



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELAMIENTO NUMÉRICO DE UN MECANISMO DE ACUÑAMIENTO TÉRMICAMENTE
INDUCIDO; APLICACIÓN EN EL MONTE MASADA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MANUEL ANTONIO GARCÍA HURTADO

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto Fondecyt de Iniciación N°11130363

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Manuel Antonio García Hurtado
FECHA: 06/06/2014
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE UN MECANISMO DE ACUÑAMIENTO TÉRMICAMENTE INDUCIDO; APLICACIÓN EN EL MONTE MASADA

Este trabajo estudia numéricamente el mecanismo de acuñamiento inducido térmicamente, con el fin de reproducir y analizar casos reales. Se pone especial énfasis en el estudio del Monte Masada en Israel, donde se ha medido acumulación de desplazamientos de un sistema compuesto por un bloque acuñado con fragmentos de roca cuando es sometido a ciclos de temperatura. La metodología del estudio contempla la generación de un modelo de elementos finitos, una etapa de validación analítica, comparación con resultados de un modelo físico disponible, análisis de sensibilidad de los parámetros termomecánicos de los materiales y las discontinuidades y finalmente la evaluación del mecanismo considerando tipos de roca más abundantes en la corteza terrestre. Los resultados de los modelos numéricos correlacionan favorablemente con la teoría y los modelos experimentales. Además, las tendencias del comportamiento ante los cambios en las variables constitutivas del sistema y las propiedades de los materiales evidencian que la física del mecanismo se reproduce satisfactoriamente. Se identifica que la acumulación de desplazamientos aumenta con la difusividad térmica de los materiales, disminuye con el coeficiente de roce y la distancia crítica de las discontinuidades y aumenta con el del ciclo térmico (periodo). Adicionalmente, se evidenció la importancia del ciclo estacional sobre el ciclo diario en la activación del mecanismo. Finalmente, se concluye que los resultados del modelo numérico del mecanismo para el Monte Masada aproximan con bastante precisión los desplazamientos medidos por Hatzor (2003).

“Those who trust in the Lord for help will find their strength renewed. They will rise on wings like eagles; they will run and not get weary; they will walk and not grow weak”

-Isaiah 40:31-

“Who has ideas is strong, but who has ideals is invincible”

-Anonymous-

*Life's but a walking shadow, a poor player
That struts and frets his hour upon the stage,
And then is heard no more. It is a tale
Told by an idiot, full of sound and fury,
Signifying nothing”*

-Macbeth-

A Dios, a mi familia, a mis amigos y a nuestros hermanos, los animales.

Agradecimientos

Agradezco antes que nada a mi familia; a mi Madre y a mi Padre por haber sido los mejores padres del mundo, por aguantar mis errores, por haber encauzado su aliento para hacerme cada día una mejor persona y por haberme apoyado incondicionalmente en mis decisiones. Agradezco a mis abuelos por haberme cuidado y aconsejado, por haber velado por mi bien y tranquilidad y por haber estado siempre para mí. Agradezco a todo el resto de mi familia, que aunque estén lejos, siempre viven en mi mente y corazón.

Agradezco a mis amigos, quienes en cada instante de mi vida han caminado a mi lado, escuchándome, apoyándome y tendiéndome sus manos cada vez que los he necesitado.

Agradezco a la Universidad de Chile, a sus profesores y académicos por haberme guiado en este largo camino, y muy particularmente, agradezco a mi comisión, especialmente a mi Profesor guía por la paciencia y tiempo dedicados a que este proyecto llegara a buen término.

Finalmente, agradezco a Dios por haber guiado mis pasos e iluminado mi camino, por darme buena salud e infundirme fuerzas para llegar hasta este momento.

Este trabajo de título fue financiado por el Proyecto Fondecyt de Iniciación N°11130363

Índice de Capítulos

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Metodología	3
2	Revisión Bibliográfica	5
2.1	Comportamiento Termomecánico de Macizos Rocosos	5
2.2	Propiedades Termomecánicas de Rocas	6
2.3	Propiedades Mecánicas de Discontinuidades	8
3	Mecanismo de Acuñaamiento Térmicamente Inducido	10
3.1	Modelo Analítico ($\beta = 0$)	12
3.2	Análisis de Estabilidad para el Deslizamiento	15
3.3	Variables Adimensionales	18
4	Modelamiento de Problemas Termomecánicos en Abaqus	21
4.1	Modelos Constitutivos de Interfaces	23
4.1.1	Modelos Constitutivos de Corte	23
4.1.2	Modelos Constitutivos de Interacción Normal	25
4.2	Mallado	26
4.3	Ciclo Térmico	28
5	Modelamiento Numérico del Mecanismo de Cuña	30
5.1	Comparación con Modelo Físico Analítico	30
5.1.1	Estimación de la temperatura crítica	30
5.1.2	Análisis de estabilidad estática del modelo físico	33
5.2	Verificación con Modelo Experimental	35
5.3	Modelamiento en Escala Real	41
5.3.1	Acuñaamiento en Distintos Tipos de Roca	41
5.3.2	Ciclo Diario	42

5.3.3 Ciclo Estacional	45
5.3.4 Análisis Numérico de Sensibilidad para Casos Reales	48
5.4 Caso de Estudio en el Monte Masada	51
5.4.1 Marco Geológico	51
5.4.2 Ciclos Térmicos Diarios y Estacionales	57
5.4.3 Análisis de estabilidad en el Monte Masada	61
5.4.4 Desplazamientos acumulados en el Monte Masada	63
6 Discusión	65
7 Conclusiones y Recomendaciones	71
8 Bibliografía	73

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplos de propiedades de materiales comunes	7
Tabla 2. Ejemplos de propiedades de materiales comunes	9
Tabla 3. Parámetros del análisis adimensional y su definición	18
Tabla 4. Resumen de Programas	21
Tabla 5. Modelos constitutivos de Abaqus para representar el comportamiento al corte de discontinuidades; las variables de cada ítem representan el input de cada método	23
Tabla 6. Modelos de Abaqus para representar el comportamiento normal de discontinuidades.	25
Tabla 7. Submodelos del modelo Hard para comportamiento normal de interfaces	25
Tabla 8. Desplazamiento por ciclo para los modelos numéricos y experimentales del caso	40
Tabla 9. Valores de las propiedades termomecánicas en el modelo standard	49
Tabla 11. Valores de los coeficientes adimensionales para Masada	56

Índice de Figuras

Figura 1. Aproximación del modelo real en (a) y un esquema del sistema como se consideró en los modelos numéricos en (b); las magnitudes L_t , L_w , L_b y H_t representan las dimensiones de los componentes y β , η los ángulos indicados. Para efectos de cálculos se definen los sistemas de coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) .	10
Figura 2. Gráfico de esfuerzo vs desplazamiento de una interfaz elasto-plástica mostrando una curva de 'carga' (1), la recta de comportamiento plástico (2) y una curva de 'descarga' (3) .	13
Figura 3. Tres tipos de mallado probados; la cantidad de elementos crece inversamente proporcional al tamaño de la arista del elemento.	27
Figura 4. Error numérico vs tamaño de elemento	28
Figura 5. Tiempo de ejecución vs cantidad de substeps térmicos	30
Figura 6. Resultados comparativos entre el modelo analítico y el 2D.	31
Figura 7. Resultados comparativos entre el modelo analítico y el 3D.	32
Figura 8. Gráficos de FS vs ángulos η , β	33
Figura 9. Gráfico de FS vs H_t	34
Figura 10. Gráficos de FS vs μ_1 , μ_2 y μ_3 .	34
Figura 11. Esquema del modelo experimental confeccionado en paralelo en un trabajo conjunto realizado por Antonio Hernández (2014).	35
Figura 12. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 30 [min] aproximadamente.	37
Figura 13. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 45 [min] aproximadamente.	37
Figura 14. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 60 [min] aproximadamente.	38

Figura 15. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 30 [min].	38
Figura 16. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 45 [min]	39
Figura 17. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 60 [min]	39
Figura 18. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 10 [°C]	43
Figura 19. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 50 [°C]	43
Figura 20. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 10 [°C]	44
Figura 21. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 50 [°C]	45
Figura 22. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 1 [°C]	46
Figura 23. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 30 [°C]	46
Figura 24. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 1 [°C]	47
Figura 25. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 30 [°C]	48
Figura 26. Gráficos de desplazamiento para cada variable testeada (densidad y módulo de Young)	49
Figura 27. Gráficos de desplazamiento para cada variable testeada (coeficiente de expansión y difusividad térmica)	50
Figura 28. Gráficos de desplazamiento para cada variable testeada (distancia crítica y phi)	50

Figura 29. Sección transversal del Monte Masada	52
Figura 30. Vista del Camino de la Serpiente en la ladera del Monte Masada	53
Figura 31. Vista del Camino de la Serpiente desde la parte superior del Monte Masada	53
Figura 32. Vista de la ladera oeste del Monte Masada	54
Figura 33. Vista del valle hacia el Mar Muerto desde la parte superior del Monte Masada	54
Figura 34. Camino de la Serpiente con los bloques analizados por Hatzor (2003)	55
Figura 35. Disposición de ejemplo de la ubicación de los sensores	56
Figura 36. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 10 [°C] y ciclos de un día en el Monte Masada.	57
Figura 37. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 50 [°C] y ciclos de un día en el Monte Masada.	58
Figura 38. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 1 [°C] y ciclos de un año en el Monte Masada.	59
Figura 39. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 30 [°C] y ciclos de un año en el Monte Masada.	60
Figura 40. Gráficos de FS vs ángulos η , β	61
Figura 41. Gráfico de FS vs Ht.	62
Figura 42. Gráfico de FS vs μ	63
Figura 43. Desplazamiento por ciclo diario para para el granito ($\Pi_1 = 1,7 \cdot 10^{-3}$), el basalto ($\Pi_1 = 1,1 \cdot 10^{-3}$) y la dolomita ($\Pi_1 = 2,3 \cdot 10^{-3}$).	67
Figura 44. Desplazamiento por ciclo estacional para para el granito ($\Pi_1 = 2,6 \cdot 10^{-1}$), el basalto ($\Pi_1 = 1,6 \cdot 10^{-1}$) y la dolomita ($\Pi_1 = 3,6 \cdot 10^{-1}$).	68

1 Introducción

El movimiento y estado de esfuerzos de un macizo rocoso depende de innumerables factores a corto, mediano y largo plazo. Observaciones in-situ y resultados experimentales de modelos físicos indican que los cambios de temperatura pueden causar acumulación gradual de desplazamiento en macizos rocosos fracturados (Gunzburger, 2005, Gischig, 2011, Pasten, 2012, Vargas et al., 2013, Bakun-Mazor et al., 2013, Lee et al., 2001).

Mecanismos de falla convencionales no pueden explicar el desplazamiento medido en algunos macizos rocosos, en los cuales, el desplazamiento acumulado correlaciona con los cambios de temperatura a lo largo del año. Un mecanismo termo-mecánico que explica este fenómeno es el acuñamiento inducido térmicamente, mecanismo que se activa cuando la expansión térmica, restringida por la fricción, de un bloque de roca en un plano inclinado y los fragmentos de roca que rellenan las fracturas en su contacto posterior superan el desplazamiento elástico necesario para movilizar la resistencia en la base del bloque. Posteriormente, cuando los componentes del macizo rocoso se enfrían, la contracción térmica produce un descenso de los fragmentos que conforman la cuña, generándose un nuevo acuñamiento durante el siguiente ciclo de calentamiento. Los sucesivos ciclos de calentamiento y enfriamiento llevan a una lenta acumulación de desplazamientos (la solución analítica unidimensional del problema se puede encontrar en Pasten, 2012).

Debido a que no existe una solución analítica cerrada (definida mediante ecuaciones) para para este problema, es necesario el uso de métodos numéricos para su evaluación. Algunos métodos numéricos disponibles son los métodos continuos (método de las diferencias finitas FDM, método de elementos finitos FEM y método de elementos de borde BEM), métodos discontinuos (método de elementos discretos DEM y el método de red de fracturas DFN) y formulaciones híbridas (se puede encontrar una revisión de estos métodos en Jing 1995 y Shi 1988). El modelamiento numérico del mecanismo propuesto se dificulta por la naturaleza elastoplástica de las discontinuidades, las grandes deformaciones asociadas al movimiento relativo de los

bloques en contacto y la necesidad de acoplar el comportamiento térmico y mecánico de los materiales.

Una parte central de este trabajo es el análisis del caso de estudio del Monte Masada, ubicado al Sureste de Jerusalén, Israel, en el cual se ha medido acumulación de desplazamientos en función de los ciclos diarios y estacionales de temperatura. El Monte Masada es una estructura geológica elongada situada en el margen oeste del valle de rift del Mar Muerto. El objetivo del análisis es cuantificar los desplazamientos del bloque en función de los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Este trabajo se lleva a cabo paralelamente al desarrollo de modelos físicos experimentales (Hernandez 2014), cuyos resultados se comparan con los obtenidos mediante el modelamiento numérico.

Este trabajo de título se divide en seis capítulos adicionales. En el segundo capítulo se presenta la revisión bibliográfica que da base al proyecto, junto con una revisión de propiedades termomecánicas de rocas más comunes y de discontinuidades. En el tercer capítulo se analiza de manera teórica el comportamiento del sistema y se incluyen variables adimensionales que controlan el mecanismo. El cuarto capítulo aborda el uso del software computacional Abaqus, indicando y describiendo su entorno y los parámetros utilizados para modelar el mecanismo en estudio. El quinto capítulo se enfoca en el modelamiento a escala real, presentando casos con litologías típicas, para finalizar con el caso de estudio del Monte Masada. Finalmente, el último capítulo presenta una discusión de los resultados y resume las principales conclusiones del trabajo.

1.1 Objetivos

El objetivo general del trabajo es modelar el mecanismo de acuñaamiento inducido térmicamente y determinar las propiedades geométricas y termo-mecánicas que promueven su ocurrencia. Además, determinar si el mecanismo es capaz de explicar desplazamientos permanentes observados en macizos rocosos sometidos a ciclos de temperatura.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Modelar el comportamiento termo-mecánico de un macizo rocoso discontinuo mediante métodos numéricos.
- Determinar el efecto del tiempo de exposición al cambio de temperatura y la difusividad térmica en el mecanismo.
- Determinar el comportamiento del sistema ante variaciones en los parámetros constitutivos de la roca intacta y las discontinuidades.
- Verificar los resultados del modelo numérico obtenido con los resultados experimentales.
- Verificar si el mecanismo explica los desplazamientos permanentes medidos en el caso de estudio en el monte Masada.

1.2 Metodología

La metodología puede definirse como:

- Evaluación de software disponibles para el modelamiento de problemas termo-mecánicos con discontinuidades. Se analiza la factibilidad de capturar el fenómeno con los software de elementos discretos UDEC y de elementos finitos Abaqus.

- Determinación de los parámetros adimensionales que controlan el fenómeno considerando la geometría base del problema. Se consideran las siguientes variables: ángulo de inclinación de la base, el ángulo de fricción interna de las discontinuidades, las dimensiones del sistema, el tiempo de exposición al cambio de temperatura, la amplitud térmica y las propiedades termo-mecánicas de la roca intacta.
- Generación de los modelos numéricos. Se utiliza para el trabajo el software Abaqus en su versión 6.12 con arquitectura de 64 bits. El equipo utilizado será un computador ensamblado con un procesador AMD FX-8350 de 8 núcleos.
- Estudio paramétrico del mecanismo utilizando el software y los parámetros adimensionales seleccionados. Se varían los parámetros adimensionales y se determinan los rangos que producen deformaciones permanentes del sistema.
- Aplicación a casos reales. Se estudiarán los resultados de aplicar el modelo a situaciones reales, utilizando propiedades de las rocas más típicas. Como caso especial, se aplicará el modelo al caso del Monte Masada y se compararán los resultados obtenidos con las referencias bibliográficas.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Comportamiento Termomecánico de Macizos Rocosos

El estudio de problemas geológicos desde un enfoque termomecánico es bastante abundante. Diversos autores han trabajado con macizos y formaciones mediante el uso de técnicas de modelamiento numérico, estudios físicos y estudios climáticos.

Un ejemplo de un problema termo-mecánico es el de un bloque dispuesto sobre una superficie inclinada sometido a ciclos de calentamiento y enfriamiento (Gunzburger et al., 2005). En dicho estudio, se utiliza UDEC para cuantificar el deslizamiento del bloque y explicar posibles efectos sobre remociones en masa en un talud en roca en Rochers de Valabre, Francia.

Otro estudio que analiza el efecto de la variación térmica en superficie sobre las deformaciones a profundidades mayores a la distancia de penetración de la radiación solar es el trabajo de Gischig et al. (2011). Este estudio utiliza una geometría y propiedades basadas en un talud de roca sobre la villa Randa en la zona sur de Suiza. El modelamiento de la zona se llevó a cabo mediante UDEC (Cundall 1980 y Cundall and Hart, 1992) y concluyó que los esfuerzos termo-elásticos pueden propagarse a grandes profundidades, más allá de la capa de penetración térmica.

Por otro lado, Bakun-Mazor et al. (2013) modelaron el comportamiento de las discontinuidades en el monte Masada en Israel utilizando el método DDA (Discontinuous Deformation Analysis). El trabajo se concentra en la acumulación de desplazamientos irreversibles producto de la dilatación y contracción térmica de las componentes del sistema, pero no considera el acoplamiento termo-mecánico en el modelamiento.

En la misma zona, Hatzor (2003) realizó un análisis sobre los factores que influyen en el movimiento de los bloques. Para estos efectos, dispuso sensores tanto de temperatura como de humedad y desplazamiento en diversos bloques en los cuales se había detectado movimiento. Después de realizar simulaciones numéricas dinámicas del

sistema concluyó que la explicación más probable del movimiento de los bloques eran las deformaciones causadas por cambios de temperatura y de humedad ambiental.

Otros casos de modelamiento de situaciones similares se pueden encontrar en los trabajos de Vicko et al., (2009), Moreno et al., (2007) y Watson et al (2004).

2.2 Propiedades Termomecánicas de Rocas

La transferencia de calor en un macizo rocoso expuesto a un cambio de temperatura ambiental se produce por convección a través de las discontinuidades y conducción a través de la roca intacta. El volumen de roca comprometido en el cambio térmico, conocido como capa térmicamente activa, depende del tiempo de exposición al cambio térmico en la superficie de la roca y del coeficiente de difusión térmica del material (Carslaw, 1986). Por lo tanto, un cambio de temperatura diario produce una capa térmicamente activa menor que aquella que produce un cambio de temperatura estacional.

Las propiedades termomecánicas consideradas en este trabajo son las siguientes:

- Densidad (ρ [kg/m³]), que corresponde a la masa por unidad de volumen que posee un cuerpo.
- Módulo de Young (E [Pa]), que corresponde a la razón entre el esfuerzo que se aplica sobre un sólido y la deformación que éste experimenta producto de la misma. Mientras mayor sea este valor, más rígido es el cuerpo.
- Razón de Poisson (ν [-]), que es la razón entre la deformación vertical y horizontal que sufre un cuerpo. Analíticamente, para el caso elástico, puede estimarse a partir de la razón entre la velocidad de las ondas sísmicas S y P.
- Calor específico (C_p [J/kg°C]), que corresponde a la cantidad de calor que se le debe suministrar a una unidad de masa de un cuerpo para elevar su temperatura en un grado.

- Conductividad térmica (k_t [W m⁻¹ °C⁻¹]), que corresponde a la capacidad que posee un material de transmitir calor en función del gradiente térmico al cual es sometido.
- Coeficiente de expansión (α [1/°C]), que corresponde al cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo cambia de temperatura.
- Difusividad Térmica (D_t [m²/s]), que corresponde a la velocidad con que un material reacciona ante un cambio de temperatura, expresando de esta forma la capacidad de difundir la energía calórica. La difusividad térmica puede expresarse en función de la conductividad térmica, la densidad y el calor específico mediante la relación $D_t = k_t / \rho \cdot C_p$.

Tabla 1. Ejemplos de propiedades de materiales comunes

	Densidad [kg m ⁻³]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson [-]	Calor específico [J kg ⁻¹ °C ⁻¹]	Conductividad Térmica [W m ⁻¹ °C ⁻¹]	Difusividad Térmica [m ² s ⁻¹]	Coeficiente de Expansión [°C ⁻¹]
Símbolo	ρ	E	ν	C_p	k_t	D_t	α
Granito	2650	50	0,2	900	3	1,26·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶
Basalto	2850	70	0,2	900	2	7,8·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁶
Dolomita	2550	50	0,2	900	4	1,74·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶
PMMA	1180	2,5	0,4	1500	0,2	7,41·10 ⁻⁸	7,5·10 ⁻⁵
Acero	2700	70	0,3	900	240	9,88·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁵
Arcillolita	2310	20	0,25	-	-	-	-
Gneiss	2650	40	0,2	750	3	1,51·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶
Travertino	2661	50,33	0,2	892	1,75	7,37·10 ⁻⁷	4,8·10 ⁻⁶

Nota: Datos compilados de Pastén (2013), Vicko et al (2009), Vargas et al (2012), Brcek et al (2011), MIT Material Database

En la Tabla 1 se pueden apreciar algunos ejemplos de propiedades termomecánicas de rocas, incluyendo las utilizadas en este estudio. Una recopilación más completa puede encontrarse en el Anexo 1.

Puede observarse que, de las tres rocas usadas en los estudios en escala real (granito, basalto y dolomita), la dolomita presenta la mayor difusividad térmica, por lo que es esperable que ante un mismo tiempo de exposición, alcance una mayor distribución de calor en su volumen. Además, la expansión de la dolomita es la mayor de las tres rocas, por lo que ante un mismo aumento de temperatura, debería alcanzar una mayor expansión volumétrica. Esto hace que la dolomita sea el candidato más idóneo para lograr producir desplazamiento plástico ante condiciones ambientales similares.

2.3 Propiedades Mecánicas de Discontinuidades

Análogamente a la parte anterior, las propiedades de las discontinuidades son importantes, ya que determinan el comportamiento de las interfaces en la interacción de los componentes del mecanismo. Las propiedades consideradas en este trabajo son las siguientes:

- Fricción interna [$^{\circ}$], que corresponde al grado de rozamiento entre partículas del material, lo que confiere fricción a las superficies del mismo.
- Rigidez Tangencial [Pa/m], que corresponde a la elasticidad entre las partículas ante esfuerzos de cizalle; es una medida de la deformación de dos superficies ante una tensión de corte.
- Distancia Crítica [m], que corresponde a la distancia máxima a la que pueden separarse dos puntos en contacto en las caras opuestas de una discontinuidad antes de que se produzca desplazamiento relativo entre ellas.

En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de propiedades termomecánicas de discontinuidades, incluyendo las utilizadas en este estudio. Una recopilación más completa puede encontrarse en el Anexo 2.

Tabla 2. Ejemplos de propiedades de materiales comunes

	Fricción Interna [°]
Símbolo	ϕ
Granito	31
Basalto	31
Dolomita	26
PMMA	17
Acero	22
Limolita	27-31
Gneiss	26-29
Mármol	31,8

Nota: Referencias recopiladas Pastén (2013), Barton (1976), Kwon et al (2010), MIT Material Database

De igual manera que para las propiedades de roca intacta, para las discontinuidades se confeccionó una tabla que caracteriza a las litologías más típicas la cual se encuentra en el Anexo 2. Se puede ver que generalmente, los valores de fricción de las rocas carbonáticas son ligeramente menores que el granito y el basalto, los que oscilan en un rango similar.

3 Mecanismo de Acuñaamiento Térmicamente Inducido

La disposición de fragmentos de roca tras el bloque en el caso de estudio en el Monte Masada (Figura 1a) se asemeja a una cuña. Para efectos de modelamiento, se idealizarán los fragmentos como un prisma triangular truncado, como se muestra en la Figura 1b.

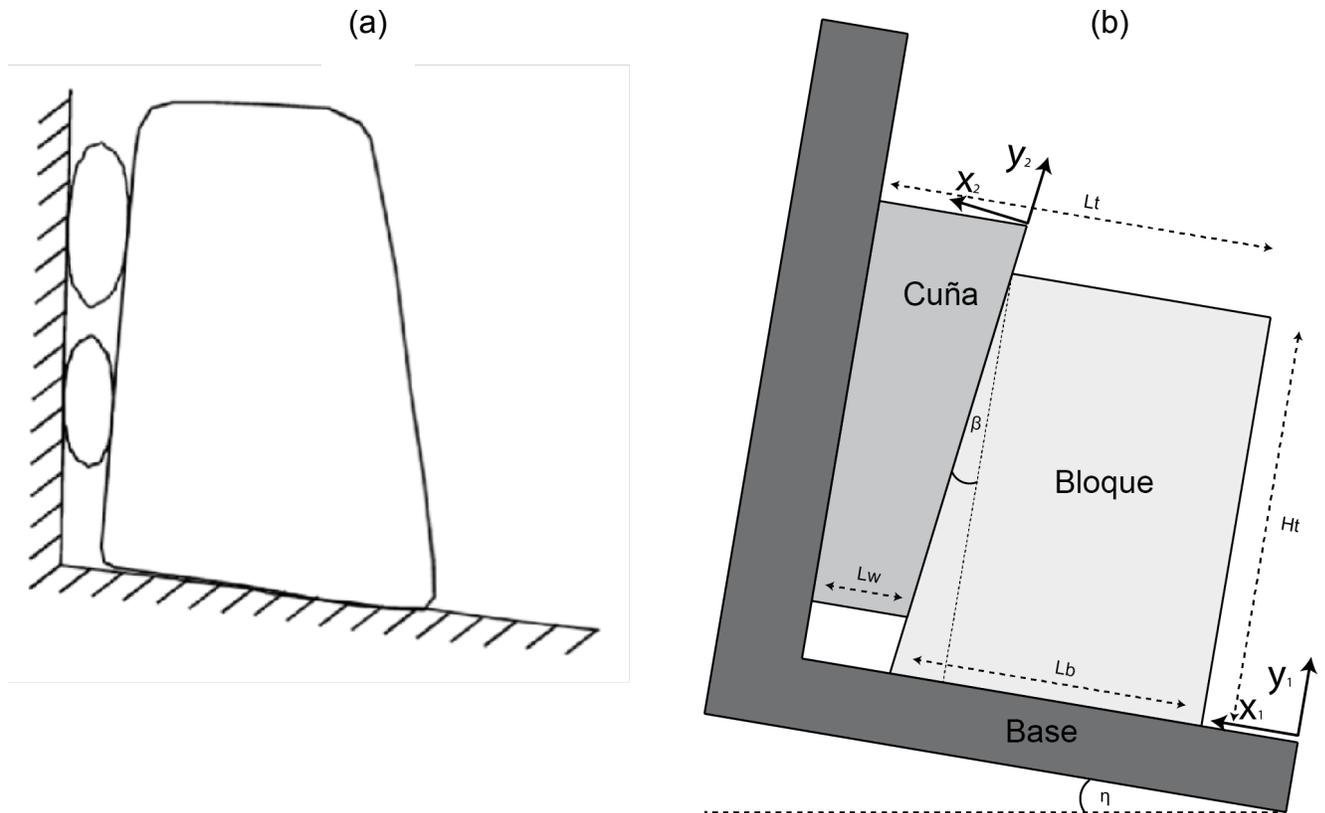


Figura 1. Aproximación del modelo real en (a) y un esquema del sistema como se consideró en los modelos numéricos en (b); las magnitudes L_t , L_w , L_b y H_t representan las dimensiones de los componentes y β , η los ángulos indicados. Para efectos de cálculos se definen los sistemas de coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) .

El sistema descrito puede estar expuesto a cambios de temperatura como resultado directo de la radiación solar, convección a través de las discontinuidades y conducción a través de la roca intacta. Este aporte de energía calórica causa que la roca cambie de volumen hasta una cierta profundidad, la cual depende de su difusividad térmica y del

tiempo de exposición al cambio de temperatura. Si la expansión volumétrica es restringida en alguna dirección, se generan esfuerzos al interior de la roca.

Dado que el bloque está restringido mecánicamente por la base y por la cuña en la vertical y por la cuña en la horizontal, la fuerza total resultante sobre este elemento siempre será mayor en la dirección opuesta a la cuña.

Ahora, en el contacto del bloque con la base, la expansión térmica está restringida por la fricción, por lo tanto, para que se produzca desplazamiento plástico, se requiere que el desplazamiento total exceda al desplazamiento crítico de la interfaz.

Un ciclo de temperatura sobre el sistema bloque/cuña consta de dos fases:

- Calentamiento: En la primera fase del ciclo, la temperatura del bloque y de la cuña aumentan, dilatándose ambos y generando un esfuerzo lo que se traduce en la generación de esfuerzos en el contacto de la cara inferior del bloque con la cara superior de la base.
- Enfriamiento: Posterior al proceso de calentamiento, la temperatura impuesta vuelve a ser como en el estado inicial. En esta fase, un porcentaje del desplazamiento que afectó al bloque y a la cuña es restituido, generándose un esfuerzo en sentido contrario a la fase de calentamiento y generando desplazamiento.

La clave para que ocurra el proceso de acuñamiento está en la fase de calentamiento; en esta etapa, el movimiento relativo entre la cara inferior del bloque y la base puede ser de dos tipos: elástico (restitutivo) o plástico (no restitutivo). Para que el desplazamiento plástico ocurra, se necesita que la temperatura máxima del ciclo térmico logre generar una dilatación suficiente como para vencer la distancia crítica en el contacto del bloque con la base. En este trabajo, este fenómeno se pretende capturar con el uso de un modelo constitutivo elástico-perfectamente plástico para la interfaz, que se caracteriza por un coeficiente de fricción y un desplazamiento crítico para alcanzar la resistencia máxima (más detalles se pueden encontrar en la sección 3.1).

A continuación se presenta un modelo analítico para determinar la máxima temperatura a la que se puede someter un sistema bloque/cuña antes de que se alcancen desplazamientos plásticos en la base del bloque.

3.1 Modelo Analítico ($\beta = 0$)

Sea un bloque, de volumen V [m^3] y peso específico γ [kg/m^2s^2] conocidos, ubicado sobre un plano inclinado en un ángulo η [$^\circ$]. El bloque y la superficie constituyen una discontinuidad que posee un ángulo de fricción interna ϕ [$^\circ$] y una rigidez tangencial k_t [N/m^3]. Estudiando un diagrama de cuerpo libre sobre el bloque, se tiene:

$$V\gamma \sin(\eta) - V\gamma \cos(\eta) \tan(\phi) + F = 0 \quad (1)$$

Donde F representa la fuerza adicional que habría que aplicar sobre el bloque en la dirección del plano inclinado para que deslice. Para el caso particular de un plano horizontal, se tiene que la fuerza es

$$F = V\rho g \tan(\phi) \quad (2)$$

Ahora, se sabe que la rigidez tangencial de la interfaz es:

$$k_t = \frac{F}{\delta_{\text{Critico}}} \quad (3)$$

Por lo que, el desplazamiento crítico de la interfaz δ_{crit} , es decir, la distancia máxima de extensión entre dos puntos en contacto antes que se produzca desplazamiento relativo, es:

$$\delta_{Critico} = \frac{F}{k_t} \quad (4)$$

En la Figura 2 se puede ver un esquema de una interfaz elasto-plástica, en donde (1) corresponde a la rama elástica, (2) corresponde al desplazamiento una vez que se sobrepasa el desplazamiento crítico (zona plástica) y (3) representa la 'curva de descarga' cuando el desplazamiento cambia de sentido. En este ejemplo, el desplazamiento plástico total es $D_2 - \delta_{crit}$.

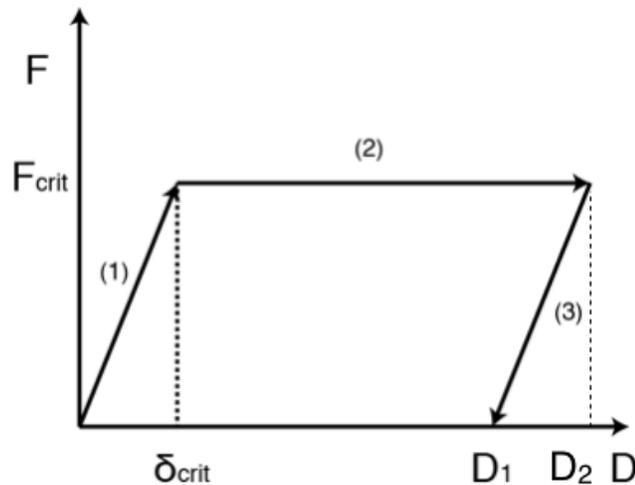


Figura 2. Gráfico de esfuerzo vs desplazamiento de una interfaz elasto-plástica mostrando una curva de 'carga' (1), la recta de comportamiento plástico (2) y una curva de 'descarga' (3) .

Considerando que la cuña tras el bloque es sometida a un cambio de temperatura, su expansión sería restringida por la presencia del bloque. Planteando las ecuaciones de

compatibilidad de desplazamiento en la dirección longitudinal del bloque, el desplazamiento total de la interfaz bajo el bloque δ [m] es:

$$\delta = \delta_T - \delta_\sigma \quad (5)$$

Donde:

δ_T = Desplazamiento térmico sin restricción [m]

δ_σ = Desplazamiento restringido mecánicamente por el bloque [m]

El desplazamiento térmico sin restricción está determinado por el coeficiente de expansión térmica del material α [1/°C], la variación de temperatura en sus caras laterales ΔT [°C] y la distancia de penetración térmica (skin depth).

$$\delta_T = \alpha \Delta T d(t_{\text{exp}}) \quad (6)$$

Donde la distancia de penetración depende del tiempo de exposición t [s] y el tiempo de exposición para obtener una temperatura homogénea del elemento t_{hom} [s].

$$d(t_{\text{exp}}) = \begin{cases} 2L_w & t > t_{\text{hom}} \\ 4SD & t < t_{\text{hom}} \end{cases} \quad (7)$$

Para ajustar el valor $d(t_{\text{exp}})$ se buscó un ponderador que ajusta una distribución teórica de temperatura con una modelada numéricamente para la difusión térmica de un bloque simple sometido a un cambio de temperatura en sus bordes.

De la ecuación (7), el valor de la penetración térmica se calcula según la siguiente fórmula:

$$S_d = \begin{cases} \sqrt{0.5 D_T t_{\text{exp}}} & t_{\text{exp}} < 0.5 L^2 / D_T \\ L / 2 & t_{\text{exp}} \geq 0.5 L^2 / D_T \end{cases} \quad (8)$$

Donde L [m] es el largo total del bloque y D_T [m²/s] es el coeficiente de difusión del material.

Por otro lado, se sabe que la ley de Hook relaciona el esfuerzo y la deformación del bloque; en tal caso, el desplazamiento restringido mecánicamente es:

$$\delta_\sigma = \frac{FL_w}{AE} \quad (9)$$

Donde:

F = Fuerza ejercida por el bloque sobre la cuña [N]

L_w = Largo de la cuña [m]

A = Área de contacto entre el bloque y la cuña [m²]

E = Módulo de elasticidad de la cuña [Pa]

Finamente, reemplazando la fuerza de la ecuación (1) y combinando las ecuaciones (5) a la (9), se obtiene la temperatura crítica que al ser aplicada en las caras de la cuña provoca dilatación e induce un desplazamiento plástico en la interfaz del bloque con la base:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha d(t_{\text{exp}})} \left[\delta_c + \frac{FL_w}{AE} \right] \quad (10)$$

Esta ecuación se utilizará en el capítulo 4 para comparar resultados numéricos.

3.2 Análisis de Estabilidad para el Deslizamiento

Para el análisis de estabilidad, se plantean las ecuaciones de fuerza totales del sistema para un mecanismo como el de la Figura 1b.

Sea:

W_B : Peso del bloque [kgm/s²]

W_W : Peso de la cuña [kgm/s²]

μ_1 : Coeficiente de roce entre el bloque y la base (igual a μ_3) [-]

μ_2 : Coeficiente de roce entre el bloque y la cuña [-]

μ_3 : Coeficiente de roce entre el la cuña y la base (igual a μ_1) [-]

β : Ángulo del contacto entre el bloque y la cuña [°]

η : Ángulo de inclinación de la base [°]

N_B : Normal entre el bloque y la base [kgm/s²]

N_{B-W} : Normal entre el bloque y la cuña [kgm/s²]

N_{BS} : Normal entre la cuña y la base [kgm/s²]

F_S : Factor de seguridad [-]

Primero se impone que la suma de fuerzas en cada eje del sistema de coordenadas x_1 , y_1 sea igual a 0:

$$W_B \sin \eta - N_B \mu_1 + N_{W-B} \cos \beta - N_{W-B} \mu_2 \sin \beta = 0 \quad (11)$$

$$N_B - N_{W-B} \cos \beta - N_{B-W} \sin \beta - W_B \cos \eta = 0 \quad (12)$$

Ahora, reduciendo la resistencia en el contacto entre la base y el bloque:

$$N_B \mu_1 = \frac{N_B \mu_1}{F_S} \quad (13)$$

Reemplazando (13) en (12) y despejando F_S :

$$FS = \frac{N_B \mu_1}{W_W \sin \eta + N_{W-B} \cos \beta - N_{W-B} \mu_2 \sin \beta} \quad (14)$$

Despejando N_B de (12):

$$N_B = N_{B-W} \mu_2 \cos \beta + N_{B-W} \sin \beta + W_B \cos \eta \quad (15)$$

Y reemplazando (16) en (15):

$$FS = \frac{\mu_1 (N_{B-W} \mu_2 \cos \beta + N_{B-W} \sin \beta + W_B \cos \eta)}{W_W \sin \eta + N_{W-B} \cos \beta - N_{W-B} \mu_2 \sin \beta} \quad (16)$$

A continuación, se impone que la suma de fuerzas sobre cada eje del sistema x_2, y_2 sea igual a 0:

$$W_W \cos(\eta + \beta) - N_{BS} \mu_3 \cos \beta - N_{BS} \sin \beta - N_{B-W} \mu_2 = 0 \quad (17)$$

$$N_{B-W} - N_{BS} \cos \beta + N_{BS} \mu_3 \sin \beta - W_W \sin(\eta + \beta) \quad (18)$$

Luego, se despeja N_{BS} de (18):

$$N_{BS} = \frac{W_W \cos(\eta + \beta) - N_{B-W} \mu_2 \cos \beta}{\mu_3 \cos \beta - \sin \beta} \quad (19)$$

Luego, se despeja N_{BS} de (19):

$$N_{BS} = \frac{W_w \sin(\eta + \beta) - N_{BW}}{\mu_3 \sin \beta - \cos \beta} \quad (20)$$

Se iguala (20) con (21) y se despeja N_{B-W} :

$$N_{B-W} = \frac{W_w \left[\sin(\eta + \beta) - \left(\frac{\mu_3 \sin \beta - \cos \beta}{\mu_3 \cos \beta - \sin \beta} \right) \cos(\eta + \beta) \right]}{1 - \mu_2 \left(\frac{\mu_3 \sin \beta - \cos \beta}{\mu_3 \cos \beta - \sin \beta} \right)} \quad (21)$$

Finalmente, reemplazando (22) en (17), el factor de seguridad para el bloque está dado por la ecuación (18). Se utilizará esta ecuación para el análisis de sensibilidad en el capítulo 5.

3.3 Variables Adimensionales

Para estandarizar las variables del problema, se genera un set de variables adimensionales que ayudan a escalar el mecanismo estudiado a cualquier situación real. Los parámetros considerados y sus respectivas unidades se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del análisis adimensional y su definición

Parámetro	Símbolo	Unidad	Descripción
Altura	H_t	[m]	La altura del bloque y de la cuña.
Amplitud Térmica	ΔT	[°C]	La amplitud peak to peak de la temperatura.
Difusión Térmica	D_t	[m ² /s]	La difusividad térmica en el bloque y la cuña
Elasticidad	E	[Pa]	El Módulo de Young
Expansión Térmica	α	[1/°C]	La expansión sufrida ante un cambio de temperatura
Largo de la Cuña	L_w	[m]	El ancho en la base de la cuña
Largo Total	L_t	[m]	El ancho del bloque y la base medido en el contacto con la base
Periodo	t_{exp}	[s]	El periodo de la temperatura modelada sinusoidalmente
Peso específico	γ	[N/m ³]	El peso específico del bloque y la cuña

Con base en estos parámetros se obtiene el total de variables dimensionales que corresponden a la distancia (D [m]), la temperatura (T [°C]), el tiempo (t [s]) y la fuerza (F [N]); luego, con esta información se generan los coeficientes adimensionales para el modelo.

Razón de Penetración Térmica:
$$\Pi_1 = \frac{D_t t_{exp}}{L_t^2} \quad (22)$$

Esbeltez:
$$\Pi_2 = \frac{L_t}{H} \quad (23)$$

Relación de Aspecto: $\Pi_3 = \frac{L_w}{L_t}$ (24)

Razón de expansión térmica y desplazamiento crítico: $\Pi_4 = \frac{\alpha \Delta T L_t}{\delta_c}$ (25)

Razón de rigidez roca-discontinuidad: $\Pi_5 = \frac{E \delta_c}{\gamma L_t^2}$ (26)

Factor de Seguridad al Deslizamiento: $\Pi_6 = \frac{\mu}{\tan \eta}$ (27)

4 Modelamiento de Problemas Termomecánicos en Abaqus

La primera etapa en el desarrollo del trabajo consiste en la búsqueda y elección de un software para el modelamiento del problema a estudiar. Dadas las características del modelo, se requiere que el programa utilizado pueda expresar tanto el estado de esfuerzo y deformación, como las influencias sobre el mismo de las variaciones de temperatura.

Se revisaron los principales paquetes de software disponibles y se confeccionó un resumen con los resultados. En la Tabla 4 se pueden ver comparativamente las alternativas más comunes.

Tabla 4. Resumen de Programas

Software	Tipo	Discontinuidades	Agua	Cargas Estáticas	Temp.	Análisis
UDEC	DEM	Kn, Ks, Jrc	Si se puede	Puntuales, superf.	Si (Conduccion, esfuerzos por cambios, CB, radiacion, flujo)	Dinamicos
3DEC	DEM	Kn, Ks, Jrc	Si se puede	Puntuales, superf.	Si (Conduccion, esfuerzos por cambios, CB, radiacion, flujo)	Dinamicos
FLAC	FDM	Kn, Ks, Jrc	Nivel freatico, agua subterranea	Cargas y rellenos	Si (Conduccion, esfuerzos por cambios)	Dinamicos
FLAC3D	FDM	Kn, Ks, Jrc	Nivel freatico, agua subterranea	Cargas y rellenos	Si (Conduccion, esfuerzos por cambios)	Dinamicos
ABAQUS	FEM	Kn, Ks, Jrc	Presion de poros, nivel freatico	Si, puntuales y ciclicas	Si (CB, T ciclica)	Dinamicos
COMSOL	FEM	Kn, Ks, Jrc	Tabla de agua	Si se puede	Si (Distribucion y tiempo)	Dinamicos
PHASE	FEM	Joints (Kn, Ks, Jrc), excavaciones	Tabla de agua, nivel piezometrico, descarga	Puntuales, superf. y sismicas	No se puede	Estaticos
EXAMINE2D	BEM	Joints (Kn, Ks), excavaciones	No se puede	Si se puede	No se puede	Estaticos
SLIDE	FEM	N/D	Tabla de agua, nivel piezometrico	Puntuales, superf. y sismicas	No se puede	Estaticos
ANSYS	FEM	N/D	Tabla de agua	Puntuales, superf. y sismicas	Si se puede	Dinamicos
PFC	DEM	Kn, Ks	N/D	Mecanica, hidraulica	Si se puede	Dinamicos

Nota:

N/D: No disponible la opción en el programa

CB: Condiciones de borde, el programa permite imponerlas

DEM: Método de Elementos Discretos (Discrete Element Method)

FEM: Método de Elementos Finitos (Finite element Method)

k_n : Rigidez Normal

k_s : Rigidez Tangencial

JRC: Joint Roughness Coefficient

En primera instancia se optó por el software UDEC, pero sus características para definir las condiciones de borde térmicas presentaban dificultades al imponer una temperatura, permitiendo sólo definir un flujo superficial. Dado lo anterior y por sus características de flexibilidad, versatilidad y gran número de opciones, se optó por el paquete comercial Abaqus 6.12, el cual logra modelar exitosamente el fenómeno a estudiar.

En la creación de un modelo hay que definir los elementos que lo componen y sus interacciones. En este trabajo, las componentes que interactúan son la base, el bloque y la cuña. Las dimensiones que poseen estas tres partes varían, siendo en algunas instancias las variables de control y en otras, parámetros dependientes del caso de estudio. Se utilizarán 2 sets de materiales distintos en las simulaciones; por un lado, la reproducción de tendencias y del modelo experimental considerará PMMA (Polimetilmetacrilato) y Acero, mientras que el modelo de casos reales, considerará rocas graníticas, dolomíticas y basálticas. Lo segundo es definir las interacciones entre las componentes, que son los contactos entre ellos. Estas interacciones se modelan mediante un mecanismo de interfaces y su definición en Abaqus permite controlar el tipo de movimiento, conductividad térmica y esfuerzo relativo entre ellas ante cambios en la distribución de esfuerzos del sistema, entre otros.

4.1 Modelos Constitutivos de Interfaces

A continuación se presentan las principales características de modelos constitutivos de corte e interacción normal disponibles en el software Abaqus v6.12.

4.1.1 Modelos Constitutivos de Corte

La interfaz elastoplástica considera una separación entre un punto ubicado en uno de los cuerpos y el punto en contacto con el mismo en el otro cuerpo; entre estos dos puntos, a medida que se genera esfuerzo de corte, aumenta la separación en función de la rigidez que posea la interfaz. Esta situación mantiene un patrón lineal hasta que se vence la fuerza de roce necesaria para que las superficies deslicen, momento en el cual el esfuerzo entre los dos puntos pasa a ser constante. En la Figura 2, entre 0 y δ_{crit} se produce movimiento elástico, de δ_{crit} en adelante, plástico; F_{crit} representa la fuerza de roce máxima que admite el contacto y δ_{crit} la distancia máxima de separación antes de que el movimiento sea plástico.

Abaqus presenta diversas opciones para definir el comportamiento al corte de una discontinuidad; en la Tabla 5 se puede apreciar un diagrama con sus diferentes opciones.

Tabla 5. Modelos constitutivos de Abaqus para representar el comportamiento al corte de discontinuidades; las variables de cada ítem representan el input de cada método

Modelo	Símbolo	Variable
Penalty	μ_e	Coefficiente de roce estático.
	δ_c	Desplazamiento crítico, corresponde a la magnitud del desplazamiento después de la cual el movimiento pasa de ser elástico a plástico.
	τ_c	Resistencia al corte de la discontinuidad
Lagrange	μ_e	Coefficiente de roce estático.
	τ_c	Resistencia al corte de la discontinuidad
Static-Kinetic Exponential Decay	μ_e	Coefficiente de roce estático.
	μ_d	Coefficiente de roce dinámico.
	δ_c	Desplazamiento crítico, corresponde a la magnitud del desplazamiento después de la cual el movimiento pasa de ser elástico a plástico.
Hard	-	No aplica (μ equivalente a ∞)
Frictionless	-	No aplica (μ equivalente a 0)

El modelo “Penalty” utiliza los coeficientes de rigidez para determinar el movimiento relativo entre las superficies en función de un esfuerzo crítico τ_c . Mientras el esfuerzo de cizalle relativo entre las superficies τ sea menor a este valor crítico ($\tau < \tau_c$), el deslizamiento es elástico. Los parámetros de entrada utilizados por este modelo son el coeficiente de roce estático entre las superficies μ_e y la distancia crítica δ_c o esfuerzo crítico τ_c .

Adicionalmente, puede definirse un modelo Static-Kinetic que utiliza los mismos parámetros y método de resolución, con la diferencia que permite especificar un coeficiente de roce estático y otro dinámico.

El modelo de los multiplicadores de Lagrange utiliza una mecánica similar al modelo “Penalty”, con la diferencia de que este último previene totalmente el movimiento entre las dos superficies cuando el esfuerzo de corte aplicado entre las superficies no supera al esfuerzo crítico ($\tau < \tau_c$). Junto con esto, el modelo de Lagrange agrega más grados de libertad a los algoritmos de resolución, incrementando el número de iteraciones requeridas para llegar a la convergencia. El modelo de Lagrange puede presentar problemas de convergencia si la solución implica alternancias entre desplazamientos elástico y plástico en muchos puntos del sistema.

En este trabajo se estudia el comportamiento elasto-plástico de las discontinuidades, por lo que se adaptan los modelos “Penalty” y “Lagrange”, y se descartan los modelos que restringen el movimiento en su totalidad (“Hard Contact”) o permiten movimiento libre sin fricción (“Frictionless”).

4.1.2 Modelos Constitutivos de Interacción Normal

Análogamente a la interacción de corte, para el comportamiento normal, se dispone de los modelos constitutivos mostrados en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Modelos de Abaqus para representar el comportamiento normal de discontinuidades.

Modelo	Símbolo	Variable
Scale Factor	k_n	Rigidez normal [Pa/m]
Linear	k_n	Rigidez normal [Pa/m]
Exponential	P	Presión, corresponde a la presión aplicada entre las superficies de la discontinuidad [Pa]
	A_p	Corresponde a la apertura de la discontinuidad [m]
Hard	-	-En la tabla 8 se explicitan los submodelos-
Tabular	P	Pressure, corresponde a la presión aplicada entre las superficies de la discontinuidad [Pa]
	C	Cierre corresponde al inverso de la Apertura(El valor negativo) [m]

Tabla 7. Submodelos del modelo Hard para comportamiento normal de interfaces

Modelo	Símbolo	Variable
Penalty	k_n	Rigidez normal [Pa/m]
Augmented Lagrange	k_n	Rigidez normal [Pa/m]
Default	-	No aplica
Direct	-	No aplica

El problema a estudiar se modelará mediante un sistema de interfaces elásticas-perfectamente plásticas, por lo que se opta por el modelo Penalty en la interacción normal del bloque con su base, esto permite obtener aproximaciones más realista que con el modelo de Multiplicadores de Lagrange el cual considera las interacciones como perfectamente plásticas.

4.2 Mallado

El mallado del modelo consiste en la discretización del medio continuo en elementos, los cuales se utilizarán para resolver el problema de condiciones de borde. Hay un compromiso entre la precisión del algoritmo con la cantidad de elementos elegidos y el recurso computacional utilizado para resolver dicho sistema, a mayor cantidad de elementos, mayor precisión, pero mayor tiempo computacional. De esta forma, se busca encontrar el tamaño óptimo de los elementos que otorgue una precisión aceptable a un costo de ejecución razonable.

En este trabajo se explicará el uso de modelos tridimensionales (3D) y bidimensionales (2D). El número de elementos 3D crece considerablemente cuando se usan elementos muy pequeños lo que aumenta exponencialmente los tiempos de ejecución de los algoritmos. Como el caso 3D acota en precisión y coste computacional a los modelos 2D, se utilizará este caso como modelo de pruebas para elegir el mallado.

El modelo de prueba utilizado consiste en un bloque de 10 [cm] x 10 [cm] x 10 [cm] ubicado sobre una base 2 [m] x 0,5 [m] x 0,8 [m]. El sistema esta completamente horizontal. Se imponen propiedades termo-mecánicas sobre los materiales, tal que ante una temperatura impuesta y la aplicación de un ciclo térmico, el sistema no debiese incurrir en desplazamiento plástico y se midió el desplazamiento en un nodo basal del bloque. Abaqus incurre en un error numérico al resolver un modelo, lo que hace que exista una imprecisión en los resultados. De esta manera, dado que el sistema no debería acumular desplazamiento, cualquier valor de desplazamiento mayor a 0 se considerará como error numérico. Este error numérico está directamente relacionado con el tamaño de los elementos del mallado de las piezas, por lo que para encontrar un mallado óptimo, dado que existe una relación entre la precisión del modelo y el tiempo

computacional requerido, se correrán 3 modelos y se graficarán los resultados obtenidos.

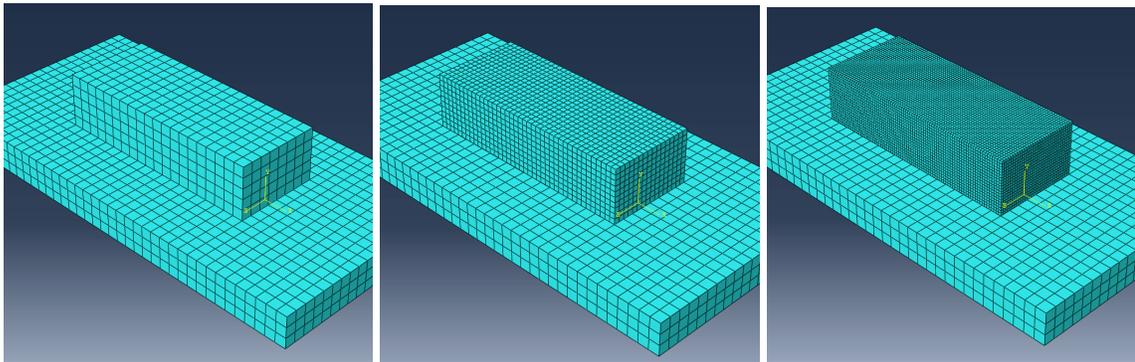


Figura 3. Tres tipos de mallado probados; la cantidad de elementos crece inversamente proporcional al tamaño de la arista del elemento.

Los tamaños de arista de elemento testados fueron 0,1 [m], 0,05 [m] y 0,025 [m] respectivamente. Se midió en cada caso el error numérico como una noción de la precisión del modelo ante un ciclo térmico que no debería provocar desplazamiento plástico. Los resultados obtenidos (Figura 4) indican que el error numérico para los dos tamaños menores es del orden de 10^{-10} [m] versus 10^{-5} [m] en el mayor. Por lo tanto, un tamaño de arista del elemento de 0.05 [m] sobre 2 [m] es suficiente para obtener una precisión relativamente estable en los resultados para el orden de magnitud del fenómeno a evaluar.

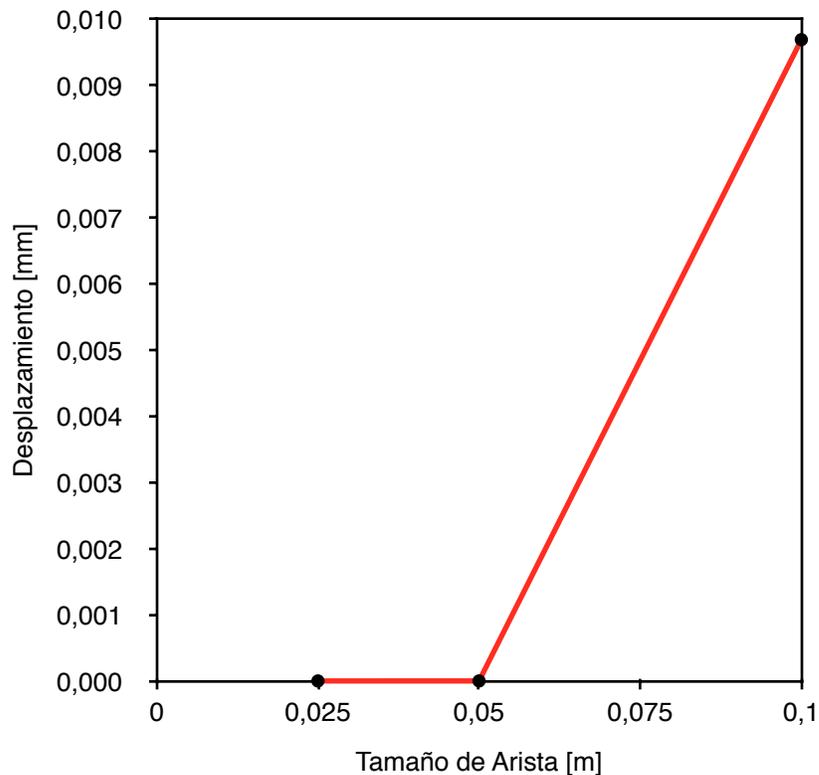


Figura 4. Error numérico vs tamaño de elemento

4.3 Ciclo Térmico

El problema estudiado, si bien considera cualquier fuente térmica posible, tiene por foco la influencia del sol como principal agente de irradiación sobre los componentes del sistema. El sol posee una acción térmica cíclica, manteniendo una fase de calentamiento y enfriamiento con un periodo de 24 horas. Para efectos del modelamiento, se puede asumir que la temperatura producto del calentamiento solar sigue un comportamiento sinusoidal con un periodo de 24 horas, donde el peak superior del senoide corresponde a la temperatura máxima diaria y el peak inferior a la temperatura mínima diaria.

Para incorporar este ciclo, Abaqus ofrece la posibilidad de modelar una amplitud como una función periódica, por lo que la definición de la temperatura se expresa de la siguiente manera:

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos n\omega(t - t_0) + B_n \sin n\omega(t - t_0)] \quad (28)$$

Donde:

A_0 = Constante en la función periodica, representa la temperatura base en la iteración; en los casos reales homologa a la temperatura media [-]

A_n = Constante del coseno, 0 para el modelamiento sinusoidal [-]

B_n = Constante del seno, representa la amplitud térmica [-]

t = Tiempo actual [s]

t_0 = Tiempo inicial, considerado 0 ya que el tiempo se referencia con el comienzo de cada paso iterativo [s]

n = Orden de la función, en este caso 1, dado que el modelamiento es lineal [-]

ω = Frecuencia, dada por el tiempo total [1/t]

Un detalle adicional para modelar la temperatura es que, como el modelamiento de un ciclo queda expresado en función del tiempo actual sobre el tiempo total, hay que establecer una cantidad de divisiones del ciclo térmico tal que no se pierda precisión en los resultados.

Se comprobó en un modelo de pruebas la precisión y el tiempo de ejecución al tomar 3 distintos tamaños de división de un ciclo térmico. Se tomó un modelo que físicamente no debería producir acumulación de desplazamiento y se midió el desplazamiento que producía, lo que es equivalente al error numérico. Se dividió el ciclo térmico en 10, 50 y 100 subpasos y se encontró que en todos los casos los errores fueron del orden de 10^{-10} [m], por lo que no se aprecia una relación entre los subpasos temporales y la acumulación de desplazamientos. Por otro lado, se verificó el tiempo de ejecución para cada caso y se encontró una relación aproximadamente lineal (Figura 5). Por lo tanto, dado que la cantidad de subpasos en que se aplique un ciclo térmico no afecta la precisión de los resultados, pero sí el tiempo de ejecución, se optó por la menor cantidad de subpasos por ciclo (10).

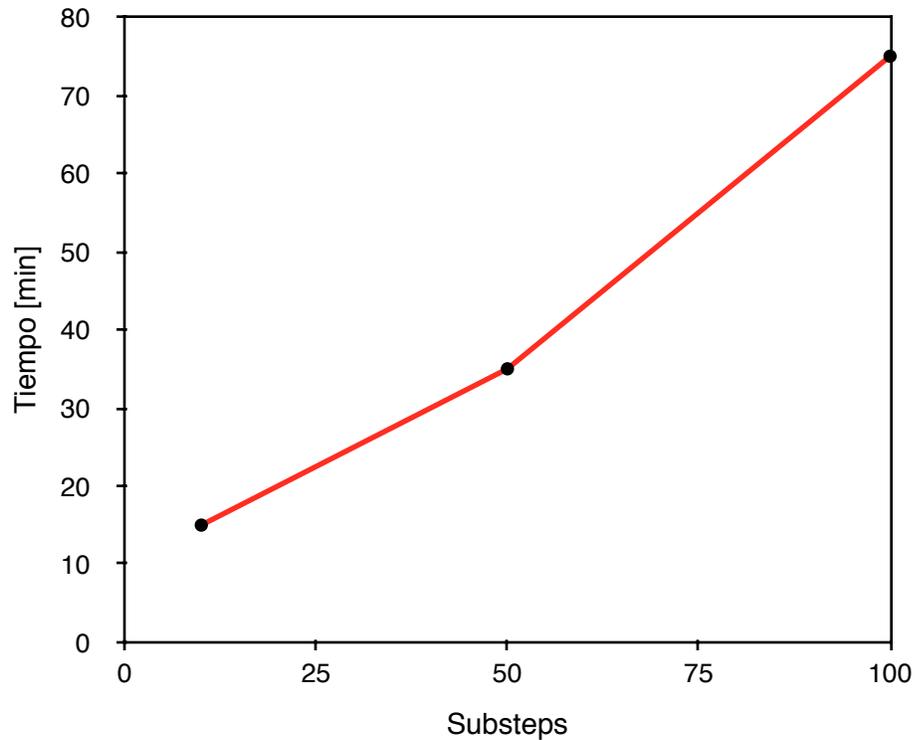


Figura 5. Tiempo de ejecución vs cantidad de substeps térmicos

5 Modelamiento Numérico del Mecanismo de Cuña

5.1 Comparación con Modelo Físico Analítico

5.1.1 Estimación de la temperatura crítica

En la primera parte de este capítulo, se creó un modelo como el de la Figura 1b, pero con ángulo $\beta = 0$ [°]. El modelamiento consistirá en buscar la temperatura crítica (ecuación (10)), tal que con una sola fase de dilatación se obtenga movimiento plástico, para ello se presentan dos modelos: uno en 3 dimensiones y otro en 2 dimensiones con deformación plana. El objetivo es comparar estos resultados con los estimados analíticamente en el capítulo anterior.

Las variables del modelo son L_w y L_b , que son el ancho de la cuña y el bloque respectivamente. La mecánica consiste en variar la relación $L_w/(L_w+L_b)$ entre 0.1 y 0.5 mientras se busca la amplitud térmica máxima que admiten las caras laterales de la

cuña. Se consideran dos tiempos de exposición al cambio de temperatura, uno corto de una hora y otro más prolongado de 113 [hr], denominado de largo plazo. Tanto la cuña como el bloque son de acrílico y la base es de acero. La base se modela como perfectamente rígida (Módulo de Young igual a $1 \cdot 10^{18}$ [Pa]) y sin expansión ($\alpha = 0$ [K-1]). Los resultados en 2D se muestran en la Figura 6 y los resultados en 3D en la Figura 7.

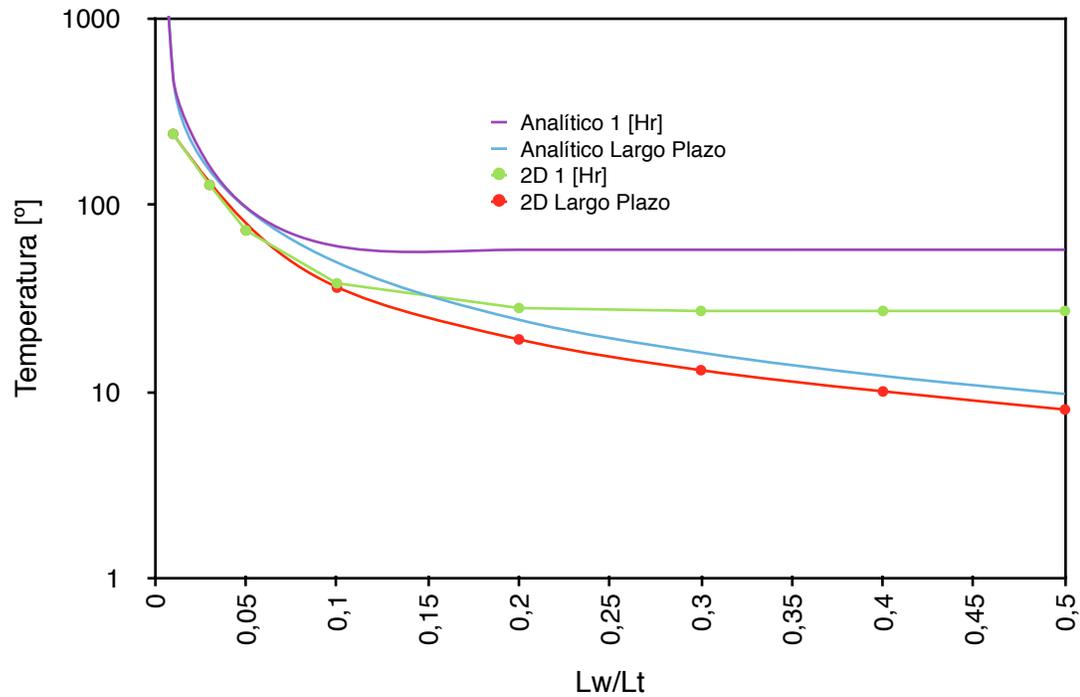


Figura 6. Resultados comparativos entre el modelo analítico y el 2D.

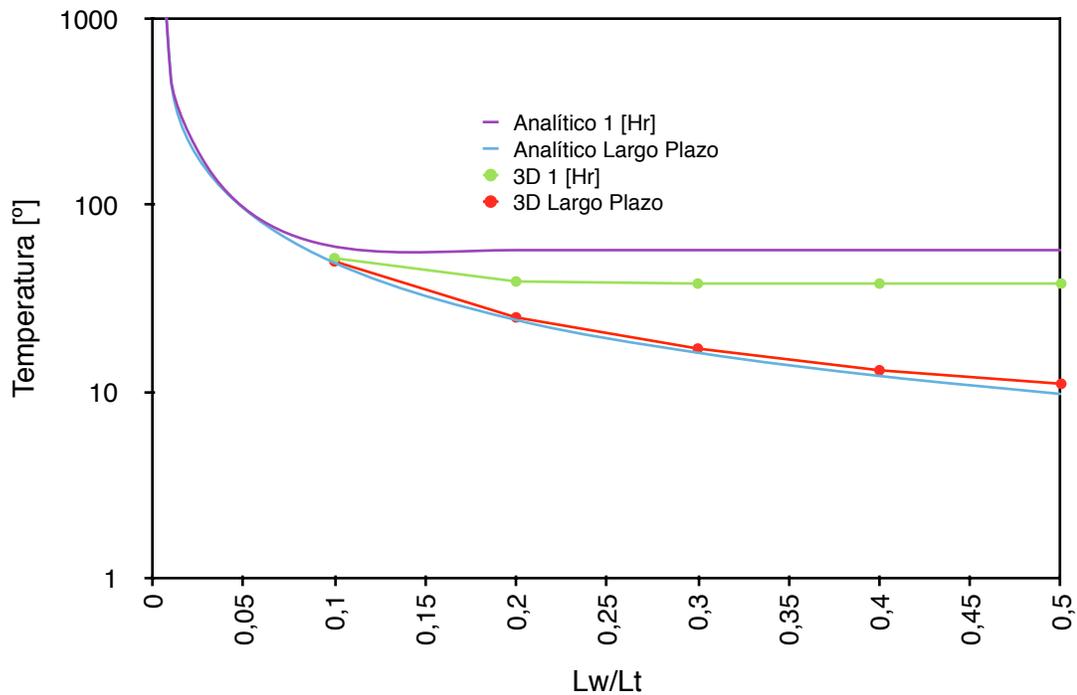


Figura 7. Resultados comparativos entre el modelo analítico y el 3D.

Los resultados muestran que si bien hay diferencias pequeñas, las tendencias de las curvas son similares en ambos tipos de análisis. Es interesante destacar que se evidencia la relación inversa entre la razón Lw/Lt con la temperatura crítica; a medida que aumenta la relación de tamaño entre la cuña y el bloque, se requiere menos temperatura para lograr desplazamiento plástico. Esto puede corroborarse fácilmente con el modelo analítico, mientras menor es el ancho del bloque, menor es su peso, por lo que la fuerza normal que ejerce sobre la base es menor, siendo más sencillo vencer la fricción que se opone al movimiento. Además, mientras mayor sea el ancho de la cuña, se produce mayor expansión (mejor evidenciado en los casos de largo plazo). En ambas figuras se evidencia que una exposición al cambio térmico mayor requiere una menor temperatura para inducir desplazamientos plásticos en el sistema.

El análisis numérico sugiere también que una vez que se ha superado el límite plástico, a mayor relación de aspecto, mayor es el desplazamiento acumulado dado que en cada ciclo térmico hay mayor expansión (este resultado no se muestra en este trabajo).

5.1.2 Análisis de estabilidad estática del modelo físico

A continuación, se estudia la estabilidad del modelo físico utilizando la fórmula del factor de seguridad FS obtenido en el Capítulo 3. El objetivo es estudiar la sensibilidad de las variables para el caso estático. Para cada modelo, se mantuvieron constantes las propiedades termomecánicas de los materiales y se variaron los ángulos $[\beta$ y $\eta]$ (Figura 8), la altura H_t (Figura 9) y los coeficientes de fricción $[\mu_1, \mu_2$ y $\mu_3]$ (Figura 10).

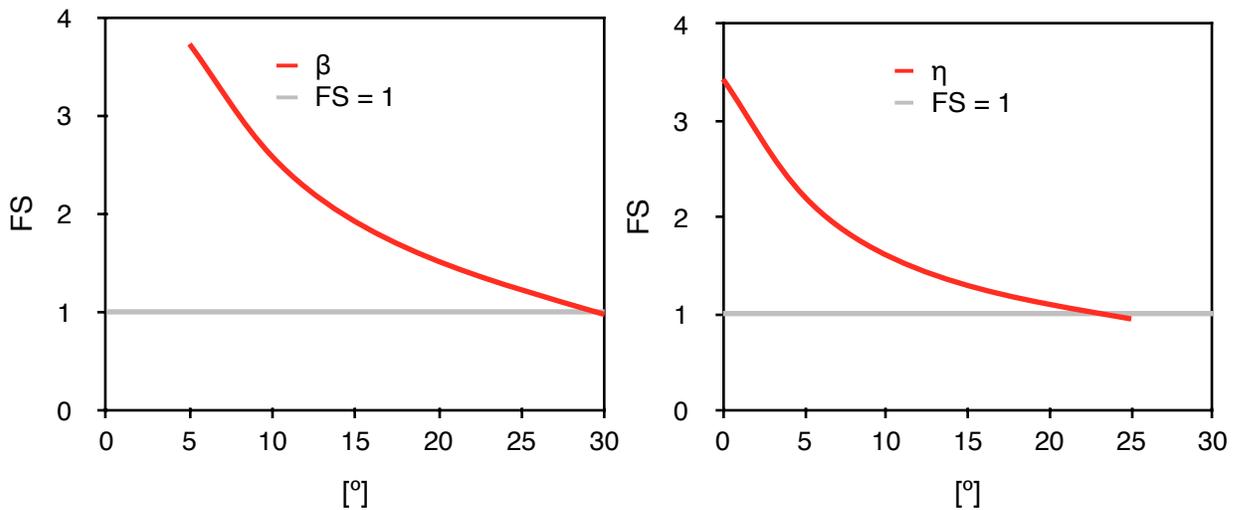


Figura 8. Gráficos de FS vs ángulos η, β

En la Figura 8 se puede apreciar que la estabilidad del modelo es mucho más sensible a las variaciones del ángulo η que β . Este resultado se justifica debido a que el ángulo β afecta solamente a las componentes normales de la cuña sobre el bloque (ecuación (20)), mientras que el ángulo η afecta además a las normales del bloque sobre la base (ecuación (16)), aumentando la componente del peso y disminuyendo el roce.

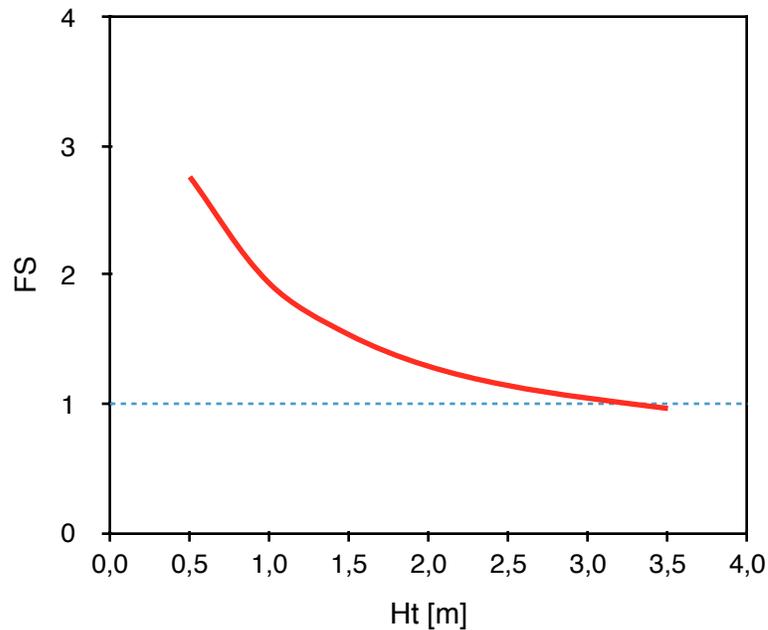


Figura 9. Gráfico de FS vs H_t

Al igual que el caso anterior, se puede ver en la Figura 9 que el FS decrece a medida que aumenta el valor de la altura total, pero con la diferencia de que es mucho más insensible a la variación de H_t que a la de los ángulos, siendo necesario imponer valores de 10 veces la magnitud inicial para que el sistema sea inestable.

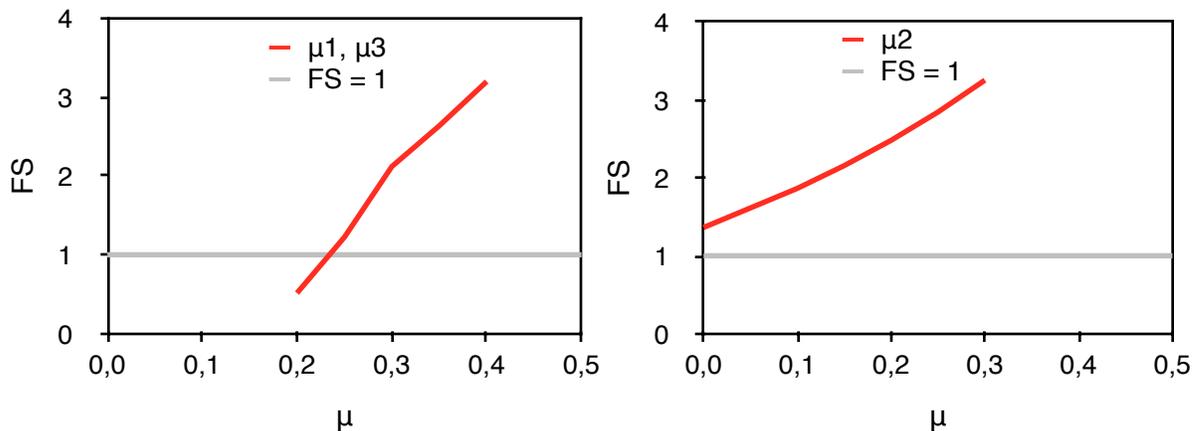


Figura 10. Gráficos de FS vs μ_1 , μ_2 y μ_3 .

En la Figura 10, se aprecia que la sensibilidad de los coeficientes de roce varía; para el coeficiente entre el Acero y el PMMA hay un decaimiento relativamente brusco,

obteniéndose la inestabilidad cuando el bloque no genera suficiente fuerza de roce. Para el PMMA con PMMA es considerablemente más insensible, se puede apreciar que se alcanza el 0 sin que haya deslizamiento, de donde se puede intuir que la componente tangencial entre el bloque y la cuña no es tan relevante para el equilibrio de fuerzas.

5.2 Verificación con Modelo Experimental

En paralelo a este trabajo, en Hernández (2014), se desarrolla un modelo experimental del fenómeno en laboratorios. A continuación, se comparan los resultados de ambos experimentos.

El modelamiento experimental considera una cuña fabricada en PMMA (Polimetilmetacrilato) que mantiene relaciones de aspecto análogas al caso de estudio en el Monte Masada. El modelo experimental considera un sistema compuesto por un bloque y una cuña dispuestos según la Figura 11.

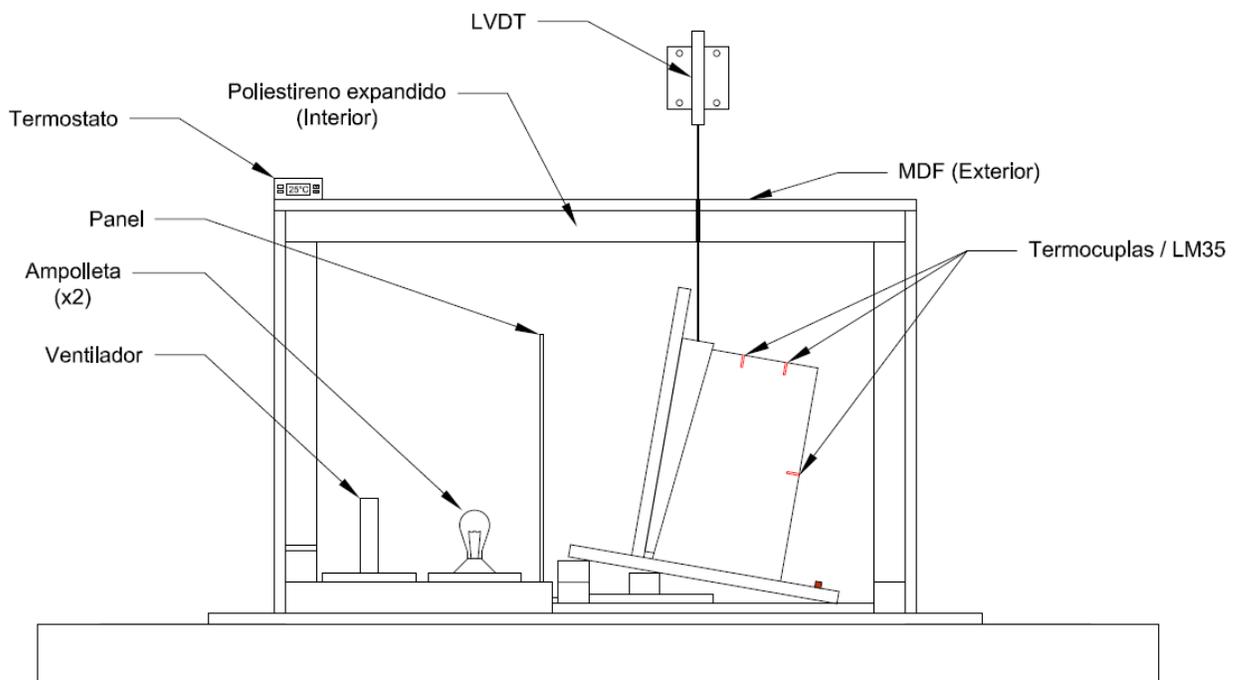


Figura 11. Esquema del modelo experimental confeccionado en paralelo en un trabajo conjunto realizado por Antonio Hernández (2014).

Las experiencias de laboratorio consideraron alrededor de 20 ciclos térmicos por ensayo. El periodo de cada ciclo es controlado por un termostato, que regula un set de ampollitas que hacen variar la temperatura del sistema. Las dimensiones del modelo bloque/cuña son 0,286 [m] de alto, 0,281 [m] de ancho, un ángulo β de 6 [°] y un ángulo η de 0 [°]. Se midió la temperatura en el interior del bloque mediante termocuplas y el desplazamiento de la cuña con un sensor LVDT.

Los modelos numéricos impusieron la temperatura en las caras laterales de la cuña y registraron la temperatura dentro de la cuña y el desplazamiento vertical de ésta. Los modelos trataron de replicar lo mejor posible las características de laboratorio. Se consideraron tres casos con periodos de ciclo de 30, 45 y 60 [min].

Los resultados experimentales se pueden ver en las Figuras 12, 13 y 14 y los resultados numéricos en las Figuras 15, 16 y 17. Los gráficos muestran tres curvas; en color negro se muestra la posición absoluta de un punto en la parte superior de la cuña, denotando el desplazamiento vertical de la misma, en color gris se muestra la temperatura externa (la temperatura al interior de la caja para los modelos experimentales y la condición de borde en las caras para el modelo numérico) y en color rojo se muestra la temperatura en un punto interior ubicado a 1 [cm] de la parte superior del bloque (para el modelo experimental) o de la cuña (para el modelo numérico).

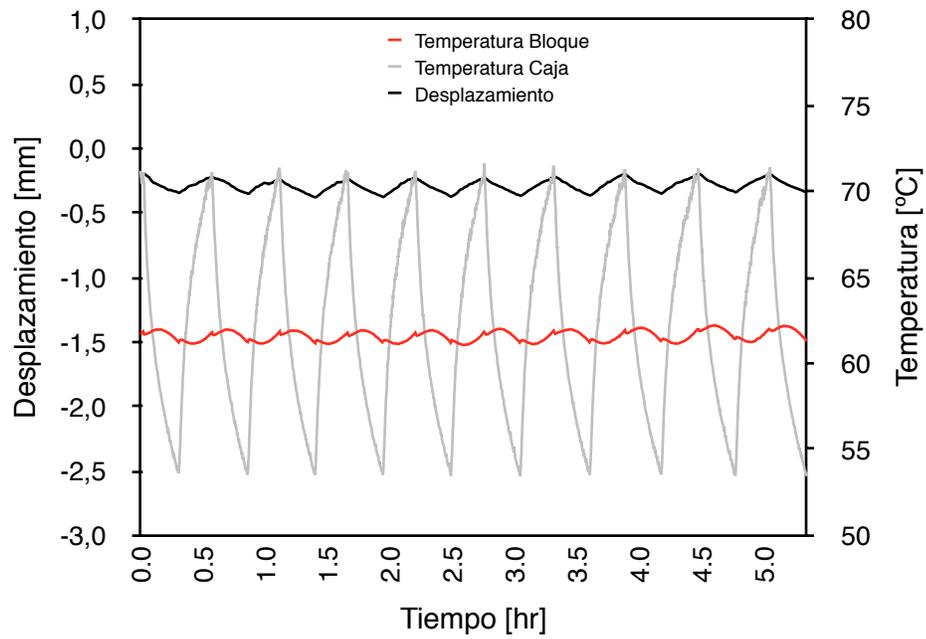


Figura 12. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 30 [min] aproximadamente.

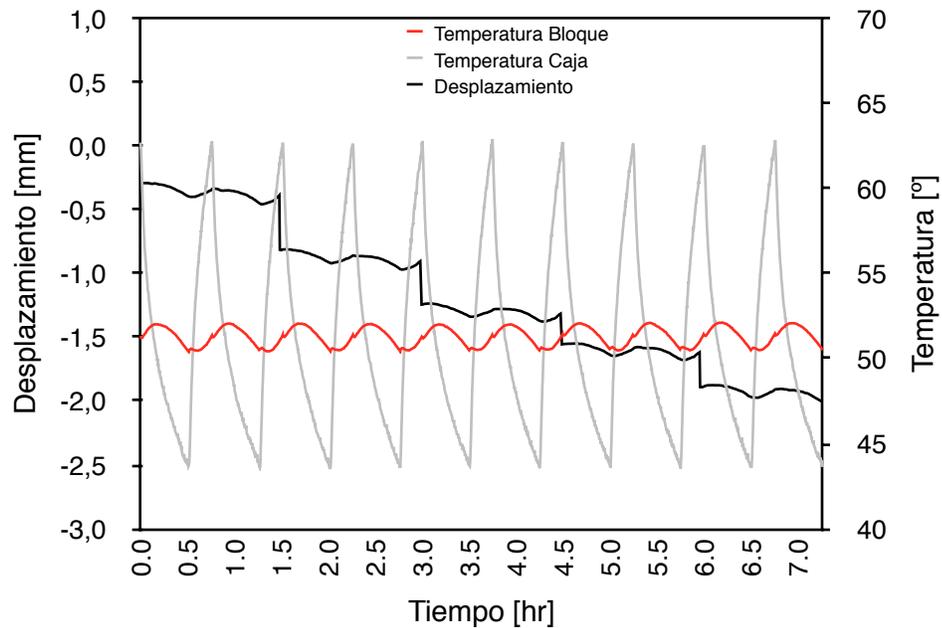


Figura 13. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 45 [min] aproximadamente.

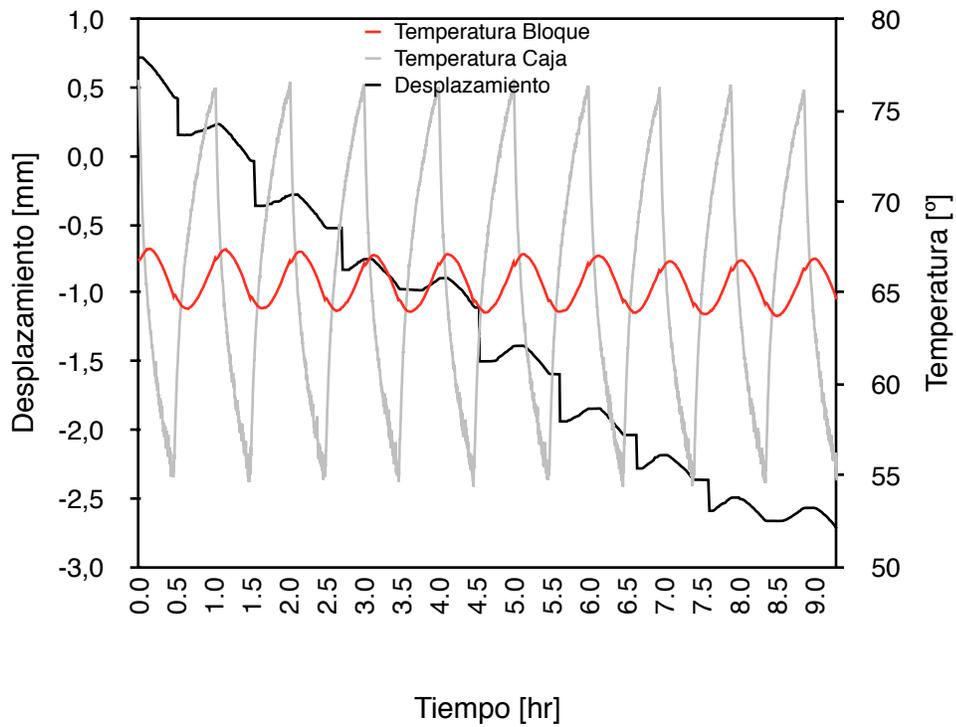


Figura 14. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque medidos experimentalmente para un periodo de 60 [min] aproximadamente.

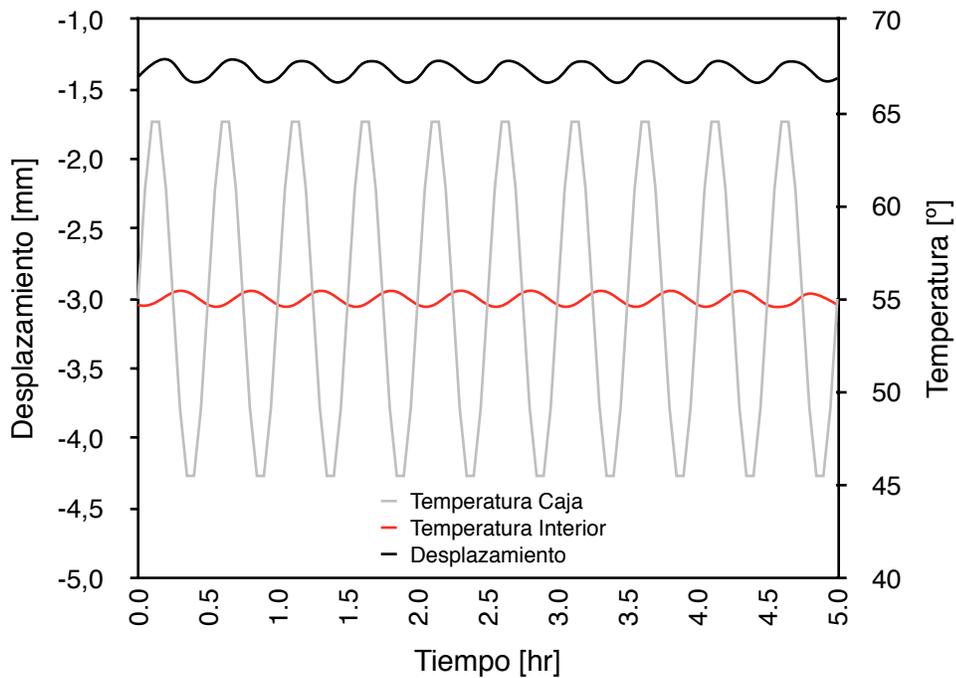


Figura 15. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 30 [min].

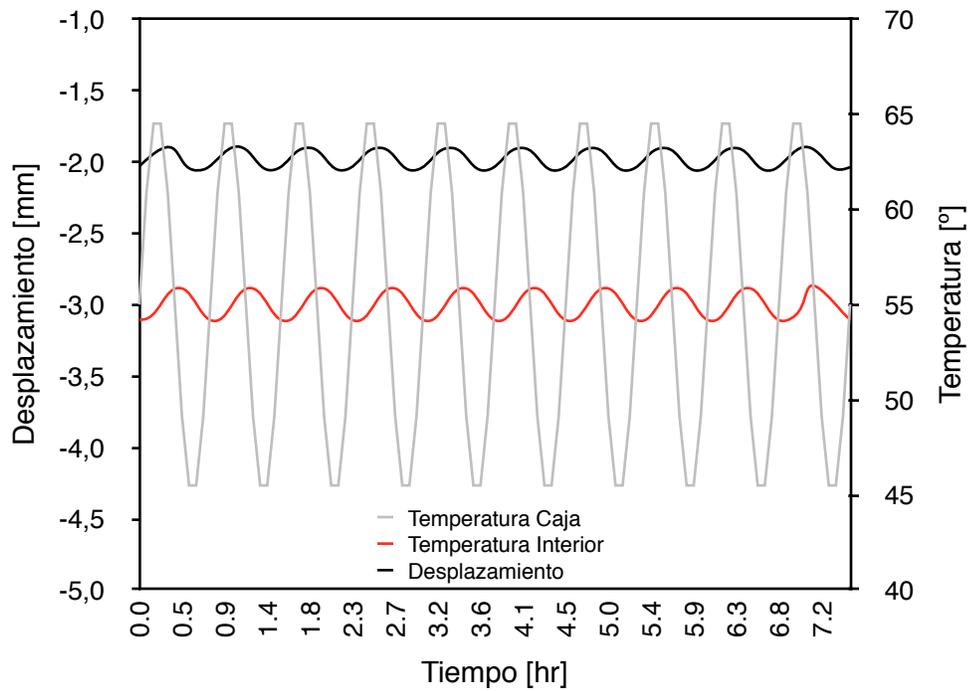


Figura 16. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 45 [min]

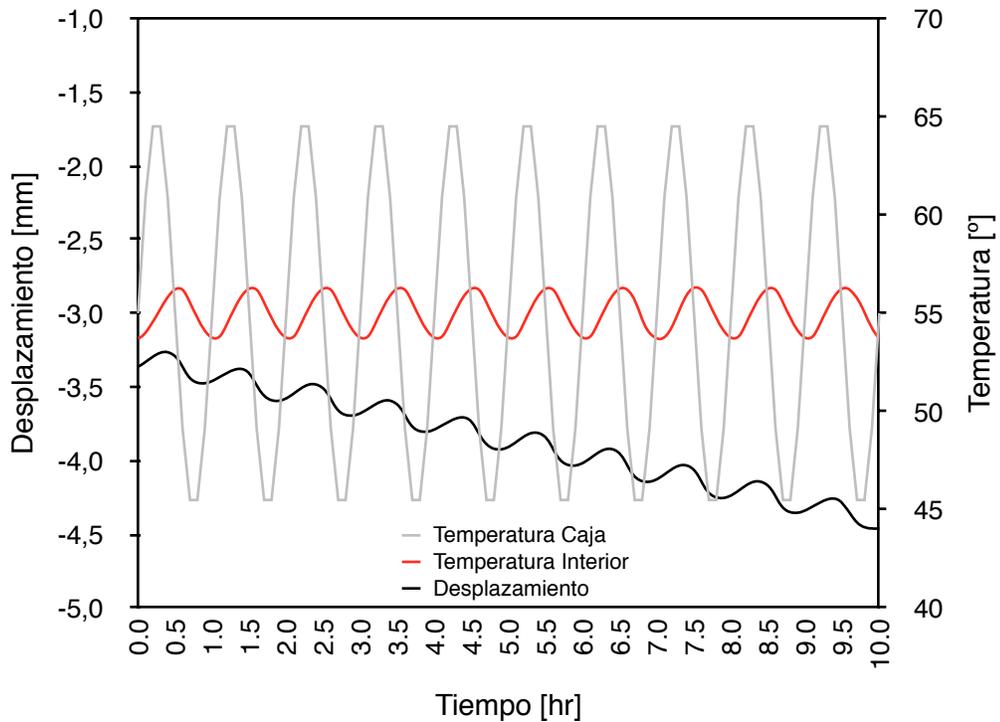


Figura 17. Desplazamiento vertical de la cuña, temperatura de la caja y temperatura interna del bloque obtenidos numéricamente para un periodo de 60 [min]

De los resultados numéricos, se puede observar que los períodos de 30 y 45 [min] no acumulan desplazamientos a diferencia del periodo de 60 [min]. Los desplazamientos por ciclo medidos para los tres modelos se resumen en la Tabla 8. Las etapas del descenso para los tres casos son coincidentes con la fase de enfriamiento de las caras externas pero no con la temperatura del punto central de la cuña, lo que se puede explicar por la diferencia de fase provocada por la difusión de calor hacia el interior de la cuña.

Tabla 8. Desplazamiento por ciclo para los modelos numéricos y experimentales del caso

	Desplazamiento / Ciclo Modelo Numérico [mm]	Desplazamiento / Ciclo Modelo Experimental [mm]
30 [min]	-	-
45 [min]	-	0,19
60 [min]	0,11	0,37

En el caso de los resultados experimentales, los dos últimos casos acumulan desplazamiento (45 [min] y 60 [min]). Los resultados pueden encontrarse en la Tabla 8 y evidencian que para periodos de media hora y una hora los datos obtenidos son consistentes con el modelo experimental, pero el caso $T = 45$ [min] presenta algunas diferencias; el caso experimental acumula desplazamientos del orden de $3.67E-04$ [m] por ciclo.

Esta diferencia se puede deber a la combinación de tres factores. Primero, el valor del desplazamiento crítico en el modelo numérico puede estar sobreestimado, lo que resulta en una menor acumulación de desplazamientos comparado con la situación real. Segundo, los valores para la fricción interna del acrílico están tomados de referencia con los ensayos de laboratorio, por lo que los valores pueden estar

sobreestimados, haciendo que se incurra en un menor desplazamiento. Por último, por motivos de estabilidad estática, las dimensiones del modelo numérico fueron ligeramente alteradas para obtener convergencia; el modelo experimental posee una relación distinta de esbeltez.

En este caso, la des-sincronización entre la etapa de descenso y la etapa de enfriamiento puede explicarse por la conductividad térmica del aire, factor que no está presente en el modelo numérico, ya que la temperatura se impone directamente como condición de borde sobre las caras de la cuña.

El orden de magnitud es coherente en ambos casos, acumulándose desplazamiento del orden de 10^{-4} [m] por cada 45-60 [min], por lo que se puede concluir que el modelo numérico aproxima relativamente bien al modelo experimental.

5.3 Modelamiento en Escala Real

En este capítulo se busca estudiar y analizar la aplicación del mecanismo a situaciones reales, variando las propiedades de los materiales, las relaciones de aspecto y las variables del modelo.

5.3.1 Acuñaamiento en Distintos Tipos de Roca

Para estudiar la aplicación a escenarios reales, se analiza el fenómeno de acuñaamiento para distintos tipos de roca. Para esto, se consideran tres tipos de roca encontradas habitualmente en la corteza terrestre: granito, basalto y dolomita (que corresponde al caso de Masada).

En este capítulo se busca estudiar el comportamiento de un sistema de cuña escalado a un set de medidas reales con propiedades de roca no alterada y discontinuidades. Se medirá la acumulación de desplazamientos verticales, al igual que en el capítulo anterior, y como caso particular, se verificará que un modelo con las condiciones reales del Monte Masada es capaz de provocar desplazamientos acumulados compatibles con los medidos por Hatzor (2003).

Las variables principales a estudiar son el periodo y la amplitud del ciclo térmico como condición de borde. Para cada tipo de roca se correrán 2 modelos, uno con un periodo de 24 horas (representando la oscilación térmica diaria) y otro con un periodo de 365 días (representando la variación estacional anual). Los modelos con periodos de un día contemplan cinco amplitudes distintas entre 10 [°C] y 70 [°C]. Los modelos con un periodo de un año contemplan cuatro amplitudes distintas entre 1 [°C] y 30 [°C]. Las amplitudes elegidas consideran un rango que abarca las temperaturas esperables en casos reales, considerando que las temperaturas en las caras expuestas de una roca pueden elevarse más allá de la temperatura ambiental producto de irradiación directa.

Las dimensiones del modelo analizado son 13 [m] de alto, 8 [m] de ancho, un ángulo β de 6 [°] y un ángulo η de 0 [°]. Todos los modelos se corrieron con una distancia crítica de $3 \cdot 10^{-4}$ [m] y la amplitud térmica se aplicó bajo una temperatura media de 0 [°C],

Las mediciones etiquetadas como “Temperatura Superficie” corresponden a la temperatura impuesta en las caras de irradiación de la cuña, “Temperatura Interior Cuña” corresponde a la temperatura en un punto interior medio de la cuña, aproximadamente en la misma altura proporcional que en el modelo en PMMA y “Desplazamiento” es la posición vertical del nodo superior izquierdo de la cuña.

5.3.2 Ciclo Diario

Los resultados de los modelos para una amplitud térmica de 10 [°C] y 50 [°C], considerando las propiedades del granito en las Tablas 1 y 2, se pueden ver en las Figuras 18 y 19. Las series expuestas en los gráficos son las mismas que en el capítulo anterior para el modelo experimental. En las discusiones se presenta un gráfico que resume los desplazamientos para cada caso en forma adimensional.

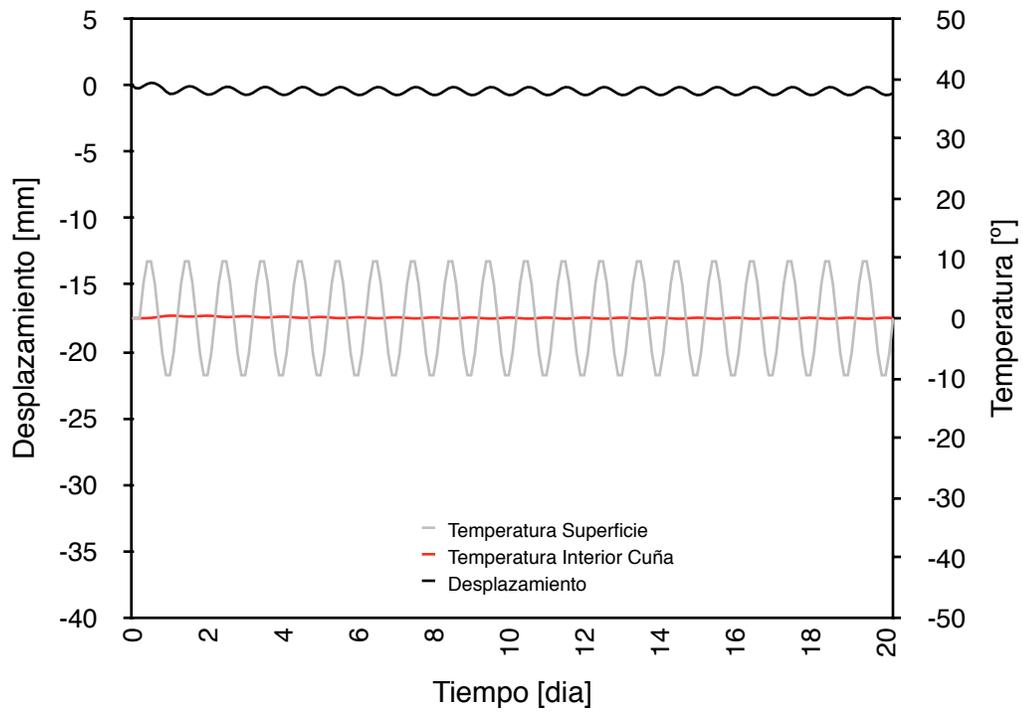


Figura 18. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 10 [°C]

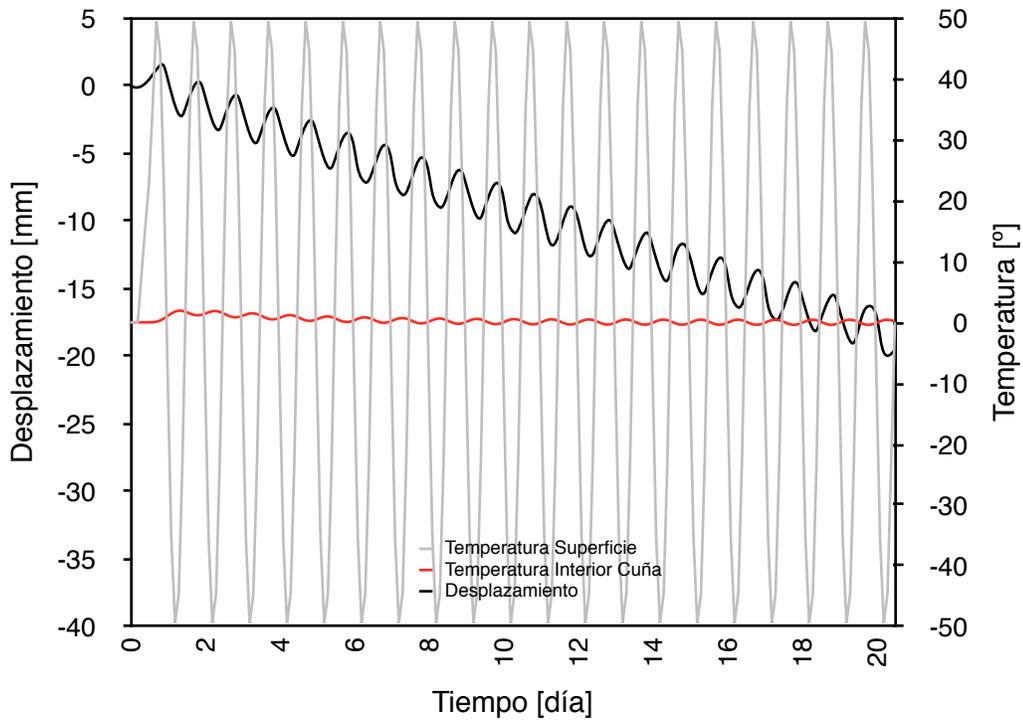


Figura 19. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 50 [°C]

Los resultados de los modelos para una amplitud térmica de 10 [°C] y 50 [°C], considerando las propiedades del basalto en las Tablas 1 y 2, se pueden ver en las Figuras 20 y 21.

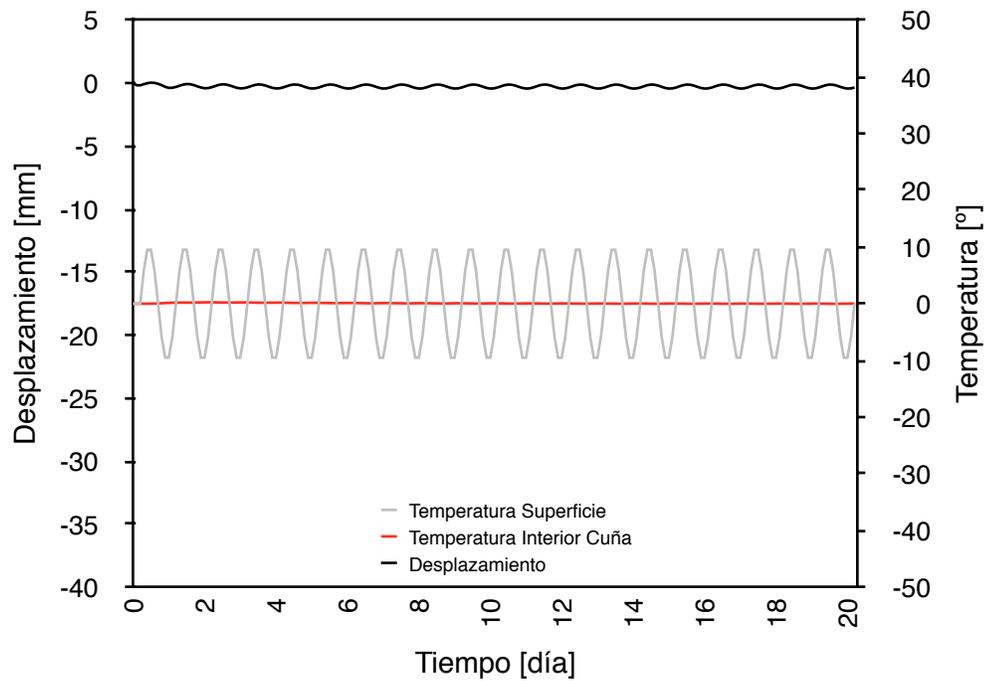


Figura 20. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 10 [°C]

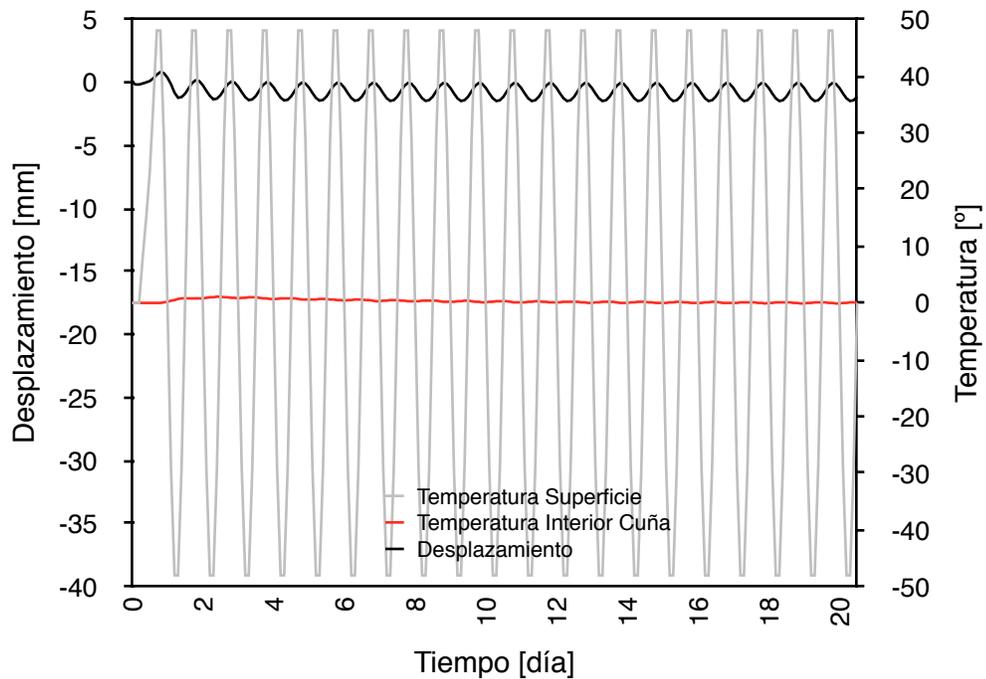


Figura 21. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 50 [°C]

Los resultados de las simulaciones para el granito indican que se comienza a acumular desplazamientos a partir de amplitudes térmicas cercanas a 30 [°C] y el descenso de la cuña es regular en la mayoría de los casos. Los resultados para el basalto, en cambio, indican que no hay acumulación de desplazamientos para el rango de temperaturas analizado.

5.3.3 Ciclo Estacional

Los resultados de los modelos para una amplitud térmica de 1 [°C] y 30 [°C], considerando las propiedades del granito, se pueden ver en las Figuras 22 y 23.

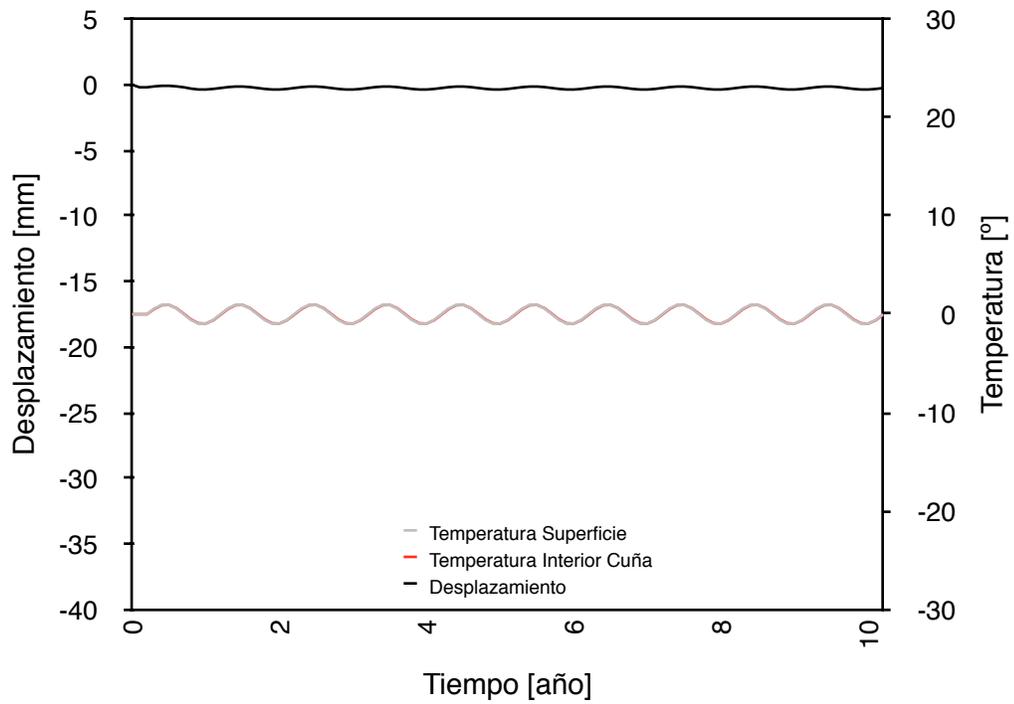


Figura 22. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 1 [°C]

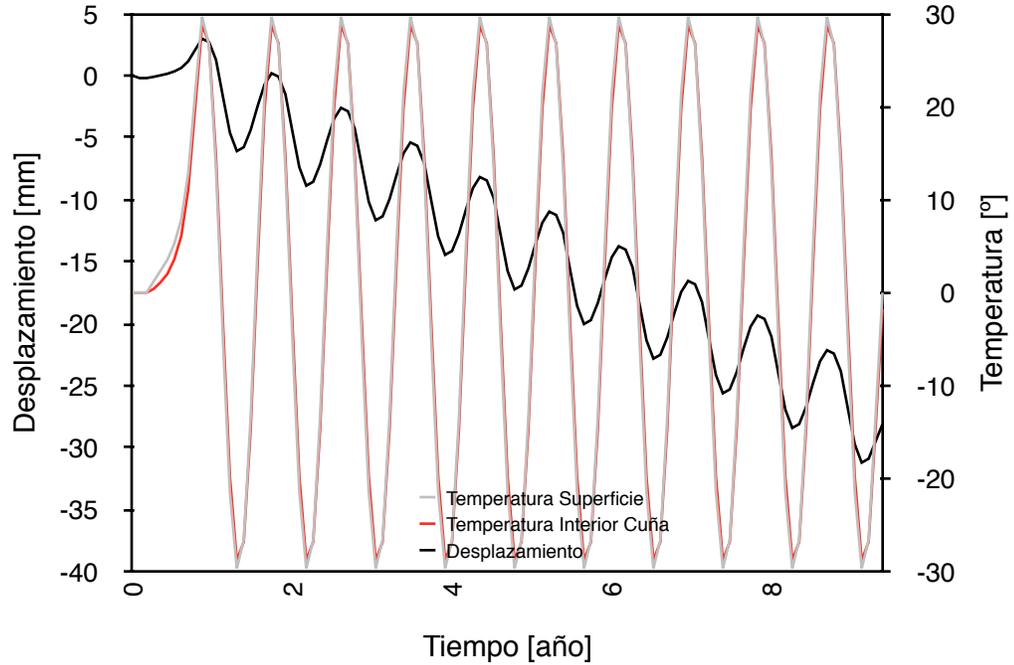


Figura 23. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca granítica con una amplitud térmica de 30 [°C]

Los resultados de los modelos para una amplitud térmica de 1 [°C] y 30 [°C], considerando las propiedades del basalto, se pueden ver en las Figuras 24 y 25.

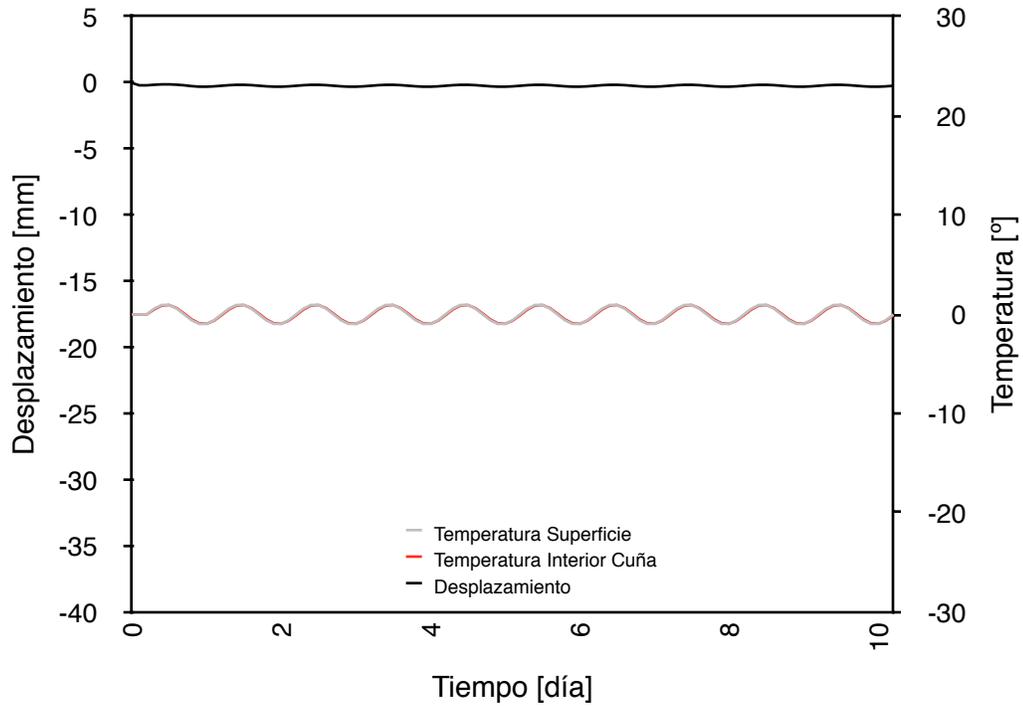


Figura 24. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 1 [°C]

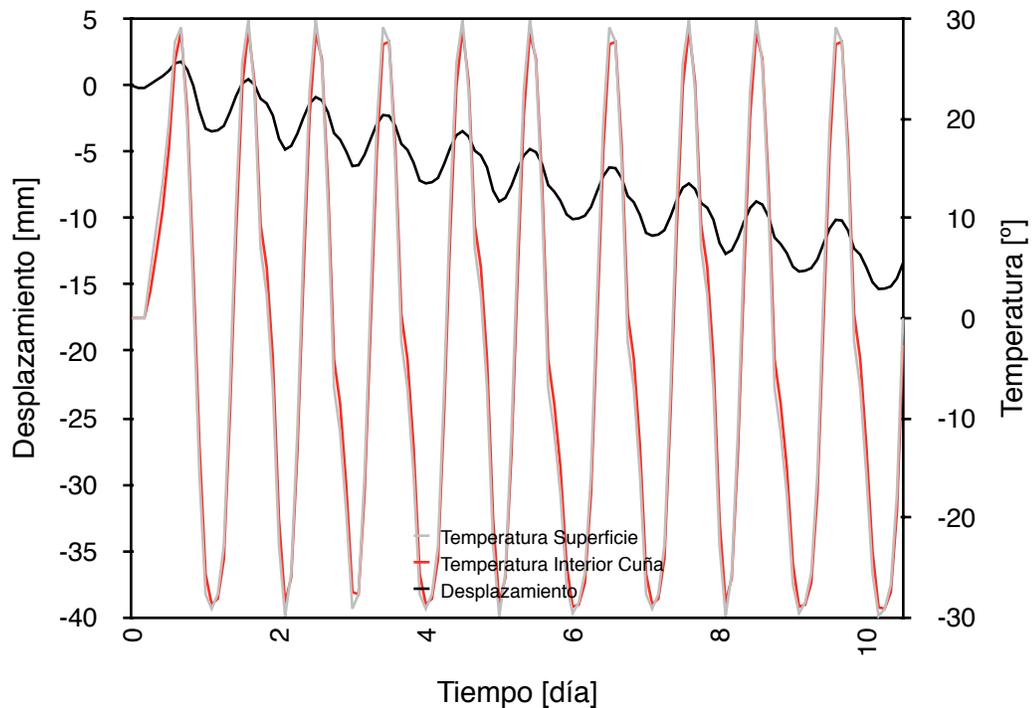


Figura 25. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para un sistema de roca basáltica con una amplitud térmica de 30 [°C]

Los resultados de las simulaciones para el granito indican que se comienza a acumular desplazamientos a partir de amplitudes térmicas cercanas a 15 [°C] y el descenso de la cuña es regular en la mayoría de los casos. Los resultados para el basalto, en cambio, indican que la acumulación de desplazamientos comienza a partir de amplitudes térmicas cercanas a 20 [°C].

5.3.4 Análisis Numérico de Sensibilidad para Casos Reales

Se llevaron a cabo una serie de modelos que buscan observar la sensibilidad de la acumulación de desplazamiento frente a las distintas variables que componen el modelo en los rangos típicos de propiedades de los materiales geológicos presentes en la corteza terrestre.

Se generó un modelo base con las medias aritméticas (\bar{x}) y las desviaciones estándar (σ) de las propiedades recopiladas en el Capítulo 2. La sensibilidad de la acumulación de desplazamientos con respecto a cada variable se testeó modificando tal propiedad

en un rango definido por el intervalo $[x-\sigma, x+\sigma]$, aproximadamente. Las dimensiones de los modelos son similares a las de los modelos de rocas presentados anteriormente. Las propiedades del modelo base, junto con los valores mínimos y máximos de cada intervalo se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de las propiedades termomecánicas en el modelo standard

	Densidad [kg m ⁻³]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson [-]	Difusividad Térmica [m ² s ⁻¹]	Coefficiente de Expansión [°C ⁻¹]	Distancia Crítica [mm]
Promedio	2700	60	0,2	1,3·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁶	0,1
Mínimo	2500	40	0,2	5,3·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶	0,01
Máximo	2900	80	0,2	2·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁵	1

Los desplazamientos por ciclo que se obtienen al variar las propiedades mecánicas del material, tanto densidad como módulo de Young, se presentan en la Figura 26. Los desplazamientos obtenidos al modificar las propiedades térmicas se muestran en la Figura 27 y aquellos producidos al modificar las propiedades de las discontinuidades se presentan en la Figura 28.

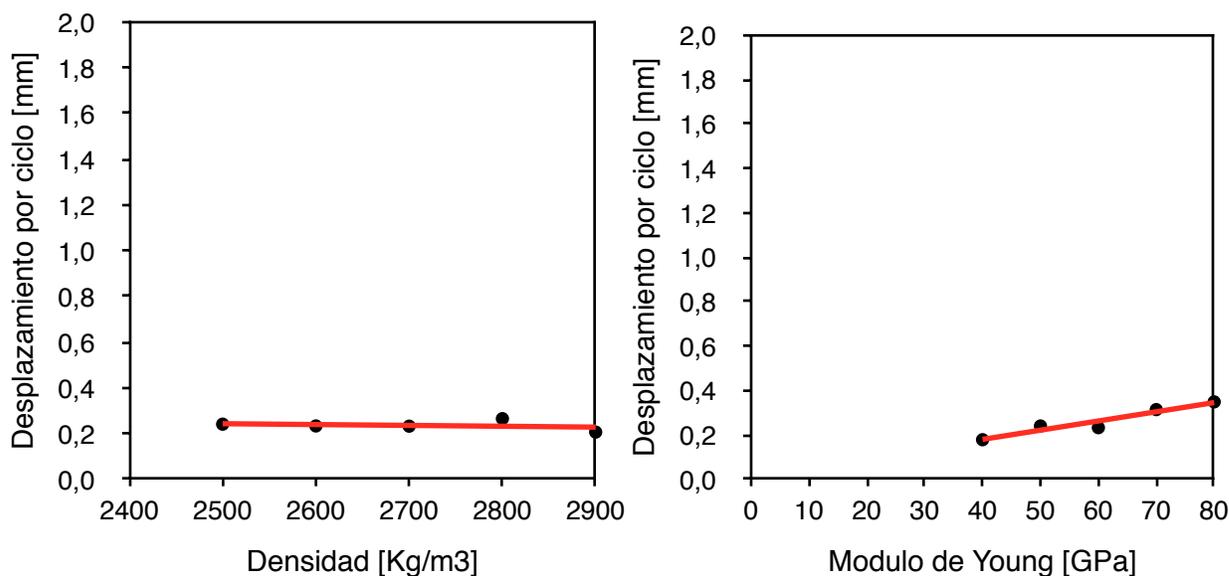


Figura 26. Gráficos de desplazamiento para cada variable testeada (densidad y módulo de Young)

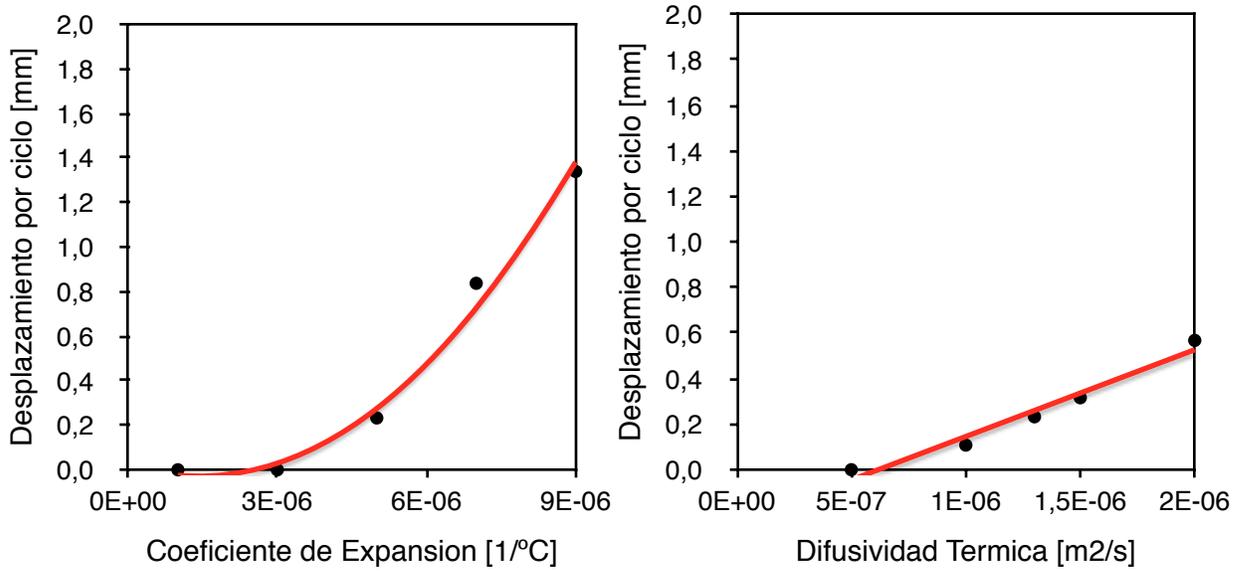


Figura 27. Gráficos de desplazamiento para cada variable testada (coeficiente de expansión y difusividad térmica)

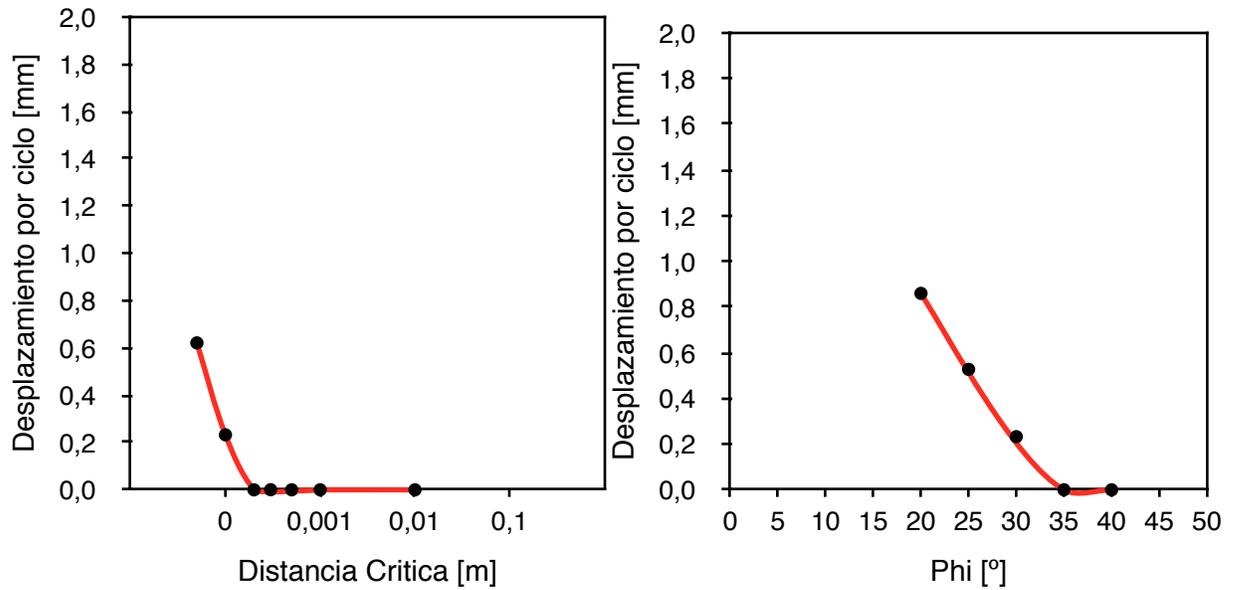


Figura 28. Gráficos de desplazamiento para cada variable testada (distancia crítica y phi)

Los resultados sugieren que la magnitud de la acumulación de desplazamientos es más sensible a un aumento de la expansión térmica, difusividad térmica, distancia crítica y

ángulo de fricción interna que al aumento de la densidad y el módulo de Young. Cabe destacar que el aumento de desplazamiento es mucho más abrupto para la distancia crítica, ya que ésta controla directamente el desplazamiento acumulado.

5.4 Caso de Estudio en el Monte Masada

5.4.1 Marco Geológico

El último objetivo de este trabajo es analizar la ocurrencia del mecanismo de cuña inducido térmicamente en el Monte Masada (Israel). El Monte Masada, posee una morfología elongada correspondiendo a una estructura de horst, controlada por fallas normales que comprimen los márgenes occidentales del valle de rift del Mar Muerto. El macizo rocoso consiste principalmente en estratos de dolomita y caliza manteniendo entre 5° y 20° al Este y está intensamente fracturado por dos sets de discontinuidades subverticales y ortogonales entre sí que presenta un rumbo paralelo y normal al eje longitudinal de la montaña. El rumbo de uno de los sets es NNE y el otro ESE y el espaciamiento medio de ellos varía de unos pocos decímetros en la cara oeste hasta 5 a 10 metros en la cara Este de la montaña (en un estudio regional del margen occidental de la cuenca pull-apart del Mar Muerto, se sugiere que los dos sets dominantes fueron desarrollados durante una sola fase tectónica (Saggy et al, 2003))

Según Gill (1993), estratigráficamente, en el Monte Masada se reconocen dos componentes principales. Aflorando en superficie se observa la Formación Bina, compuesta principalmente por dolomitas y calizas cafés (Turoniano), con una potencia aproximada de unos 150 [m], sobreyaciendo en concordancia al Miembro Tamar. Esta formación está alzada mediante una falla normal de los estratos del Este. En el oeste, la formación está sobreyacida por la Formación Manuha (Ceniáciano Superior - Campaniano Bajo) y la Formación Mishash (Campaniano). En la Figura 30 se pueden ver los estratos de Masada alzados con respecto a los estratos adyacentes hacia el Este.

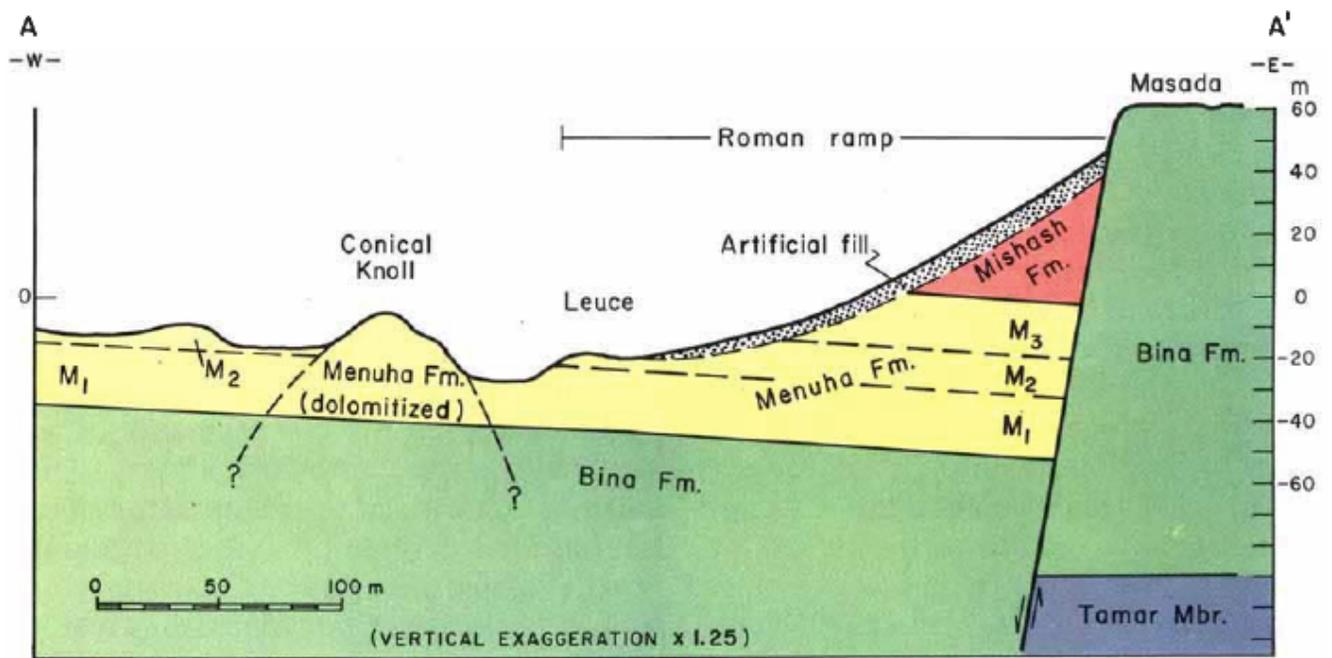


Figura 29. Sección transversal del Monte Masada

Climáticamente, el Monte Masada se localiza en el sector Este del desierto de Judea, en una zona árida con una media anual de precipitaciones de 35 [mm/año] y unas temperaturas mínima y máxima de 12.7 [°C] y 39.7 [°C] respectivamente (Bakun-Mazor et al, 2003).

Particularmente, en la cara Este del Monte Masada, existe una vía de acceso llamada “El Camino de la Serpiente” -o ‘Snake Path Cliff’- (Figuras 30, 31, 32 y 33), en el cual se pueden observar los bloques de los que es objetivo el estudio. Dichos bloques están ubicados a un par de metros bajo la superficie de Masada y su acceso es mediante el camino principal.



Figura 30. Vista del Camino de la Serpiente en la ladera del Monte Masada



Figura 31. Vista del Camino de la Serpiente desde la parte superior del Monte Masada



Figura 32. Vista de la ladera oeste del Monte Masada

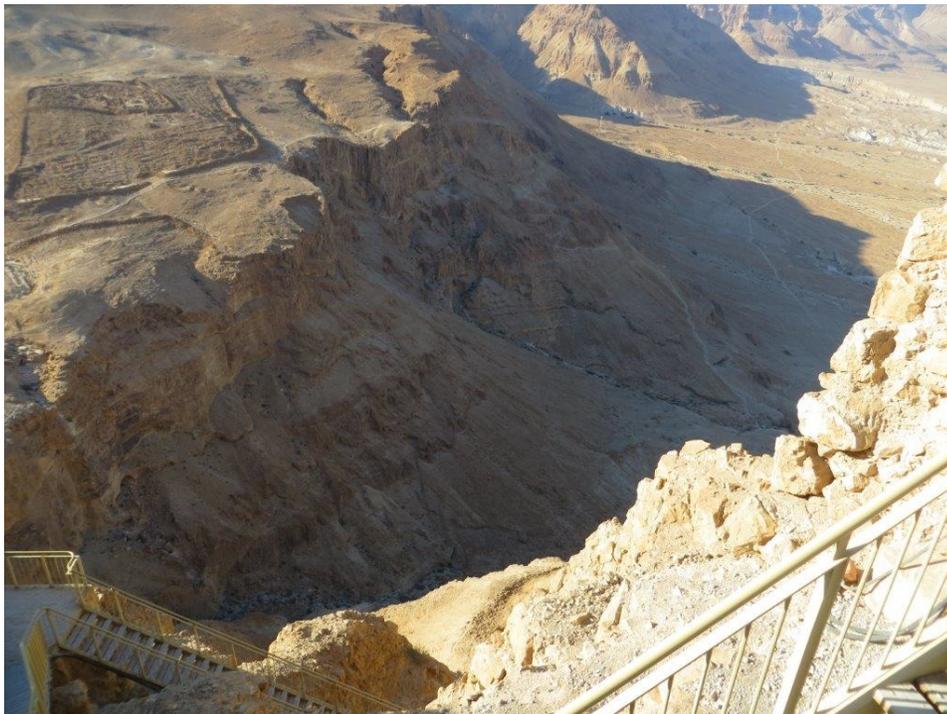


Figura 33. Vista del valle hacia el Mar Muerto desde la parte superior del Monte Masada

En la ladera Este del Monte Masada se encuentra el Camino de la Serpiente (*'Snake Path'*), en el cual Hatzor (2003) midió el desplazamiento de 3 bloques dispuestos según la geometría del modelo (Figura 34)

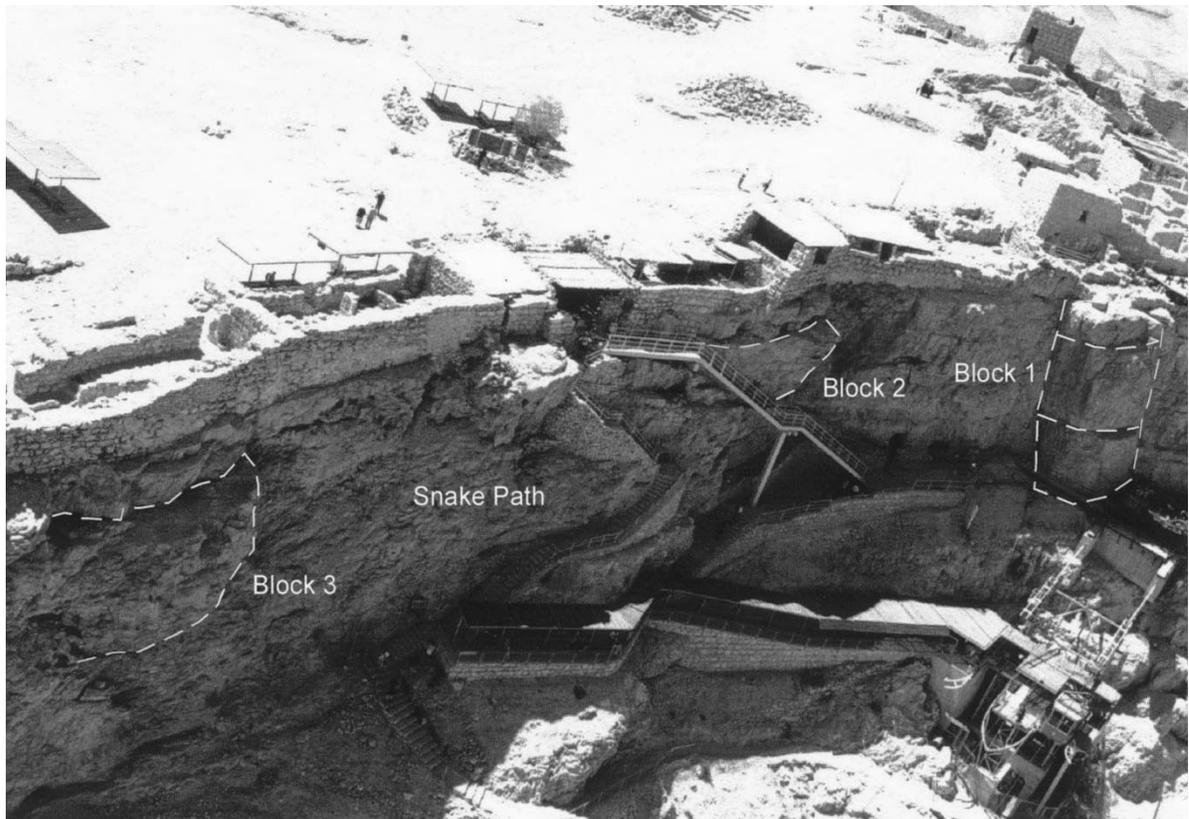


Figura 34. Camino de la Serpiente con los bloques analizados por Hatzor (2003)

En 1998, comenzó un programa de instalación de sensores en las discontinuidades de los bloques para cuantificar el su desplazamiento. Se instaló un total de 11 medidores de espaciamiento de discontinuidades, junto con varios instrumentos enfocados a la medición de otras propiedades. Los medidores de espaciamiento corresponden a LVDT's de un rango de 50 [mm] con capacidad de operar en un rango de -20 a 80 [°C]. En la Figura 35 se muestran las ubicaciones de varios sensores LVDT usados para cuantificar el desplazamiento. Las mediciones se llevaron a cabo por varios meses y mostraron desplazamientos acumulados de entre 1 y 2 [mm/año].

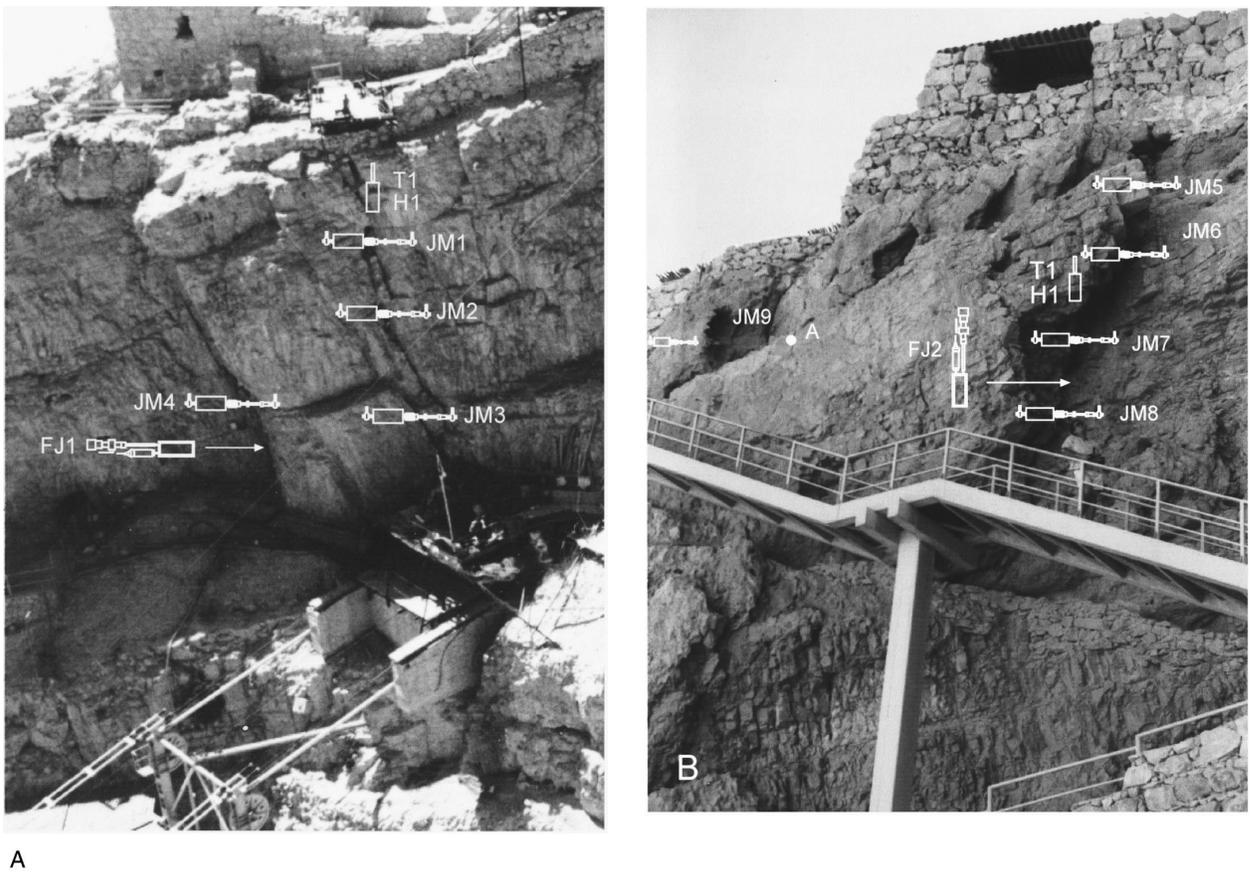


Figura 35. Disposición de ejemplo de la ubicación de los sensores

Las propiedades geométricas del modelo del Monte Masada corresponden a las usadas en los modelos anteriores para rocas y las propiedades termo-mecánicas usadas son similares a las de la dolomita.

Los coeficientes adimensionales para el caso de Masada pueden verse en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de los coeficientes adimensionales para Masada

Coefficiente	Valor
π_1	0.001 (día) 0.64 (año)
π_2	0.615
π_3	0.070
π_4	6.400
π_5	3.126
π_6	6.300

5.4.2 Ciclos Térmicos Diarios y Estacionales

En el primer análisis efectuado, se busca revisar el efecto de la amplitud térmica y el periodo sobre el mecanismo de acuñamiento cuando el sistema es irradiado solamente en las caras de la cuña. En este modelo se considera una temperatura media de 0 [°C] y una amplitud variable sobre periodos de un día y 365 días. Estos ensayos fueron realizados con un valor de distancia crítica $\delta_c = 1 \cdot 10^{-4}$ [m]. En las Figuras 36 y 37 se pueden apreciar los resultados de los modelos con amplitudes térmicas de 10 [°C] y 50 [°C] para las condiciones en el Monte Masada.

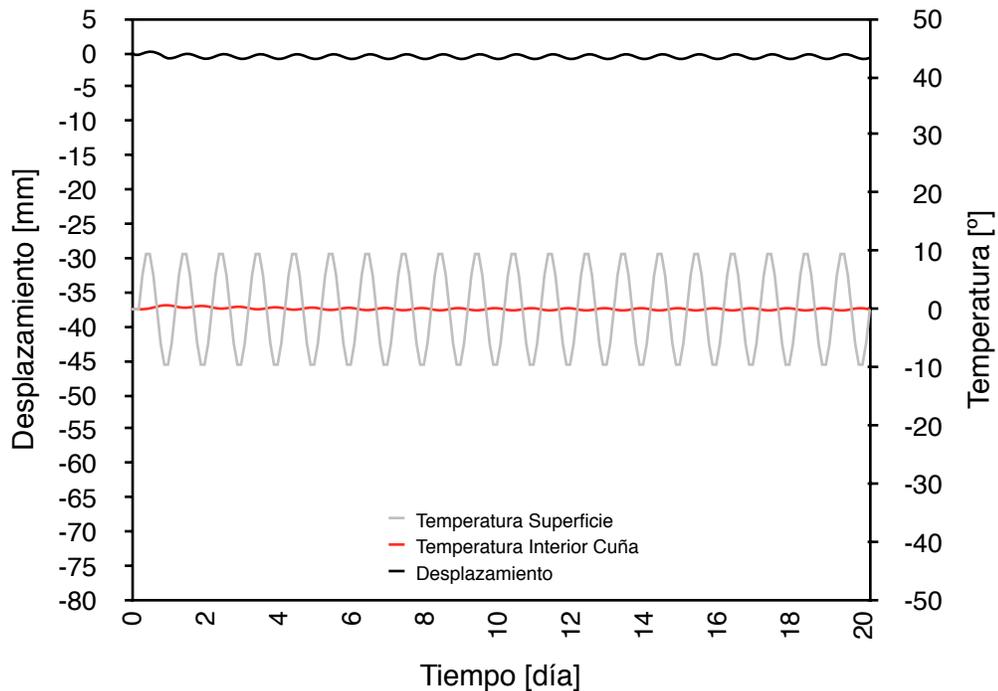


Figura 36. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 10 [°C] y ciclos de un día en el Monte Masada.

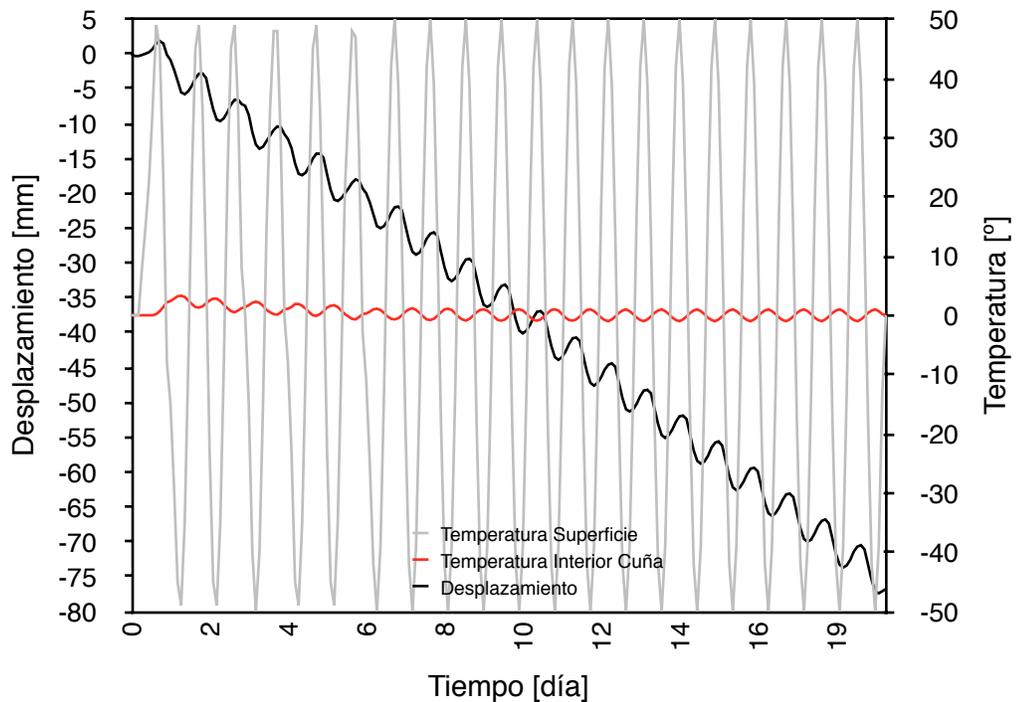


Figura 37. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 50 [°C] y ciclos de un día en el Monte Masada.

Este caso de estudio corresponde a la litología de la dolomita, la cual puede considerarse como la más susceptible a acumular desplazamiento en comparación a los tipos de rocas revisados en la sección anterior. De los gráficos, puede verse que a partir de los 20 [°C] ya comienza a percibirse acumulación de desplazamiento, una amplitud térmica cercana al caso del granito pero considerablemente menor que en el basalto. Al igual que en los casos de la sección anterior, esta diferencia se puede explicar por las propiedades de la roca, ya que la conductividad térmica y coeficiente de expansión de la dolomita son mayores a los de los otros tipos de roca. Por lo tanto, es coherente que experimente una mayor expansión ante condiciones similares. Esto puede considerarse como explicación de que el fenómeno se evidencie más en rocas carbonáticas del estilo de Masada con altas conductividades y coeficientes de expansión.

Analizando la acumulación en el largo plazo para un período de $T = 1$ [año], los resultados obtenidos de los modelos con amplitudes térmicas de 1 [°C] y 30 [°C] se muestran en las Figuras 38 y 39.

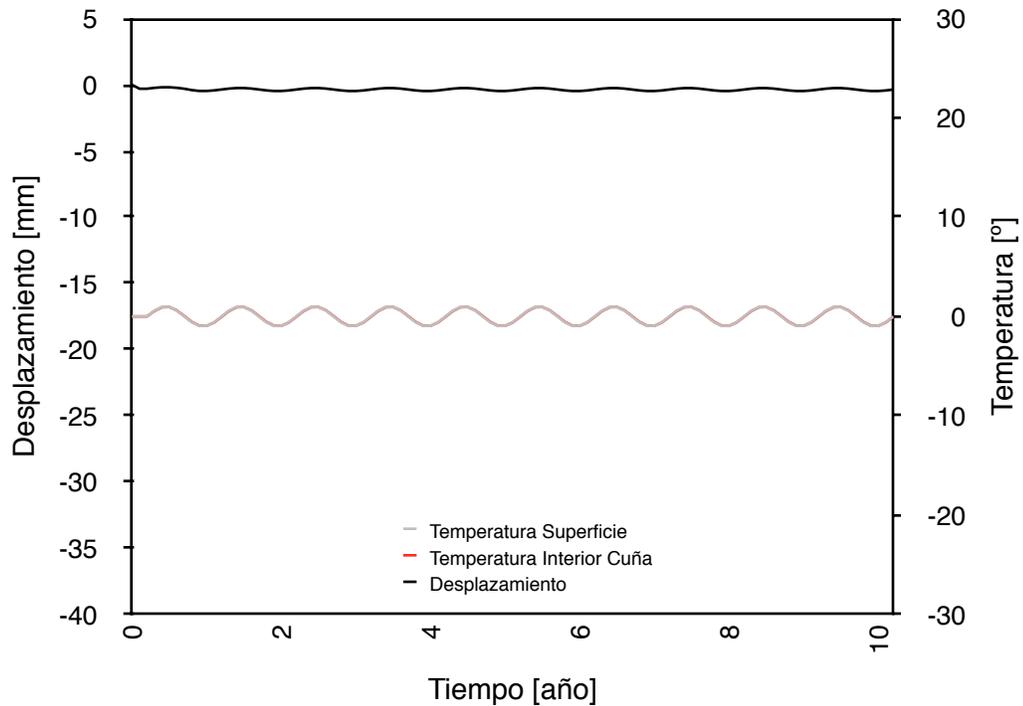


Figura 38. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 1 [°C] y ciclos de un año en el Monte Masada.

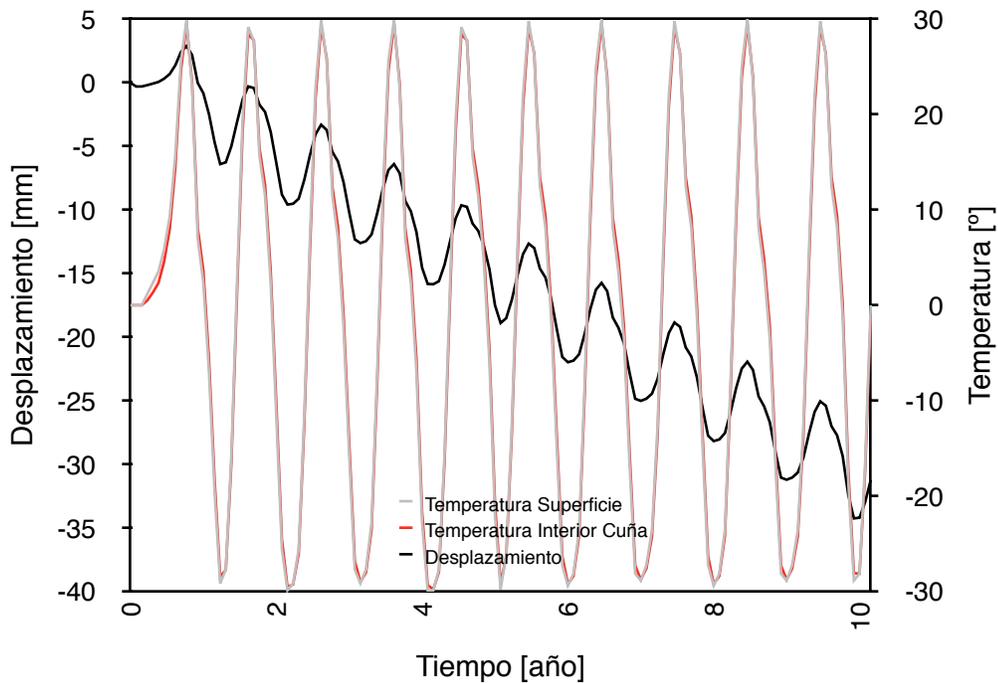


Figura 39. Desplazamiento, temperatura en las caras irradiadas y temperatura interna de la cuña para una amplitud térmica de 30 [°C] y ciclos de un año en el Monte Masada.

Nuevamente los resultados para el caso anual son consistentes con las propiedades, evidenciando el mayor desplazamiento acumulado comparando con las litologías del punto anterior. La menor diferencia entre las rocas para este periodo - comparativamente al periodo diario- se explica ya que un mayor tiempo de exposición atenúa la diferencia entre las conductividades térmicas, haciendo de esta forma que sean más efectivas las diferencias entre los coeficientes de expansión.

En los modelos realizados, el mecanismo se comporta como era esperable; la temperatura aplicada en las caras de la cuña oscila regularmente, pero la temperatura medida en el interior se evidencia de forma irregular en las primeras iteraciones. Esto puede explicarse por el proceso de difusión térmica. Un cuerpo sometido a un calentamiento y posterior enfriamiento de igual tiempo no restituirá la temperatura inicial a la perfección, ya que el proceso de enfriamiento toma mucho más tiempo para homogeneizar la temperatura. Esta situación genera una fracción de calor remanente en el bloque por ciclo, acumulable pero decreciente en función del tiempo, por lo que se puede ver que el efecto desaparece después de algunas iteraciones.

5.4.3 Análisis de estabilidad en el Monte Masada

A continuación, se estudia la estabilidad de la configuración en el Monte Masada utilizando la fórmula del factor de seguridad (FS) obtenida en el Capítulo 3. El objetivo es estudiar la sensibilidad de las variables para el caso estático. Para cada modelo, se mantuvieron constantes las propiedades termomecánicas de los materiales y se variaron los ángulos [β y η] (Figura 40), la altura H_t (Figura 41) y el coeficiente de fricción μ (Figura 42).

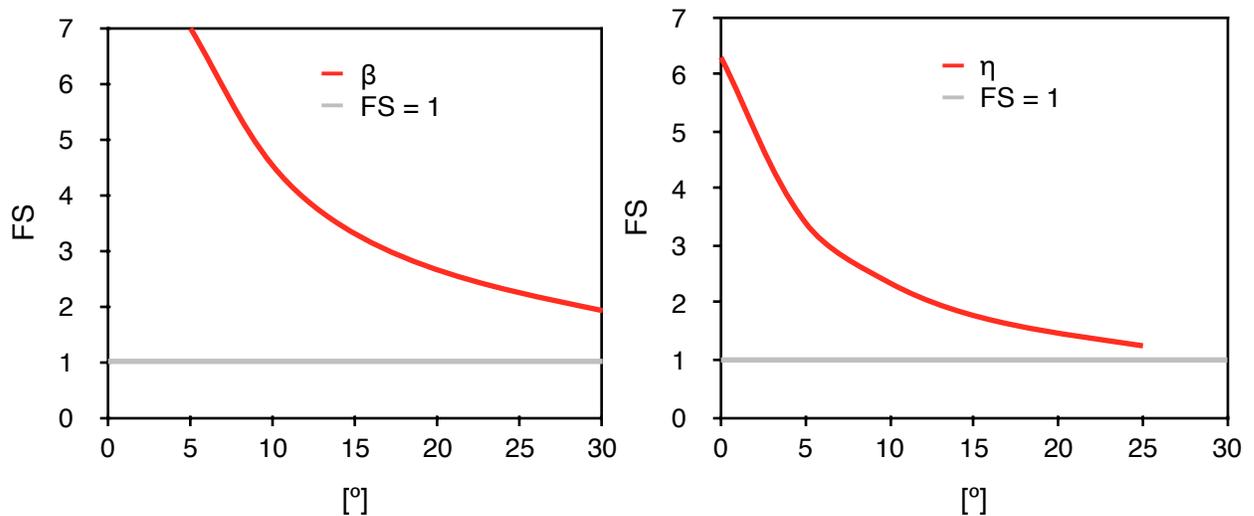


Figura 40. Gráficos de FS vs ángulos η , β

En la Figura 40 se puede apreciar un comportamiento similar al PMMA, en donde la estabilidad del modelo es mucho más sensible a las variaciones en el ángulo η que β . Sin embargo, comparativamente con el modelo de PMMA, es más estable, teniendo un mayor FS para valores similares de los ángulos.

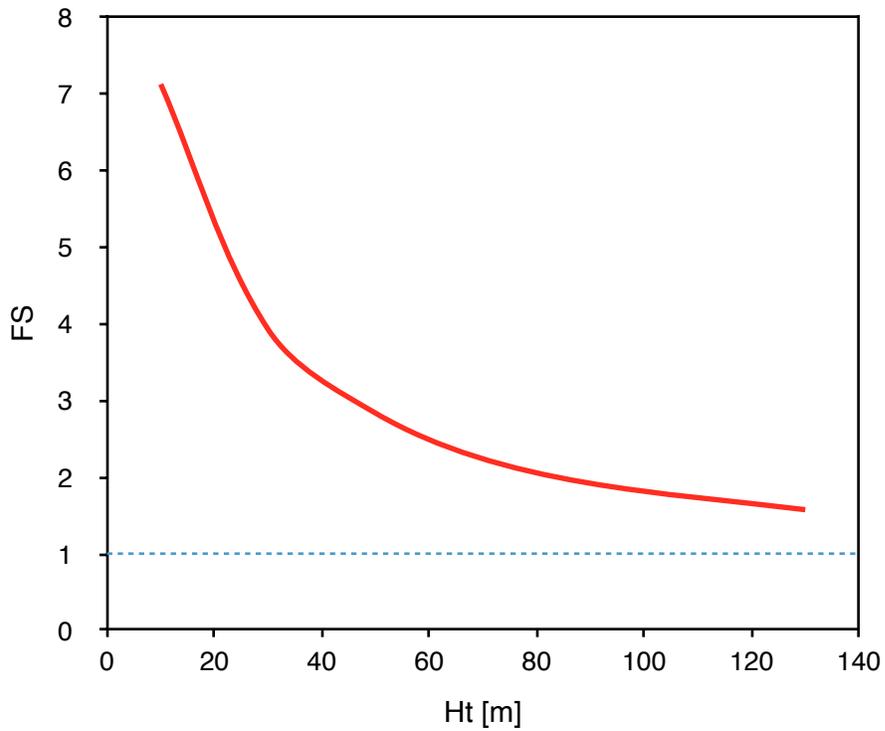


Figura 41. Gráfico de FS vs Ht.

De igual manera que en el modelo de PMMA, el FS decrece a medida que aumenta el valor de la altura total (Figura 41), siendo también más insensible para la altura que para los ángulos β y η . Cabe destacar que este modelo mantiene una estabilidad mucho mayor que el de PMMA ante variaciones en la altura, pudiendo alcanzar alturas de 130 [m] sin ser inestable.

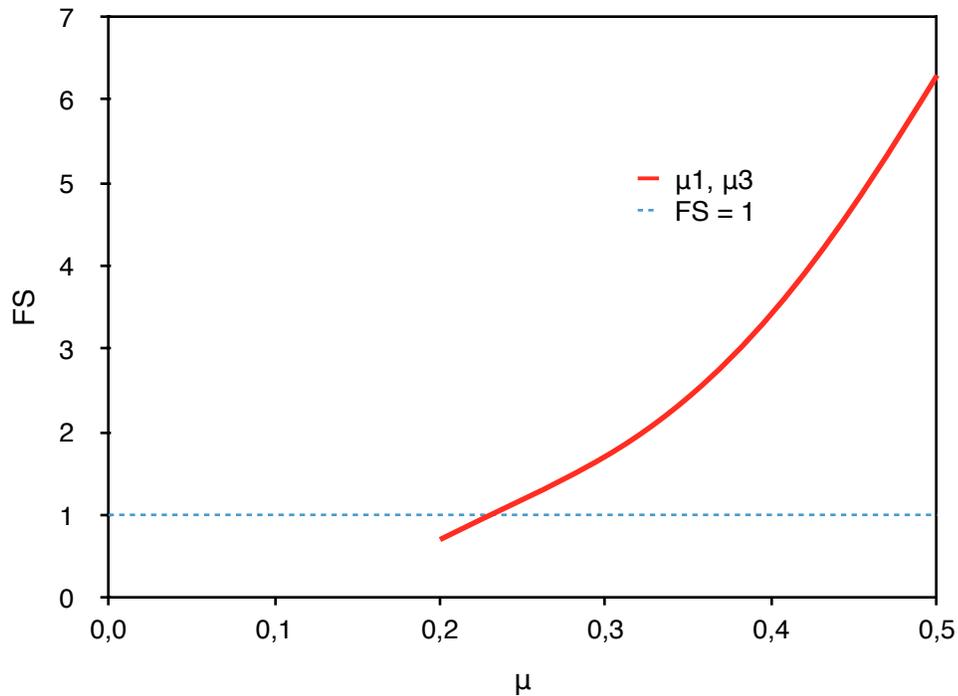


Figura 42. Gráfico de FS vs μ

Para el coeficiente de roce, que es el mismo en todas las interfaces, las tendencias son similares al caso del acrílico, alcanzándose la inestabilidad para coeficientes de roce cercanos a 0,22 (Figura 42). Esto es coherente con los valores referenciales de la dolomita, ya que de lo observado en la bibliografía, los valores del coeficiente de roce oscilan en un rango de 0,5 (Barton 1976) hasta 0,8 (Hatzor 2004).

5.4.4 Desplazamientos acumulados en el Monte Masada

Para verificar que el modelo numérico creado sea congruente con la situación real, se comparan los resultados estimados mediante el modelo numérico con los valores medidos en Hatzor (2003), quien midió valores para el desplazamiento acumulado entre 0.2 [mm/año] y 1.2 [mm/año] aproximadamente.

Con base en los modelos numéricos, el desplazamiento total anual acumulado [Δ^{yr}_{total}] puede estimarse como la suma de dos desplazamientos acumulados en un ciclo anual [Δ^y], producto de la oscilación estacional de temperatura media local, más 365 ciclos

diarios [Δ^{day}], correspondientes a la suma acumulada de los desplazamientos diarios a lo largo del año.

$$\Delta y^{yr}_{total} = \Delta y^{yr} + 365 \Delta y^{day} \quad (29)$$

Si la amplitud térmica diaria para el Monte Masada corresponde a 20 [°C] y la amplitud térmica anual es también 20 [°C], los desplazamientos acumulados son:

$$\Delta y^{yr} = 2.8 \cdot 10^{-4} [m]$$

$$\Delta y^{day} = 1.3 \cdot 10^{-9} [m]$$

Por lo que el desplazamiento total anual acumulado es:

$$\Delta y^{yr}_{total} = 2.8 \cdot 10^{-4} [m]$$

Comparando este valor con los valores medidos, se puede ver que ambos son del mismo orden de magnitud.

6 Discusión

La mayoría de los resultados de los modelos numéricos realizados para el caso $\beta = 0^\circ$ son consistentes con las proyecciones analíticas (2D y 3D) siendo las tendencias encontradas similares. Los modelos numéricos logran aproximar razonablemente la temperatura crítica en los escenarios de largo plazo y las tendencias de decaimiento en función de la razón L_w/L_t . Para los escenarios de corto plazo hay diferencias más significativas que pueden explicarse por la definición de penetración térmica utilizada, teniendo esta más impacto en los periodos menores. Entre los dos tipos de modelos (2D y 3D), el modelo 3D aproxima mejor a las curvas analíticas formuladas que el modelo 2D.

Existe un error numérico asociado a los modelos que en la mayoría de los casos es menor que la magnitud de los desplazamientos acumulados asociados al mecanismo. Sin embargo, en tiempos geológicos, este error puede ser significativo.

Los modelos experimentales pudieron reproducirse de manera aceptable en términos de la magnitud del desplazamiento acumulado, sin embargo la forma de la curva modelada difiere de la observada. Las principales diferencias se observan en el descenso de la cuña, lo que podría atribuirse a la distribución de temperatura al interior de los componentes, la forma del enfriamiento o a un roce no homogéneo a lo largo de los contactos.

Para los casos reales, las propiedades termomecánicas, también evidencian variaciones significativas. La dolomita exhibe valores de difusividad altos comparativamente al granito y basalto, lo que combinado con su coeficiente de expansión hace que esta roca sea más susceptible a sufrir expansión térmica.

Por otro lado, los análisis de sensibilidad y los modelos de casos reales permitieron vislumbrar cuáles son las principales variables que influyen en la estabilidad del sistema bloque/cuña y la acumulación de desplazamiento. Entre ellas se puede considerar:

- Desplazamiento crítico: es una variable principal, ya que corresponde al límite cuando el desplazamiento pasa a ser plástico. Del análisis de sensibilidad se desprende que el desplazamiento acumulado es altamente sensible a su valor, siendo estos inversamente proporcionales. Su estimación es difícil, ya que depende de la fuerza máxima que acepta el sistema antes de deslizar y de la rigidez de la discontinuidad. Al ser menor el límite de la interfaz elasto-plástica, disminuye la temperatura y periodo requeridos para acumular desplazamiento.
- Amplitud térmica: del modelo $\beta = 0^\circ$, se desprende que la amplitud térmica tiene gran importancia ya que determina la máxima expansión que sufrirán los componentes. La amplitud térmica afecta en conjunto con el tiempo de exposición y la difusividad térmica.
- Tiempo de exposición: la cantidad de energía calórica que ingresa al sistema está directamente relacionada con el tiempo durante el cual el sistema está expuesto a la fuente calórica. Ya que se considera una penetración térmica para efectos del cálculo de la expansión, el periodo de exposición también tiene una relación directa con la expansión por ciclo. Esta variable juega un papel clave, ya que en un entorno real se puede considerar que actúan dos ciclos térmicos superpuestos, por un lado, existe una oscilación diaria, producida por el ciclo solar y por otro lado, existe un ciclo estacional de periodo anual, que corresponde principalmente a la variación de la temperatura media. Muchas veces, los tiempos de homogenización de cada material no son alcanzados en las fases de calentamiento diarias, sin incurrir en acumulación de desplazamiento en ellas, produciéndose este efecto de manera más marcada en las fases estacionales.
- Fricción Interna: otra propiedad clave en las discontinuidades es la fricción interna que poseen los distintos materiales, dado que esto mantiene una estricta relación con la resistencia al deslizamiento de las partes. En los modelos simulados, el coeficiente de roce guardaba también relación directa con el desplazamiento acumulado.

- Difusividad térmica: del análisis de sensibilidad y los modelos de roca se puede desprender que la acumulación de desplazamiento es bastante sensible (de manera relativamente lineal) con la difusividad térmica. Esta influencia se ve atenuada cuando el tiempo de exposición supera el tiempo de homogenización en un cuerpo.
- Coeficiente de expansión: análogamente a la difusividad térmica, del análisis de sensibilidad y los modelos de roca se ve que la acumulación de desplazamiento es altamente sensible a los cambios en el coeficiente de expansión.

Las simulaciones realizadas sobre modelos de roca corroboran parte de lo anterior; se pueden ver sus resultados en la Figura 43 para las variaciones diarias y en la Figura 44 para las estacionales. La variable independiente se adimensionalizó con el coeficiente Π_4 , tomando la variable de control en los modelos (amplitud térmica) y ponderándola por el coeficiente de expansión, el largo total y la distancia crítica.

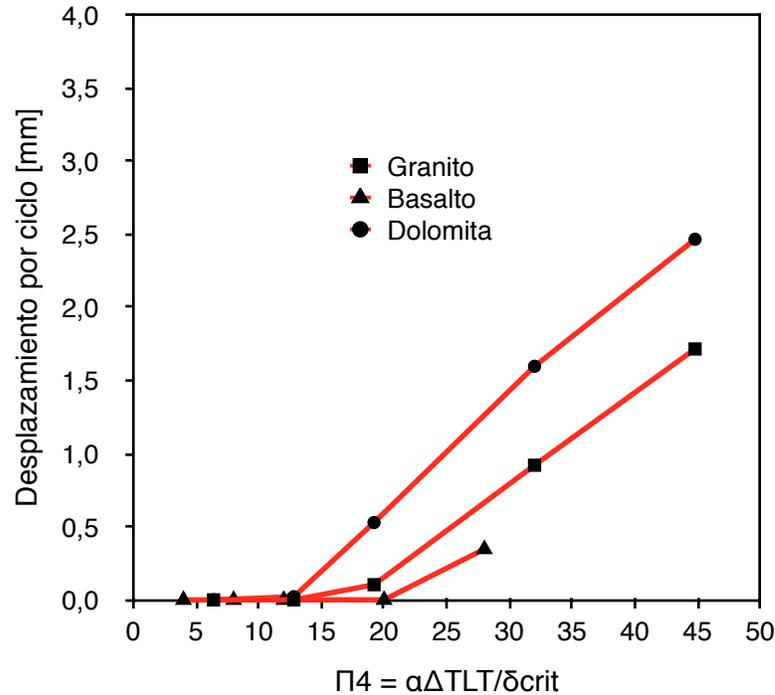


Figura 43. Desplazamiento por ciclo diario para para el granito ($\Pi_1 = 1,7 \cdot 10^{-3}$), el basalto ($\Pi_1 = 1,1 \cdot 10^{-3}$) y la dolomita ($\Pi_1 = 2,3 \cdot 10^{-3}$).

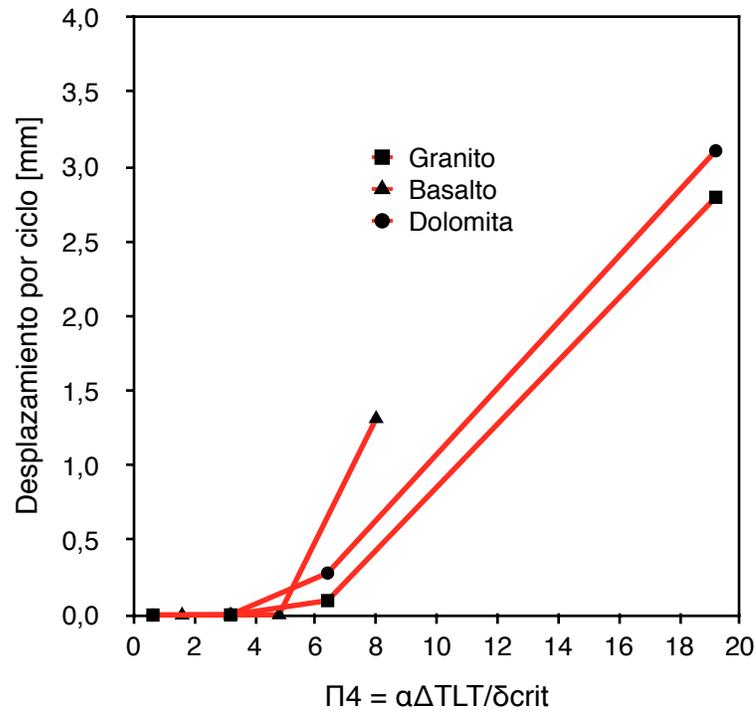


Figura 44. Desplazamiento por ciclo estacional para para el granito ($\Pi_1 = 2,6 \cdot 10^{-1}$), el basalto ($\Pi_1 = 1,6 \cdot 10^{-1}$) y la dolomita ($\Pi_1 = 3,6 \cdot 10^{-1}$).

Para la acumulación diaria de desplazamiento, en el caso del granito, el cambio abrupto de pendiente para el desplazamiento ocurre en torno a los 25-30 [°C], mientras que para el basalto, este es en torno a los 50 [°C] (los cambios abruptos de pendiente representan el inicio de la acumulación). Los valores de desplazamiento anteriores a ese punto se pueden atribuir al error numérico presente.

Por otro lado, para el caso de la acumulación sobre el periodo estacional, se desprende que para las dos primeras amplitudes térmicas en el granito, 1 y 5 [°C], no se observa acumulación de desplazamiento; este comienza a los 10 [°C] aproximadamente, incrementándose drásticamente con el número adimensional Π_4 .

Se aprecian diferencias significativas entre el modelo diario y el estacional en términos de la amplitud térmica requerida, siendo esta considerablemente menor para el ciclo estacional. Una explicación posible a esto tiene base en el concepto de penetración térmica en conjunto con el periodo aplicado a los ciclos.

El tiempo de exposición para homogenizar la temperatura en un cuerpo se define por $0.5L^2/Dt$, por lo que para los distintos tipos de roca tienen valores de 34.6 [hrs], 55.8 [hrs] y 24.9 [hrs] para basalto, dolomita y granito respectivamente. Los tres tiempos son mayores a un día, por lo que la cantidad de energía calórica absorbida en los ciclos diarios (en la fase de calentamiento) es menor a la absorbida en los ciclos estacionales de 12 meses, obteniendo por consiguiente una expansión menor a la máxima admisible por cada tipo de roca. Por lo tanto, la temperatura requerida en un ciclo estacional para lograr acumulación de desplazamiento es menor.

Ahora, en el caso del ciclo de periodo anual, el basalto evidencia la misma tendencia que en el escenario del periodo de un día (versus los otros tipos de roca), requiriendo mucha más temperatura para acumular desplazamiento, en este caso, 30 [°C].

Comparando ambas rocas, el basalto muestra resultados distintos al granito; el modelo comienza a acumular desplazamiento en torno a los 70 [°C], lo cual es considerablemente más grande, siendo valores mas difíciles de obtener en condiciones reales. La explicación a esta diferencia se encuentra en las propiedades termomecánicas del basalto, como su conductividad térmica es aproximadamente un 66% de la del granito, ante periodos iguales de exposición, su penetración térmica es menor. Una menor penetración térmica implica una menor expansión, por lo que el desplazamiento sobre sus discontinuidades será menor. Por otro lado, el coeficiente de expansión del basalto es de aproximadamente un 62,5% del coeficiente de expansión del granito, por lo que ante una amplitud y penetración térmica similares, su expansión será menor. Considerando lo anterior, los resultados son consistentes con lo esperable, concluyéndose que el basalto muestra menos susceptibilidad a acumular desplazamiento plástico que el granito.

Finalmente, para la dolomita, el cambio de pendiente ocurre en torno a los 20 [°C], siendo consistente con las condiciones reales climáticas del Monte Masada, considerando que la temperatura en las caras externas de la roca tenderá a ser mas alta que la temperatera ambiental.

Para efectos de la verificación del modelo, se puede concluir satisfactoriamente que se estima bastante bien el valor de la acumulación de desplazamiento por año para el caso del Monte Masada.

7 Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones del trabajo son:

- Abaqus logra reproducir de manera aceptable el fenómeno de acuñaamiento térmicamente inducido de manera acoplada, tanto para el modelo experimental de acrílico como para los casos reales de roca.
- Las temperaturas críticas obtenidas numéricamente para los modelos con $\beta = 0^\circ$ son consistentes con los valores analíticos bajo un régimen estacional, pero presenta algunas diferencias en el régimen diario, debido principalmente a la definición adoptada de penetración térmica.
- Los factores más importantes de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado son el desplazamiento crítico, el coeficiente de roce de las discontinuidades, la difusividad térmica, el coeficiente de expansión, el periodo de exposición y la amplitud térmica, en donde la magnitud del desplazamiento acumulado es inversamente proporcional al desplazamiento crítico y los coeficientes de roce y directamente proporcional al desplazamiento térmico (coeficiente de expansión, difusividad térmica y la amplitud térmica) y el periodo de exposición. Las variables que evidencian una menor sensibilidad poseen menor efecto sobre la acumulación de desplazamiento.
- El modelo numérico no captura la forma de la curva de desplazamiento observada experimentalmente, sin embargo, los órdenes de magnitud son similares, por lo que el fenómeno se reproduce de manera aceptable.
- Los modelos numéricos de casos reales evidencian una mayor acumulación de desplazamiento bajo un régimen estacional que bajo un régimen diario para las mismas propiedades de los materiales.
- El modelo numérico para la dolomita aproxima con bastante precisión el desplazamiento medido in-situ en el Monte Masada por Hatzor (2003).

- Los factores de seguridad obtenidos para los casos reales muestran que las condiciones de los casos reales son mucho más estables ($FS = 7$) que el caso experimental ($FS = 3$). De las variables estudiadas, se desprende que el factor de seguridad es más sensible a las variaciones en el manto de la base y a los coeficientes de roce en los contactos que al ángulo de separación de la base con el bloque y la altura. Sin embargo, ambos sistemas son estáticamente estables bajo los parámetros de referencia utilizados.

Finalmente, se recomienda para futuras investigaciones:

- Ahondar en las propiedades de las discontinuidades y considerar factores adicionales en el modelo numérico que pudiesen afectar al estado de esfuerzo de los componentes del sistema (presencia de fluidos, actividad sísmica, presencia de alteración, presencia de estructuras, mineralización en las discontinuidades, entre otras).
- Usar elementos de contacto para modelar las interacciones entre los componentes del sistema con el fin de obtener mayor precisión y un mejor acercamiento a la realidad.
- Expresar los estados de esfuerzo y deformación mediante otros tipos de modelo constitutivo (elasto-plástico, perfectamente plástico, etc), tanto para las discontinuidades como para la roca intacta, con el fin de aproximarse mejor al comportamiento real de los materiales. Adicionalmente, se recomienda estudiar la incursión en el rango plástico de los componentes del sistema.

8 Bibliografía

Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y. H., Glaser, S. D., and Carlos Santamarina, J. (2013). "Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61(0), 196-211.

Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1986). *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, New York, NY.

Cundall, P. A. (1980). "UDEC-A Generalised Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock." Peter Cundall Associates Report, European Research Office, U.S. Army, Contract DAJA37-79-C-0548.

Gischig, V. S., Moore, J. R., Evans, K. F., Amann, F., and Loew, S. (2011). "Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4), F04010.

Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., and Guglielmi, Y. (2005). "Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France)." *Int. J. Rock Mech. Min.*, 42(3), 331-349.

Hatzor, Y. H. (2003). "Keyblock stability in seismically active rock slopes - Snake Path Cliff, Masada." *J. Geotech. Geoenviron.*, 129(8), 697-710.

Hernández, A. (2014). "Mecanismo de Cuña Inducido Térmicamente - Estudio Experimental"

Jing, L. (2003). "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353.

Jing, L., Tsang, C. F., and Stephansson, O. (1995). "DECOVALEX—An international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for

safety analysis of radioactive waste repositories." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(5), 389-398.

Lee, H. S., Park, Y. J., Cho, T. F., and You, K. H. (2001). "Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 967-980.

Matsuoka, N. (2001). "Direct observation of frost wedging in alpine bedrock." *Earth Surf. Proc. Land.*, 26(6), 601-614.

Moreno, F., and Froese, C. R. (2007). "Turtle Mountain field laboratory (TMFL): Part II - Review of trends 2005-2006." *Landslides and society: Proceedings of the First North American Conference on Landslides*, A.

K. Turner, and R. L. Schuster, eds., Alberta Geological Survey, Vail, Colorado. Oldecop, L. A., and Alonso, E. E. (2004). "Testing rockfill under relative humidity control." *Anglais*, 27(3), 10.

Pasten, C. (2013). "Geomaterials subjected to repetitive loadings: Implications on energy systems." Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

Shi, G. H. (1988). "Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of block systems " Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.

Vargas, E. A. J., Velloso, R., Chávez, L., Gusmão, L., and Amaral, C. (2013). "On the Effect of Thermally Induced Stresses in Failures of Some Rock Slopes in Rio de Janeiro, Brazil." *Rock Mech Rock Eng*, 46(1), 123-134.

Vlcko, J., Brcek, M., Varilova, Z., and Zvelebil, J. (2009). "Deformation monitoring at cultural and natural heritage sites." *World Danxia, 2nd Collection, First International Symposium on Danxia Landform*, 26-28 May, J. Huang, ed. Danxiashan, Guangdong, China, 317-324.

Watson, A. D., Moore, D. P., and Stewart, T. W. "Temperature influence on rock slope movements at Checkerboard Creek." Proc., Ninth International Symposium on Landslides, 1293-1298.