

## Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
2. Revisión Bibliográfica .....	3
3. Diseño Experimental .....	16
3.1. Modelo Experimental.....	16
3.1.1 Materiales .....	16
3.1.2 Instrumentos y Sensores .....	17
3.1.3 Elementos Adicionales .....	18
3.2. Análisis Experimental.....	19
3.2.1. Características del Modelo y Definición de Variables .....	19
3.2.2. Determinación de los Ángulos de Fricción Interna.....	20
3.2.3. Análisis de Estabilidad al Deslizamiento.....	20
3.2.4. Análisis de Estabilidad al Volcamiento .....	26
3.2.5. Selección de Variables Geométricas .....	30
3.2.6. Análisis Térmico .....	30
3.2.7. Comentarios .....	33
4. Resultados Experimentales.....	34
4.1. Descripción General de un Ensayo .....	34
4.2. Resumen de Resultados .....	38
4.3. Resultados Típicos.....	44

4.3.1. Etapa Cíclica.....	49
4.3.2. Etapa de Enfriamiento Final .....	56
4.4. Ensayos Complementarios .....	57
5. Discusión.....	60
6. Conclusiones y Recomendaciones .....	66
6.1. Conclusiones.....	66
6.2. Recomendaciones.....	67
7. Bibliografía .....	69
Anexo A Descripción de Equipos y Sensores utilizados en el Montaje Experimental ....	70
A.1. Equipos .....	70
A.2. Sensores.....	72
Anexo B Gráficos Complementarios de los Resultados Experimentales .....	75
B.1. Registros Complementarios de los Ensayos.....	75

## Índice de Tablas

Tabla 1: Propiedades termomecánicas referenciales de distintas rocas, acrílico, aluminio y acero ASTM A36. ....	17
Tabla 2: Resumen de los registros para determinación de los ángulos de fricción interna. ....	20
Tabla 3: Dimensiones de la pieza de acrílico. ....	30
Tabla 4: Resumen de los resultados de los ensayos realizados con el marco de aluminio. ....	39
Tabla 5: Resumen del registro para determinación del ángulo de fricción interna entre el acrílico y el acero ASTM A36. ....	59
Tabla 6: Descripción general del equipo de adquisición de datos Agilent modelo 34972A. ....	70
Tabla 7: Descripción general de la fuente de poder Agilent modelo E3630A.....	71
Tabla 8: Descripción general de la tarjeta Multiplexer Agilent modelo E4901A.....	72
Tabla 9: Características generales del sensor LM35. ....	73
Tabla 10: Características generales del sensor termocupla K. ....	73
Tabla 11: Características generales del sensor LVDT. ....	74

## Índice de Figuras

Figura 1: Descripción del mecanismo de cuña inducido térmicamente.....	2
Figura 2: Registro de temperatura (T2) y humedad relativa (RH2) superpuesto con los desplazamientos relativos de uno de los bloques en Masada (JM10 y JM11) durante un periodo de 11 meses (Hatzor et al. 2003). .....	4
Figura 3: Modelo simplificado para el análisis del mecanismo cuña-bloque (Pastén 2013). El área sombreada corresponde a la profundidad de penetración térmica $S_d$ .....	5
Figura 4: Modelo experimental del mecanismo de cuña inducido térmicamente utilizado por Pastén (2013).....	6
Figura 5: Registro de la estación Oeste en Masada desde julio 2009 a agosto 2011 (Bakun-Mazor et al. 2013). (a) Registros originales de humedad relativa medidos cada 2 horas. (b) Temperatura y desplazamiento de las juntas (WJM) en el tiempo.....	8
Figura 6: (a) Modelo conceptual de bloque triangular. Trayectoria del punto F del bloque triangular respecto a su posición inicial bajo condiciones (a) elásticas y (b) elastoplásticas (Gunzburger et al. 2005). .....	9
Figura 7: Trayectoria puntual del modelo simplificado de Rochers de Valabres bajo condiciones elastoplásticas (Gunzburger et al. (2005).....	10
Figura 8: Configuraciones y modos de falla considerados en el modelo bidimensional de un talud de roca en Randa, Suiza. Las fallas consideradas son deslizamiento (b) y volcamiento (c) (Gischig et al. 2011a). .....	12
Figura 9: Bosquejo de la estructura interna y cinemática del talud inestable de estudio ubicado en Randa (Gischig et al. 2011b). .....	14
Figura 10: Modelo experimental del sistema bloque/cuña. ....	16
Figura 11: Estructuración general del modelo experimental.....	18

Figura 12: Fuerzas actuantes y dimensiones del sistema. Nota: $W_c$ = peso de la cuña, $W$ = peso del bloque, $T_m$ = fuerza de roce entre marco y cuña, $T_c$ = fuerza de roce entre bloque y cuña, $T$ = fuerza de roce entre marco y bloque, $N_m$ = fuerza normal del marco sobre la cuña, $N_c$ = fuerza normal del bloque sobre la cuña y $N$ = fuerza normal del marco sobre el bloque. ....	21
Figura 13: Fuerzas actuantes y dimensiones de la cuña (a) y el bloque (b). ....	21
Figura 14: Factor de seguridad al deslizamiento $FS_d$ según $L_w/L_t$ con $H/L_t = 0.5$ y $1.0$ considerando $L_t = 22.5$ cm para distintos ángulos de inclinación $\eta$ y de contacto $\beta$ calculados con la ecuación (3-10). Incluye la relación $(L_w/L_t)^*$ en la que el FS es independiente del ángulo de contacto $\beta$ . ....	24
Figura 15: $L_w/L_t$ con $L_t = 22.5$ cm según $\beta$ para $FS_d = 1.0$ para cada ángulo de inclinación $\eta$ con distintos $H/L_t$ . Bajo cada una de las curvas el sistema es estable frente al deslizamiento, sobre las curvas presenta inestabilidad. ....	25
Figura 16: Caso más desfavorable considerado para análisis del volcamiento. ....	26
Figura 17: Diagrama de fuerzas y dimensiones para análisis del volcamiento. ....	27
Figura 18: Ángulo de inclinación $\alpha_{vol}$ que induce el volcamiento del sistema según $L_w/L_t$ con $H/L_t = 0.5, 1.0, 1.5$ y $2.0$ con $L_t = 22.5$ cm. Bajo cada una de las curvas el sistema es estable frente al volcamiento, sobre las curvas presenta inestabilidad. ....	29
Figura 19: Registro de temperaturas para configuración de ampolletas: (a) 60W-variable y 100W-variable y (b) 100W-variable y 100W-variable. ....	32
Figura 20: Registro de un ensayo sobre marco de aluminio con $\eta = 0^\circ$ , $\beta = 6^\circ$ y un periodo de $t_{ciclo} = 59$ min. ....	35
Figura 21: Ventana temporal del ensayo en la Figura 20. ....	35
Figura 22: Desplazamientos plásticos durante la etapa cíclica del ensayo en la Figura 20. ....	36

Figura 23: Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico del ensayo en la Figura 20. El inserto indica el detalle de la fase de enfriamiento final, indicando los desplazamientos elásticos $de_i$ y desplazamientos plásticos $dp_i$ en un escalón $esi$ .....	37
Figura 24: Desplazamientos plásticos y elásticos de la etapa de enfriamiento final del ensayo en la Figura 20. La definición de $de_i$ y $dp_i$ se encuentra en el inserto de la Figura 23. ....	38
Figura 25: Relación entre el periodo cíclico y la amplitud de la temperatura al interior del acrílico para los 19 ensayos. ....	40
Figura 26: Registros completos de todos los ensayos realizados que se muestran en la Tabla 4. ....	41
Figura 27: Registros completos de algunos de los ensayos de la Tabla 4. El resto de los ensayos de la Tabla 4 se pueden ver en la Figura 26. ....	46
Figura 28: Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico de los ensayos en la Figura 27.....	47
Figura 29: Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico del ensayo en la Figura 27 (d) incluyendo la etapa de enfriamiento perfectamente elástico. El enfriamiento perfectamente elástico corresponde a la etapa de enfriamiento descontando los desplazamientos plásticos.....	48
Figura 30: Ventana temporal de los ensayos en la Figura 27. ....	50
Figura 31: Caídas plásticas en las etapas cíclicas de los ensayos en la Figura 27: (a) desplazamientos por ciclo y (b) desplazamientos acumulados. ....	51
Figura 32: Desplazamientos plásticos por ciclo en función de la doble amplitud del ciclo térmico del acrílico de los últimos ciclos continuos de los ensayos realizados sobre el marco de aluminio en la Tabla 4. El promedio de cada ensayo se representa con un círculo (o). La tendencia corresponde al promedio de los ensayos.....	52

Figura 33: Desplazamientos plásticos en función de la doble amplitud del ciclo térmico del acrílico de los últimos ciclos continuos de los ensayos realizados sobre el marco de aluminio en la Tabla 4. El promedio de cada ensayo se representa con un círculo (o). C/E corresponde a los registros que presentan desplazamientos plásticos en la fase de calentamiento y enfriamiento. La tendencia corresponde al promedio de los ensayos que presentan desplazamientos plásticos sólo en la fase de calentamiento. ....	53
Figura 34: Desplazamientos plásticos acumulados por ciclo según inclinación de la base: (a) $\eta=0^\circ$ , (b) $\eta=5^\circ$ y (c) $\eta=7^\circ$ . ....	55
Figura 35: Caídas elásticas $de_i$ y plásticas $dp_i$ en las etapas de enfriamiento final de los ensayos en la Figura 27. $\Delta T_{ef}$ corresponde al descenso de la temperatura al interior del acrílico durante la etapa de enfriamiento final. Se indica la curva de expansión térmica teórica del acrílico con $\alpha_{teórico} = 90 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ y para un largo inicial de 35 cm. ....	56
Figura 36: Registros completos de los ensayos complementarios en marco de acero ASTM A36. ....	58
Figura 37: Etapa cíclica completa del ensayo en la Figura 20 ( $\eta=0^\circ$ , $\beta=6^\circ$ y $t_{ciclo}=59 \text{ min}$ ). Se incluye curva sin considerar las caídas abruptas (LVDT s/d. plástico). ....	60
Figura 38: Estructuración general del modelo experimental para la estudio del coeficiente de expansión térmica del acrílico. ....	61
Figura 39: Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico en el ensayo de expansión térmica. En la etapa de estabilización de desplazamientos la magnitud de los desplazamientos elásticos de las fases de calentamiento y enfriamiento son similares. ....	62
Figura 40: Estabilidad global del sistema frente al deslizamiento y volcamiento del bloque según $L_w/L_t$ con $H/L_t = 0.5$ y $2.0$ considerando $L_t = 22.5 \text{ cm}$ para distintos ángulos de contacto $\beta$ . Las líneas continuas y segmentadas corresponden a los ángulos de inclinación $\eta$ y largos relativos de la cuña $L_w/L_t$ límites del sistema frente al volcamiento y deslizamiento, respectivamente. Las secciones rellenas representan las configuraciones estables. ....	65

Figura 41: Equipo de adquisición de datos Agilent modelo 34972A.....	70
Figura 42: Fuente de poder Agilent modelo E3630A.....	71
Figura 43: Tarjeta Multiplexer Agilent modelo 34901A.....	72
Figura 44: Sensor de temperatura LM35.....	72
Figura 45: Termocupla “K”.....	73
Figura 46: Sensor de desplazamiento LVDT.....	73
Figura 47: Desplazamientos plásticos acumulados en la etapa cíclica de todos los ensayos.....	75
Figura 48: Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico de todos los ensayos.....	76