del talud derecho. Cerca del pie del talud izquierdo, el asentamiento es menor. El modelo sin ruptura de partículas (HUJ) presenta un asentamiento con menor variabilidad, prediciendo un menor asentamiento en la parte superior del talud de la derecha y mayor asentamiento en la base del talud de la izquierda.

6.2.1. Análisis de resultados

Para comprender de mejor forma el mecanismo de potenciales inestabilidades, se presenta en la Figura 8.23 la trayectoria de desplazamientos en la zona que abarca el perfil longitudinal 1, ya que presenta los asentamientos más importantes. Este mismo mecanismo potenciales inestabilidades es observado en otros taludes, pero el desplazamiento es menor.



Figura 8.23. Gráfico de trayectorias. Zona representativa del Perfil 1.

El asentamiento para el perfil longitudinal 1, indica que en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), el mecanismo de desplazamiento del talud comienza a los 50 metros de

berma. A 25 metros de la berma, el asentamiento y la trayectoria de deformaciones sugiere una potencial inestabilidad. En el modelo con ruptura de partículas (DAO) el mecanismo de desplazamiento comienza a 25 metros de la berma. Sin embargo, el asentamiento y la trayectoria de deformaciones no permiten señalar que el talud sea potencialmente inestable.

6.3. Desplazamiento Horizontal Cosísmico $\dot{\delta_y}$

A continuación se presenta el desplazamiento horizontal cosísmico en la Figura 8.24 y Figura 8.25.



Figura 8.24. Desplazamiento horizontal cosísmico $\dot{\delta_y}$ [m] del depósito de lastre.



Figura 8.25. Desplazamiento horizontal cosísmico $\dot{\delta_y}$ [m] del depósito de lastre.

6.3.1. Análisis de resultados

En el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) se observa que los taludes experimentan desplazamiento horizontal, lo que complementado con la información anterior, sugieren potenciales inestabilidades. Al interior del depósito no se observan desplazamientos importantes. En el modelo con ruptura de partículas (DAO) se observa que los taludes también experimentan desplazamientos horizontales, pero el área del talud que abarca es menor. De hecho, la cantidad de taludes con potenciales inestabilidades en este modelo es menor a los indicados por HUJ, lo que sugiere que el modelo con ruptura de partículas presenta mayor resistencia en la superficie del depósito, y posiblemente existe disipación de energía en otras zonas, lo que disminuye la solicitación efectiva. Esta conclusión también fue expuesta cuando se evaluó la construcción del depósito. El efecto sísmico en la superficie del talud no genera una ruptura de partículas los suficientemente importante como para producir la aparición de nuevos mecanismos de potenciales inestabilidades. Los taludes con potenciales inestabilidades, tanto para HUJ como para DAO, son producto de los efectos inerciales que naturalmente incrementan la demanda en corte en estas zonas. Al interior del depósito, sí se observa una tendencia clara a desplazar hacia la izquierda, lo que se podría asociar al aumento de ruptura de partículas en dicho sector.

7. Variación de tensiones

La variación de tensiones, permite analizar el efecto sísmico y explorar el efecto residual en relación a la distribución de tensiones que tiene sobre el depósito. Es de esperar que la variación de tensiones del depósito sea importante durante el sismo, mientras que al término del sismo la condición estable debería ser muy similar a la inicial, a diferencia de las deformaciones cuya variación es menos drástica, pero progresiva con la carga.

7.1. Incremento de tensiones verticales σ_{zz}^{\cdot}

Como se observó al evaluar la construcción del depósito, la tensión vertical σ_{zz} es la mayor de todas. Esto implica que un incremento de ella conlleva un probable aumento en la ruptura de partículas del material, por lo que es necesario evaluar este efecto. Además, una disminución de la tensión vertical en los taludes podría implicar la generación de mecanismos de potencial inestabilidad, debido a la disminución del confinamiento y la reducción de resistencia al corte. Es importante notar que el sismo considerado sólo se introdujo al modelo en su componente horizontal, de modo que la variación de tensiones verticales se origina sólo por efectos geométricos y del comportamiento no lineal del depósito. A continuación se presenta el incremento de tensiones verticales en la Figura 8.26 y Figura 8.27:



Figura 8.26. Variación de la tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito de lastre.



Figura 8.27. Variación de la tensión vertical σ_{zz} Pa del depósito de lastre.

7.1.1. Análisis de resultados

Recordando que la tensión vertical que actúa en compresión es negativa, se observa en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ), que en los instantes iniciales existe notoriamente una disminución en el centro del depósito y un aumento alrededor de las bandas, y en zonas cercanas a la base del depósito. Al finalizar el sismo, el efecto elástico desaparece, y el efecto residual muestra una disminución de tensiones en forma de bandas anchas, principalmente en el lado izquierdo del depósito. Alrededor de estas bandas, y en el lado derecho se observa un aumento de las tensiones. Esto debido a que el depósito tratará de deslizar hacia la izquierda, influenciado por la topografía del terreno, la geometría del depósito y a las propias características del sismo.

El modelo con ruptura de partículas (DAO) en los instantes iniciales del sismo, también experimenta una disminución de tensiones en el centro del depósito, y un aumento alrededor de las bandas y en la base, pero la magnitud del aumento y la disminución es mayor. Al finalizar el sismo, se observa que también se han generado bandas de disminución de tensiones en las que dicha reducción ha sido mayor que en HUJ. Se observa también que el aumento de tensiones se da principalmente alrededor de las bandas, y la magnitud del aumento es mayor. Cabe destacar que las bandas formadas por HUJ son más anchas y cubren un área mayor que las que se forman por DAO, que son más delgadas. Además, en supeficie del depósito se observa una disminución principalmente en las zonas por donde se generan potenciales inestabilidades.

Como la mayor tensión, que es la vertical, disminuye en los taludes, la resistencia al corte disminuye y se generan potenciales inestabilidades como las presentadas en las secciones anteriores.

7.2. Variación de tensiones horizontales σ_{yy}

La tensión horizontal σ_{yy} también puede experimentar cambios que afecten la estabilidad del depósito, debido a la ruptura y perdida de confinamiento producto de la acción sísmica. A continuación se presenta el incremento de tensiones horizontales en la Figura 8.28 y Figura 8.29:



Figura 8.28. Variación de la tensión horizontal σ_{yy}^{\cdot} Pa del depósito de lastre.



Figura 8.29. Variación de la tensión horizontal σ_{yy}^{\cdot} Pa del depósito de lastre.
7.2.1. Análisis de resultados

Recordando que los valores negativos representan compresión, en el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) se observa en los instantes iniciales que en el centro del depósito la magnitud de la tensión horizontal disminuye, al igual que en la toda la superficie del depósito. Al interior del depósito , principalmente en la base del depósito y rodeando su centro, las tensiones tienden a aumentar. Al finalizar el sismo, se ha producido una disminución de la tensión horizontal en la superficie del depósito, afectando a todos los taludes, principalmente los de la izquierda. Al interior del depósito, se observan algunos incrementos preferentemente en dirección horizontal.

En el modelo con ruptura de partículas (DAO) también se observa una disminución de la tensión horizontal en la superficie del depósito. En la base del depósito existe un aumento, y en el centro del depósito, se observa la formación de bandas en las que disminuye esta tensión. Además se generan otras bandas de leve aumento en dirección horizontal. Al finalizar el sismo, la tensión horizontal ha disminuido en los taludes, y se forman bandas de reducción de esta tensión en el centro del depósito. Al interior del depósito, se ha producido también un aumento en dirección horizontal de esta tensión.

7.3. Variación de la tensión de corte τ_{yz}^{\cdot}

Como se ha podido observar, la tensión de corte τ_{yz} está altamente relacionada con el trabajo plástico generado en el plano YZ. Por lo tanto, es importante estudiar la variación y la tendencia que puede ocurrir sísmicamente. A continuación se presenta la variación de la tensión de corte en la Figura 8.30 y Figura 8.31.



Figura 8.30. Variación de la tensión de corte τ_{yz}^{\cdot} Pa del depósito de lastre.



Figura 8.31. Variación de la tensión de corte τ_{yz}^{\cdot} Pa del depósito de lastre.

7.3.1. Análisis de resultados

El signo de la tensión de corte depende de su dirección, por lo que tomando de base la etapa final en construcción, al interior del depósito, las variaciones negativas representarán un aumento en magnitud (en valor absoluto) al lado izquierdo del depósito, y una disminución en magnitud (en valor absoluto) al lado derecho del depósito. En superficie, cualquier variación representará un aumento en la magnitud (en valor absoluto), debido al bajo esfuerzo de corte al final de la construcción.

Comparando el modelo sin ruptura de partículas (HUJ) con el modelo con ruptura de partículas (DAO), se observa que ambos modelos en los primeros instantes experimentan en superficie un aumento en magnitud del corte. También se observa un aumento de la magnitud del corte principalmente en la base del depósito, lo que es natural debido a la acción sísmica. La diferencia entre ambos modelos es que dentro del depósito, se observa que en el modelo DAO se generan bandas de incremento absoluto de corte, más notorias que en HUJ, ya que se alcanzan magnitudes absolutas mayores de tensiones (positivas o negativas, dependiendo del sentido).

Al finalizar el sismo, ambos modelos presentan un aumento en magnitud del corte en la superficie y en la base del depósito. En el modelo de HUJ se observa una tendencia a formar bandas, pero en el modelo DAO se observan nítidamente la formación de éstas. Estas bandas de aumento en magnitud del corte, se presentan intercaladas y tienen dos direcciones, por lo que se cruzan. Este intercalado responde al equilibrio de fuerzas. Las dos direcciones de bandas son debidas al movimiento del depósito, ya que la dirección principal de las tensiones cambia. Esto mismo produce una tendencia a generar direcciones preferenciales para potenciales inestabilidades, debido a la rotura generada.

8. Modelo Daouadji: Incremento de la Rotura \dot{R}_p por trabajo plástico W

La rotura plástica R_p corresponde a una variable única del modelo con ruptura de partículas (DAO). Mediante esta varible se cuantificará la ruptura producida por el sismo,

y se evaluará si esta afecta la estabilidad del depósito. Debido a que el sismo sólo impone tensiones en el plano YZ (debido al borde paraxial), sólo se evaluará la rotura plástica R_p de ese mecanismo desviador, además del mecanismo isotrópico. Los mecanismos desviadores en el plano XZ y en el plano XY no producen efectos relevantes de potenciales inestabilidades en el depósito. Para analizar la generación de rotura de partículas en el material, se evaluará \dot{R}_p que se calcula con el trabajo plástico generado únicamente en la evaluación sísmica.

Por lo tanto, si $\dot{R}_p \simeq 0$ implica una importante generación de rotura durante el sismo. Si $\dot{R}_p \simeq 1$, no se genera rotura durante el sismo aún cuando el material haya experimentado rotura durante la construcción.

8.1. Incremento de Rotura $\dot{R_p}$ en el plano YZ

A continuación se presenta el incremento de rotura en el plano YZ en la Figura 8.32:



Figura 8.32. Incremento de la Rotura $\dot{R_p}$ en el plano YZ del depósito de lastre.

8.1.1. Análisis de resultados

Debido a que la ruptura de partículas no es reversible, se observa que la mayor parte de la generación de ruptura durante el sismo se produce en los primeros instantes del sismo, y a pesar de la disminución de tensiones, no existe variación en tiempos posteriores. Se observa la formación de bandas de rotura en dos direcciones, relacionadas al cambio de la dirección principal de tensiones, al igual que en la variación de tensión de corte. Cabe destacar que existe un aumento de ruptura de partículas importante en la base del lado izquierdo del depósito, que en conjunto con la mayor banda que atraviesa el depósito permiten visualizar un mecanismo de potencial inestabilidad generado por el sismo. También se observa que las zonas en donde aumenta la generación de ruptura en superficie, corresponden bien a las potenciales inestabilidades de taludes. Por lo tanto es el mecanismo desviador en el plano YZ el que produce la mayor cantidad de ruptura de partículas durante el sismo analizado.

8.2. Incremento de Rotura \dot{R}_p Isotrópica

Se presenta el incremento de rotura isotrópica en la Figura 8.33.



Figura 8.33. Incremento de la Rotura $\dot{R_p}$ Isotrópica del depósito de lastre.

8.2.1. Análisis de resultados

La mayor parte de la ruptura de partículas ocurre en los primeros instantes del sismo, y a pesar de la variación de tensiones en tiempos posteriores, no aumenta considerablemente la ruptura. En base a los resultados, se observa que la generación de rotura de partículas para el mecanismo isotrópico no es significativa durante el sismo, y tampoco se observa una tendencia en alguna dirección, si bien al igual que en el caso del corte se concentran en unas bandas. El efecto mayor se observa en el centro del depósito, y en algunos taludes que forman potenciales inestabilidades.

Capítulo 9. CONCLUSIONES

Reproducir la construcción de obras civiles tan grandes como los depósitos de lastre minero es un gran desafío. En primer lugar, es necesario determinar las características más importantes que hacen al caso en estudio algo que se escapa de lo general, como en este caso es la rotura de partículas a altas presiones. En relación a este aspecto, se debe optar por un modelo de comportamiento lo suficientemente completo como para reproducir el comportamiento específico del material, considerando a) "Estados" últimos y/o críticos que el material modelado debe alcanzar, y b) la trayectoria esfuerzo-deformación de los ensayos de laboratorio conocidos. Además, debe tenerse presente que la calibración obtenida debe ir acompañada de una secuencia constructiva consistente.

El modelo elastoplástico-cíclico de Hujeux ha sido ampliamente validado para trayectorias complejas, tanto monótonas como cíclicas, y gracias al desacople del mecanismo isotrópico y desviador, y la capacidad de considerar distintos dominios de comportamiento macroscópico, permite calibrar y analizar con mayor profundidad el comportamiento del material de un depósito de lastre minero. Para esto, es necesario ajustar distintos grupos de parámetros, debido a la evolución de la granulometría producida por la rotura de partículas. En base a los resultados experimentales observados, cada grupo se asocia a un confinamiento específico, que se relaciona con la rotura de partículas. La extensión propuesta por Daouadji para incorporar la rotura de partículas mediante trabajo plástico permite encontrar grupos de parámetros similares, aunque es evidente que no es suficiente para reproducir cabalmente lo que ha sido observado experimentalmente.

Se concluye que el esfuerzo desviador es el que genera la mayor parte de la ruptura de partículas. Al analizar los resultados del modelo de Daouadji, se observa que el mecanismo isotrópico no genera rotura de partículas importante. Como el trabajo plástico relacionado con este mecanismo es proporcional al confinamiento, esto implica que el confinamiento por si mismo no produce ruptura de partículas significantes. Por otro lado, al analizar el mecanismo desviador, cuyo trabajo plástico se relaciona principalmente con el esfuerzo desviador, se concluye que este es el mecanismo que causa la rotura de partículas, y es debido a esta razón que se forman las bandas de ruptura de partículas y la tendencia a la dilatancia. El esfuerzo desviador es originado por la diferencia entre las tensiones principales del plano desviador, y por lo tanto, si un gran confinamiento es debido a grandes diferencias de estas tensiones, el material es más propenso a sufrir rotura de partículas. Esto justifica que se relacione la rotura de partículas al gran confinamiento, siempre que se den las condiciones pertinentes.

Al comparar el modelo sin ruptura de partículas (Hujeux) y con ruptura de partículas (Daouadji) se observa una diferencia en la formación de los mecanismos de potenciales inestabilidades. El modelo de Hujeux predice una mayor cantidad de potenciales inestabilidades, en comparación al modelo de Daouadji, tanto en el caso estático como en el caso sísmico, y se explica por dos razones principalmente: la representación de la calibración y las zonas en donde se genera ruptura de partículas. El modelo de Daouadji incorpora dos parámetros adicionales al modelo de Hujeux, pero el significado físico de los otros parámetros que comparten es el mismo. Si comparamos únicamente los parámetros que comparten ambos modelos para 1 [MPa] y 2 [MPa] de confinamiento, se podría concluir que los grupos del modelo de Daouadji conllevan una mayor resistencia y menor deformación, pero al considerar los parámetros de ruptura, el modelo de Daouadji predice un comportamiento menos resistente y con mayor deformación, siempre que exista ruptura de partículas. Por lo tanto, al no existir ruptura de partículas importantes en superficie, el modelo de Daouadji predice un comportamiento más resistente del material en superficie. De todas formas el modelo de Daouadji predice mayores desplazamientos, ya que esto involucra la deformación de todo el depósito, incluyendo las zonas con alta ruptura.

Del análisis sísmico en el modelo de Daouadji se concluye que existe un aumento de la ruptura de partículas dentro del depósito, pero la mayor parte de esta ocurre durante la construcción del depósito. Estas zonas de ruptura durante el sismo están relacionadas a las obtenidas durante la construcción del depósito. Esto porque las zonas con alta ruptura al final de la construcción, tenderán a seguir generando ruptura, pero que no afecta en mayor medida la resistencia que ya es menor. Finalmente, en ambos modelos el sismo produce una variación de tensiones y deformaciones, lo que conlleva la generación de potenciales inestabilidades de algunos taludes, mayormente en el modelo de Hujeux.

La modelación realizada en esta investigación, de acuerdo al estudio bibliográfico realizado, es la primera de su tipo al incorporar la ruptura de partículas de material de estéril en la modelación de la construcción y análisis del efecto sísmico sobre un depósito de lastre minero de gran altura. Los resultados obtenidos entregan conocimientos de la diferencia que existe al modelar un depósito de lastre con un modelo de comportamiento complejo que no considera rotura de partículas (Hujeux), y su variante que sí considera rotura de partículas (Daouadji). Además, entrega una idea del efecto que produce este fenómeno al interior de un depósito, del que se tiene poco conocimiento en esta temática.

1. Propuestas de Mejoras y Trabajos a Futuro

• Desacoplamiento de la energía disipada por reorganización: El modelo implementado en esta investigación considera que toda deformación plástica provoca rotura de partículas. Esto no es necesariamente cierto, como concluyen Ovalle et al.(2013), ya que el trabajo plástico asociado a la reorganización de partículas no es despreciable, y sería interesante poder desacoplar el trabajo plástico según el origen. Para esto, es necesario desarrollar experimentos y cuantificar el trabajo efectivo de la rotura de partículas y de la reorganización de partículas, con lo que se podría modificar el modelo de Daouadji, por ejemplo, y en principio representar mucho mejor el material y la modelación del depósito.

- Definición de dominios para el trabajo plástico: El modelo implementado en esta investigación, considera los parámetros de rotura de partículas B_k y B_{iso} constantes. Es probable que para lograr reproducir de mejor forma este tipo de materiales, el modelo de Daouadji deba orientarse a diferenciar el trabajo plástico para cada dominio/radio de comportamiento. De esta forma, la capacidad de un material a resistir rotura podría variar para distintos dominios de comportamiento asociados a la movilización de la fricción.
- Evaluación de resultados: De ser posible, comparar modelaciones de depósitos reales, con datos de terreno (e.g. a escala), para estimar que tanto se ajusta la respuesta presentada al caso real.
- Modificación de la permeabilidad y análisis para niveles de agua: La rotura de material conlleva una variación en la permeabilidad, de forma anisotrópica. Incorporar una relación entre la disminución de la permeabilidad en base a, por ejemplo, el trabajo plástico desarrollado por Daouadji, permitiría realizar modelos hidromecánicos más reales y explorar esta componente en el análisis.
- Incorporación del efecto químico de la lixiviación: El proceso de lixiviación es bastante conocido por sus efectos químicos, pero incorporar este efecto a un modelo de comportamiento que considere rotura de partículas, como lo es Daouadji, parece complejo. Y más aún, difícilmente se podrá investigar este tema si no se cuentan con resultados experimentales que justifiquen y validen las proposiciones e hipótesis que se puedan formular. Por lo tanto, es necesario realizar más ensayos, y publicar sus resultados, para que los investigadores puedan utilizarlos como base para modelar este complejo efecto.
- Unificación de bases de datos: El interés por modelar el comportamiento de depósitos mineros es muy grande y pocas empresa han dado ha conocer la información que han adquirido en esta área. Poder unificar la base de datos existente permitirá reconocer de mejor forma los procesos asociados a la construcción y

evaluación sismica de depósitos, para desarrollar modelos específicos que aborden de mejor manera el caso modelado. Además, permitirá calibrar de mejor forma los modelos constitutivos disponibles hoy en día.

REFERENCIAS

Aubry, D., y Modaressi, A. (1996). Gefdyn, manuel scientifique. *École Centrale Paris: LMSS-Mat*.

Bard, E. (2013). *San-francisco waste rock dump stability review* (Tech. Rep.). Chile: Arcadis, AngloAmerican.

Bard, E., Anabalon, M., y Campana, J. (2012). Waste rock behavior at high pressures: dimensioning high waste rock dumps. *Hicher, P-. Y.(ed.) Multiscale Geomechanics: From Soil to Engineering Projects*, 86–112.

Besio, G., González, M., Sáez, E., y Verdugo, R. (2012). Uso del método de curvas homotéticas en la representación de ensayos monotónicos y cíclicos en suelos gruesos.

Cecconi, M., DeSimone, A., Tamagnini, C., y Viggiani, G. (2002). A constitutive model for granular materials with grain crushing and its application to a pyroclastic soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(15), 1531–1560.

Daouadji, A., Hicher, P.-Y., y Rahma, A. (2001). An elastoplastic model for granular materials taking into account grain breakage. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 20(1), 113–137.

de la Hoz, K. (2007). Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos. *Tesis de magíster en ciencias de la ingeniería, Universidad de Chile*.

Dorador, L. (2010). Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos gruesos.

Einav, I. (2007). Breakage mechanics part i: theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), 1274–1320.

Engquist, B., y Majda, A. (1977). Absorbing boundary conditions for numerical simulation of waves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *74*(5), 1765–1766.

Feda, J. (2002). Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behaviour. *Engineering geology*, 63(1), 93–98.

Foucault, A. (2009). Loi du comportement cyclique de hujeux pour les sols. *Documentation of Code Aster [R7. 01.23]*.

Fukumoto, T. (1992). Particle breakage characteristics of granular soils. *Soils and Foundations 30*(1), 32(1), 26–40.

Gesche, R. (2002). Metodología de la evaluacíon de parámetros de resistencia al corte de suelos granulares gruesos. *Tesis de ingeniero civil, Universidad de Chile*.

Google. (2009). Google earth.

Hardin, B. (1985). Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, *111*(10), 1177–1192.

Hujeux, J. (1985). Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. *Génie parasismique*, 287–302.

Kim, M. (1995). Etude expérimentale du comportement mécanique des matériaux granulaires sous fortes contraintes. *Châtenay-Malabry, École centrale Paris*.

Leps, T. (1970). Review of shearing strength of rockfill. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*

Marsal, R. (1967). Large-scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *93*(2), 27–43.

Marsal, R. J., Núñez, D. R., y Alberro, J. (1975). *Presas de tierra y enrocamiento* (No. 627.83 M377.). Limusa.

Modaressi, H. (1987). Modélisation numérique de la propagation des ondes dans les milieux poreux anélastiques. *Châtenay-Malabry, École centrale Paris*.

Muir-Wood, D., Russell, A., Einav, I., y Kikumoto, M. (2011). Using load distribution in granular assemblies exhibiting particle crushing on study macroscopic mechanical properties. *In 13th International Conference of the iInternational Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics.*

Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A., Kato, Y., y Murata, H. (2001). Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression. *Soils and Foundations*, *41*(1), 69–82.

Nieto, C. (2011). Mechanical behavior of rockfill materials-application to concrete face

rockfill dams. Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.

Nieto-Gamboa, C., y López-Caballero, F. (2011). Modeling the evolution of grain size distribution curves for granular assemblies. *In 13th International Conference of the international Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne Australia*.

Oldecop, L., y Alonso, E. (2001). A model for rockfill compressibility. *Géotechnique*, *51*(2), 127–139.

Ovalle, C., Bard, E., Dorador, L., De la Hoz, K., Dano, C., Campaña, J., ... Acuña, G.
(2014). Una revisión de ensayos triaxiales en suelos gruesos y enrocados. *VIII Congreso Chileno de Ingeniera Geotonica, 26 al 28 de Noviembre 2014, Santiago, Chile.*

Ovalle, C., Dano, C., y Hicher, P.-Y. (2013). Experimental data highlighting the role of surface fracture energy in quasi-static confined comminution. *International Journal of Fracture*, *182*(1), 123–130.

Ovalle, C., Frossard, E., Dano, C., Hu, W., Maiolino, S., y Hicher, P.-Y. (2014). The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. *Acta Mechanica*, 225(8), 2199–2216.

Roberts, J., y de Souza, J. (1958). The compressibility of sands. *Am. Soc. Testing Materials Proc.*, *58*, 1260–1277.

Sáez R., E. (2010). Curso geomecánica computacional: Modelo constitutivo del ecp (hujeux). Santiago, Chile.

Salim, W., y Indraratna, B. (2004). A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage. *Canadian Geotechnical Journal*, *41*(4), 657–671.

Varadarajan, A., Sharma, K., Abbas, S., y Dhawan, A. (2006). Constitutive model for rockfill materials and determination of materials constants. *International Journal of Geomechanics*, 6(4), 226–237.

APÉNDICE A. SECUENCIA CONSTRUCTIVA DEL DEPÓSITO DE LASTRE



Figura A.1. Etapa 1: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2009, secuencia 1.



Figura A.2. Etapa 2: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2009, secuencia final.



Figura A.3. Etapa 3: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2010.



Figura A.4. Etapa 4: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2011, secuencia 1.



Figura A.5. Etapa 5: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2011, secuencia final.



Figura A.6. Etapa 6: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2012, secuencia 1.



Figura A.7. Etapa 7: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2012, secuencia final.



Figura A.8. Etapa 8: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2014.



Figura A.9. Etapa 9: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2015.



Figura A.10. Etapa 10: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2016.



Figura A.11. Etapa 11: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018.



Figura A.12. Etapa 12: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018, secuencia 1.



Figura A.13. Etapa 13: Diseño proyectado del depósito de lastre al año 2018, secuencia final.



Figura A.14. Etapa 14: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.15. Etapa 15: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.16. Etapa 16: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.17. Etapa 17: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.18. Etapa 18: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.19. Etapa 19: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.20. Etapa 20: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.21. Etapa 21: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.



Figura A.22. Etapa 22: Diseño proyectado del depósito de lastre, año por definir.