



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**MECANISMO DE ACUÑAMIENTO INDUCIDO TÉRMICAMENTE  
ESTUDIO EXPERIMENTAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN  
ESTRUCTURAS, CONSTRUCCIÓN Y GEOTECNIA

ANTONIO ALEJANDRO HERNÁNDEZ IRAIRA

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

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

SANTIAGO DE CHILE

AÑO 2014

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en  
Estructuras, Construcción y Geotecnia.  
**POR:** Antonio Alejandro Hernández Iraira.  
**FECHA:** 02/06/2014  
**PROFESOR GUÍA:** César Pastén Puchi.

## **MECANISMO DE ACUÑAMIENTO INDUCIDO TÉRMICAMENTE: ESTUDIO EXPERIMENTAL**

El presente trabajo estudia experimentalmente el mecanismo de acuñamiento inducido térmicamente descrito por Pastén (2013), el que explica la acumulación de desplazamientos en taludes de roca sometidos a cambios cíclicos de temperatura superficial. El objetivo del trabajo es validar experimentalmente el mecanismo de acuñamiento y determinar las condiciones geométricas y patrones de difusión térmica que lo exacerban. El modelo experimental contempla el uso de un modelo físico que consiste en un sistema bloque-cuña de acrílico que reacciona en un marco rígido de aluminio montado dentro de un contenedor térmicamente aislado con un sistema interno de control de temperaturas.

El diseño experimental del sistema contempla la elección de los materiales constituyentes, el dimensionamiento de las piezas de acrílico, la elección de los sensores de desplazamiento y temperatura, el estudio de la estabilidad del bloque frente al deslizamiento y volcamiento, y el análisis térmico. Las variables experimentales que considera este trabajo son el ángulo de inclinación de la base y la amplitud de temperaturas y el periodo del ciclo térmico.

Los resultados obtenidos del modelo experimental confirman la directa proporcionalidad entre el periodo cíclico y la amplitud de temperatura al interior del acrílico. Además, se determina que los desplazamientos plásticos por ciclo del sistema son proporcionales a la amplitud de temperatura al interior del acrílico. Finalmente, se obtiene que el sistema acumula desplazamientos en la etapa cíclica y en la de enfriamiento final.

*Dedico esta memoria con todo mi cariño y amor a las personas importantes en mi vida,  
aquellas que me han permitido soñar y me han brindado su apoyo en todo momento.*

*Familia y amigos*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco hoy y siempre a mi familia, la que en todo momento me ha entregado su apoyo incondicional, con palabras de aliento y consejos que me han permitido ir superando los distintos obstáculos que se me han presentado en el camino. Agradezco a mi madre, por ser una mamá única, por enseñarme día a día como ser mejor persona y por demostrarme que nada es imposible si se hace con amor, perseverancia y optimismo. Agradezco al resto de mi familia, por compartir su cariño sin importar la distancia que muchas veces nos separa. Agradezco también a mi pequeño y gran amigo Lupo, que sin necesidad de darme consejos ni palabras siempre me ha entregado alegrías y momentos de felicidad.

Agradezco a mis amigos de la vida, lo que siempre me han apoyado y permanecido a mi lado, quienes me han ayudado a mantener los brazos y la sonrisa en alto en todo momento. Agradezco a mis amigos de la geopecera, a la Maca, a la Pancha, al Manu, al Abuelo y al gran Nacho Cartes.

Agradezco a todas las personas que me ayudaron en este trabajo, especialmente al Omar y al Mario del Laboratorio de Sólidos, y a Don Pedro y al Víctor del Laboratorio de Dinámica de estructuras. Agradezco a mi Profesor guía por su ayuda y tiempos dedicados en la confección de esta memoria.

Esto no hubiese sido posible sin la ayuda de todos ustedes y muchas personas más, les agradezco de todo corazón.

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

## Tabla de Contenido

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

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

## Índice de Tablas

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

## Índice de Figuras

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

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

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

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

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

## 1. Introducción

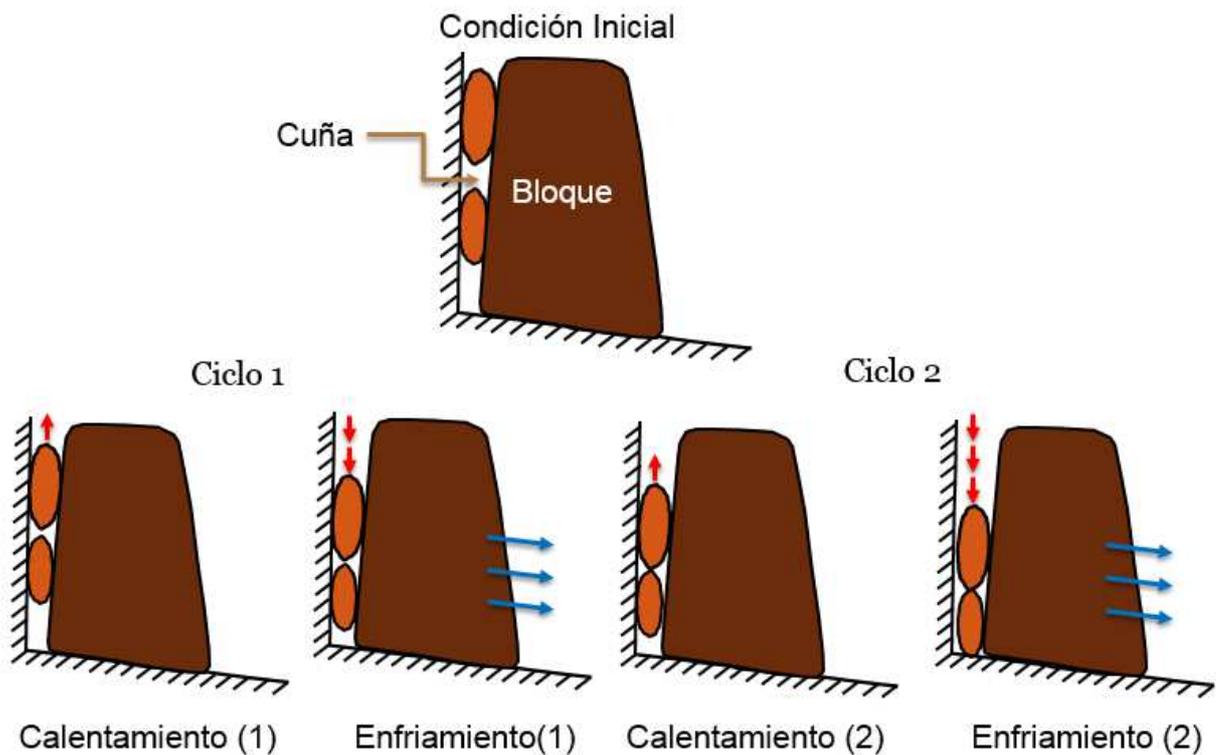
Los taludes en roca son propensos a perturbaciones de corto, mediano y largo plazo, como terremotos, cambios cíclicos de temperatura y el desgaste progresivo por erosión de la superficie de la roca, respectivamente. Los estudios de fallas en discontinuidades preexistentes en taludes de rocas suelen considerar como principales factores desencadenantes de deformaciones a perturbaciones de corto plazo, como los sismos, porque inducen deformaciones apreciables de gran magnitud. Sin embargo, distintas investigaciones han demostrado que los cambios cíclicos de temperatura superficial diarios y estacionales son capaces de generar desplazamientos acumulados sistemas rocosos pudiendo paulatinamente ocasionar la falla de un talud. Recientemente, se han desarrollado investigaciones acerca de los efectos térmicos superficiales en los desplazamientos de taludes de roca que han demostrado que cambios cíclicos de temperatura son responsables de la generación de desplazamientos plásticos en sus discontinuidades (Hatzor et al. 2003) y Gunzburger et al. (2005).

Este trabajo de título estudia experimentalmente el mecanismo de acuñaamiento inducido térmicamente descrito por Pastén (2013), el que explica la acumulación de desplazamientos en un sistema rocoso formado por un bloque y cuña cuando es sometido a cambios cíclicos de temperatura superficial. Al aumentar la temperatura, el bloque se expande y reacciona con la cuña posterior, lo que ocasiona que la cuña ascienda. Cuando desciende la temperatura, el bloque y la cuña se contraen, lo que provoca que la junta se abra y la cuña descienda alcanzando un nuevo estado de reposo. Una descripción gráfica del mecanismo se indica en la Figura 1.

El modelo experimental contempla el uso de un modelo físico que consiste en un sistema bloque-cuña de acrílico que reacciona en un marco rígido de aluminio, que se monta dentro de un contenedor térmicamente aislado de poliestireno expandido. El objetivo general del trabajo es validar experimentalmente el mecanismo de acuñaamiento inducido térmicamente. Los objetivos específicos corresponden a estudiar la estabilidad del sistema frente al deslizamiento y volcamiento, cuantificar los desplazamientos acumulados al inducir cambios cíclicos de temperatura en el sistema, determinar las condiciones geométricas y los patrones de difusión térmica que exacerban el mecanismo

y analizar los efectos sobre los desplazamientos de la amplitud y el periodo de los cambios térmicos.

Este trabajo se divide en siete capítulos. El segundo capítulo muestra la revisión bibliográfica asociada al mecanismo. En el tercer capítulo se presenta el diseño experimental, indicando los materiales constituyentes del modelo, los sensores y los equipos de adquisición de datos. Además, se incluye un análisis de la estabilidad frente al deslizamiento y volcamiento del sistema. El cuarto capítulo indica y analiza los resultados experimentales de los registros completos y de las etapas térmicas. El quinto capítulo contiene las discusiones del trabajo. El sexto capítulo presenta las recomendaciones y conclusiones del estudio. Finalmente, el último capítulo corresponde a la bibliografía.



**Figura 1:** Descripción del mecanismo de cuña inducido térmicamente.

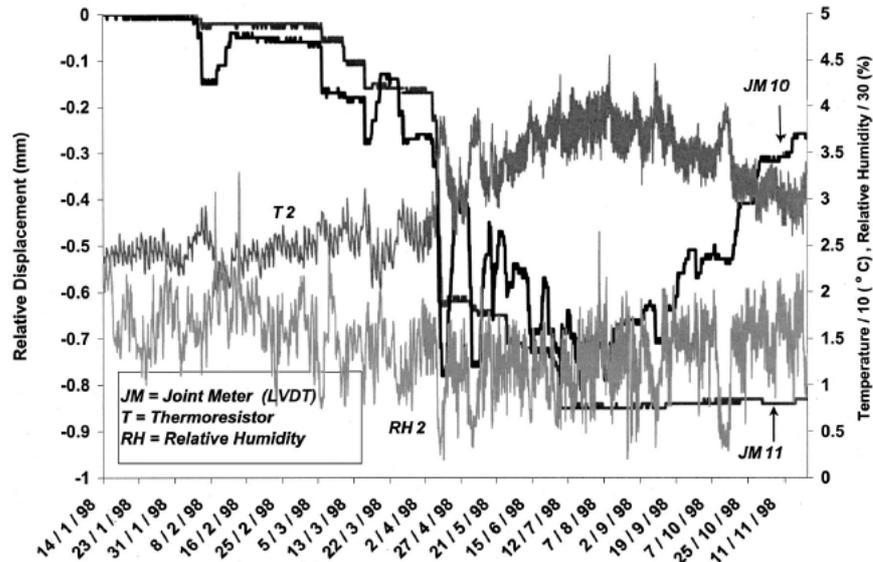
## 2. Revisión Bibliográfica

El fenómeno de inestabilidad de sistemas rocosos por efectos térmicos se ha estudiado en el monte Masada, Israel, por Hatzor (2003) y Bakun-Mazor et al. (2013); en Rochers de Valabres, Francia, por Gunzburger et al. (2005); y en Randa, Suiza, por Gischig et al. (2011).

Hatzor (2003) estudió en el monte Masada la estabilidad de tres taludes de rocas que presentaban una tendencia a acumular desplazamientos a lo largo del tiempo. La falla característica de los bloques de roca era el deslizamiento a través de planos de estratificación en la base. Los bloques fueron instrumentados para registrar en las juntas los desplazamientos, esfuerzos, humedades relativas y temperaturas. Durante la campaña en terreno se midieron desplazamientos en los bloques de 0.003 mm/día o 1,2 mm/año en promedio, con un peak de 0.8 mm en sólo tres días. El coeficiente de roce en las juntas de los bloques era  $\mu = 0.42$  y el ángulo del plano de deslizamiento era  $\alpha = 20^\circ$ , resultando en un factor de seguridad estático igual a  $FS = 1.17$ . Este resultado sugirió que los bloques se encontraban ajustadamente en equilibrio estático, por lo que se esperaba que fuesen inestables bajo cargas dinámicas. Utilizando el método de Newmark et al. (1965), se estimó que la aceleración horizontal sísmica límite para provocar el deslizamiento del bloque correspondía a 0.05 g, la aceleración provocada por un sismo de magnitud 4.5 con epicentro a no más de 20 km del sitio (Abrahamson et. al 1997). Sin embargo, se registraron tan sólo dos eventos sísmicos de magnitud 4.4 y 4.3, con un epicentro a 250 km del sitio. De esta manera, el peak de desplazamiento registrado no pudo haber sido ocasionado por la actividad sísmica del lugar.

Debido a lo anterior, se estudió una causa alternativa que justificara los desplazamientos de los bloques, considerándose los efectos de la temperatura y la humedad. Las fechas de las fluctuaciones climáticas registradas en cada bloque coincidieron con aquellas donde se registraron los mayores desplazamientos, lo que sugirió que la causa fuese climática (Figura 2). En efecto, se mostró que los efectos climáticos provocaron desplazamientos considerables en los bloques de hasta 0,8 mm, parte de los cuales no se recuperaron al final de la temporada. Finalmente, se concluyó que los ciclos de

temperatura pueden producir acumulación de desplazamientos a lo largo de las discontinuidades durante un largo periodo de tiempo.

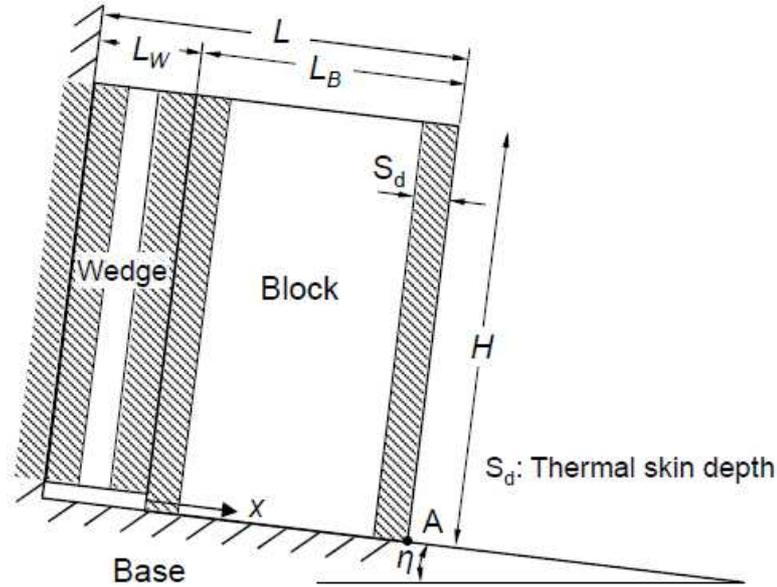


**Figura 2:** Registro de temperatura (T2) y humedad relativa (RH2) superpuesto con los desplazamientos relativos de uno de los bloques en Masada (JM10 y JM11) durante un periodo de 11 meses (Hatzor et al. 2003).

Pastén (2013) propuso un mecanismo de cuña inducido térmicamente, el cual era capaz de predecir los desplazamientos acumulados que se han observado en bloques de taludes rocas sometidos a cambios cíclicos de temperatura, tales como los observados en el monte Masada. El mecanismo considera un bloque sobre un plano inclinado y en contacto con una cuña en su junta posterior (Figura 3), además de difusión de calor unidimensional desde los bordes de los elementos hacia su interior debido a los cambios de temperatura ambiental.

Al calentar el sistema, la expansión térmica restringida en la base del bloque podía generar desplazamientos plásticos en el contacto. En el periodo de enfriamiento, el bloque se contraía, incrementando la separación de la junta posterior del bloque, lo que permitía que la cuña descendiera hasta una nueva posición de equilibrio. La sucesión de ciclos térmicos permitía la acumulación de desplazamientos en la base del bloque y la caída de la cuña. La solución analítica planteada para el mecanismo predice que la

máxima diferencia de temperatura  $\Delta T_{\max}$  que el sistema puede sostener sin desarrollar un desplazamiento plástico en la base del bloque es:



**Figura 3:** Modelo simplificado para el análisis del mecanismo cuña-bloque (Pastén 2013). El área sombreada corresponde a la profundidad de penetración térmica  $S_d$ .

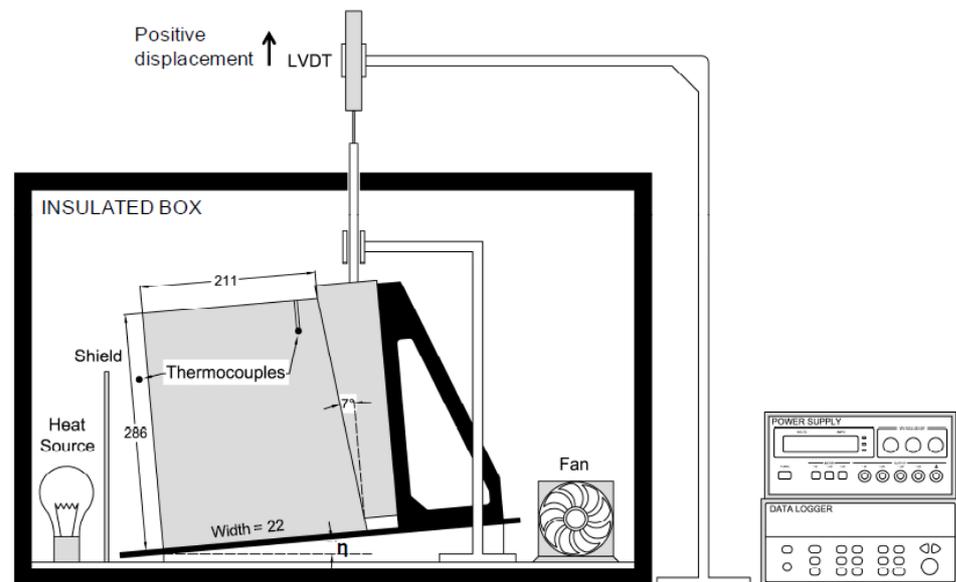
$$\Delta T_{\max} \approx \frac{1}{\alpha} \cdot \left(1 + \frac{L_W}{L_B}\right) \cdot (\mu \cdot \cos(\eta) - \sin(\eta)) \cdot \frac{H}{d(t_{\text{exp}})} \cdot \frac{\delta_c \cdot L_B}{F_{\max}} \cdot \gamma_r \quad (2-1)$$

$$d(t_{\text{exp}}) = \begin{cases} 4 \cdot \beta \cdot S_d & t_{\text{exp}} < 0.5 \cdot L_W^2 / D_T < 0.5 \cdot L_B^2 / D_T \\ L_W + 2 \cdot \beta \cdot S_d & 0.5 \cdot L_W^2 / D_T < t_{\text{exp}} < 0.5 \cdot L_B^2 / D_T \\ L_W + \xi \cdot L_B + \beta \cdot S_d & 0.5 \cdot L_W^2 / D_T < 0.5 \cdot L_B^2 / D_T < t_{\text{exp}} \end{cases} \quad (2-2)$$

Donde  $H$  es la altura del bloque,  $L_W$  es el largo de la cuña,  $L_B$  es el largo del bloque,  $\mu$  es el coeficiente de fricción en la base del bloque,  $\eta$  es el ángulo de inclinación de la base,  $\gamma_r$  es el peso específico de la roca,  $\delta_c$  es el desplazamiento elástico límite del bloque en la base,  $F_{\max}$  es la máxima fuerza por unidad de largo paralelo a la base que la resistencia del bloque a la fricción puede soportar,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica de la roca,  $D_T$  es el coeficiente de difusividad térmica de la roca,  $S_d$  es la profundidad de penetración térmica y  $t_{\text{exp}}$  es el tiempo de exposición del sistema a una temperatura exterior.

El coeficiente  $\beta < 1$  considera la distribución no uniforme de temperatura dentro de  $S_d$ . El término  $\xi$  se incorpora para considerar la expansión térmica libre de la parte derecha del bloque que no restringe la expansión térmica del elemento. Si el cambio de temperatura inducido al sistema  $\Delta T$  excede  $\Delta T_{max}$  entonces se desarrolla un desplazamiento plástico  $\delta_j^P$  en la base del bloque igual a  $\delta_j^P = \delta_T - \delta_\sigma - \delta_c$ , donde  $\delta_T$  es el desplazamiento causado por la expansión térmica libre de la roca y  $\delta_\sigma$  es la contracción elástica debido a la fuerza  $F_{max}$ .

Pastén (2013) validó experimentalmente la solución analítica del mecanismo usando un modelo bloque-cuña de acrílico que reacciona sobre una escuadra de aluminio (Figura 4). El modelo experimental se encontraba montado al interior de un contenedor de poliestireno expandido, con el fin de evitar el flujo libre de calor con el exterior y poder regular las variaciones internas de temperatura. El modelo se sometía a ciclos de temperatura controlados por un termostato, y se registraban los desplazamientos y temperaturas por medio de un LDVT y termocuplas, respectivamente. El estudio experimental consideró la variación de distintos parámetros de entrada, tales como los ángulos de inclinación  $\eta$ , tiempos de exposición  $t_{exp}$ , y la temperatura media y amplitud de cada ciclo térmico.



**Figura 4:** Modelo experimental del mecanismo de cuña inducido térmicamente utilizado por Pastén (2013).

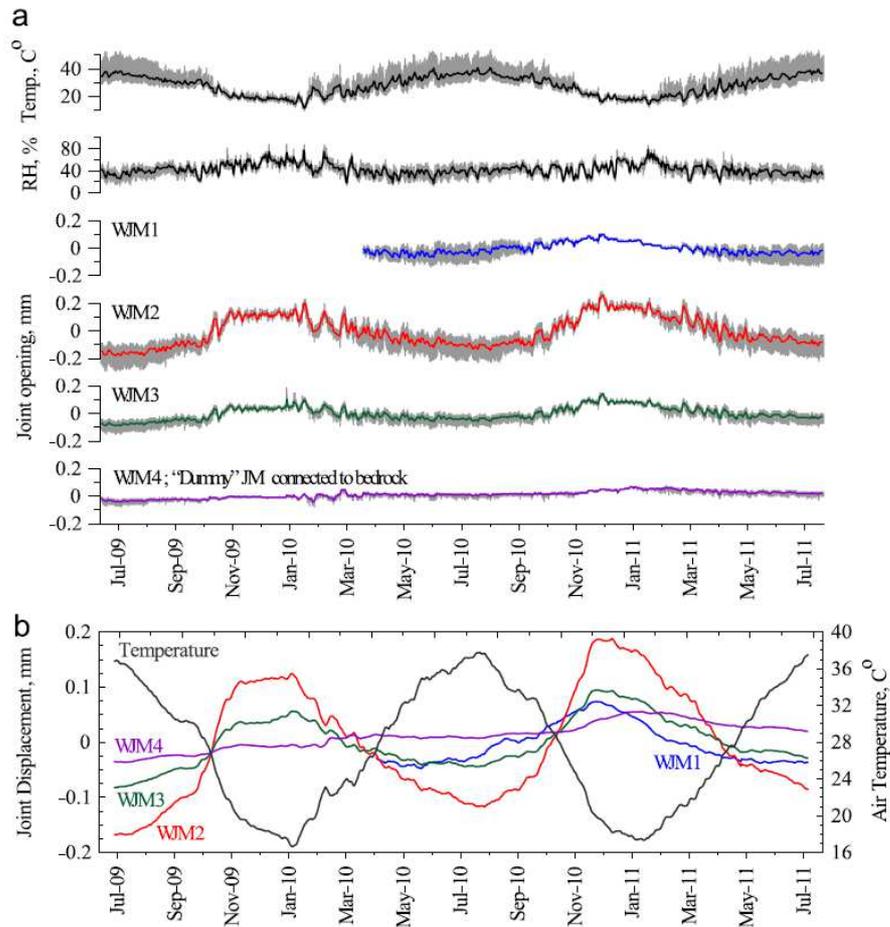
Se logró comprobar tanto analíticamente como experimentalmente que los desplazamientos plásticos térmicamente inducidos en las juntas combinados con efectos de acuñamiento pueden causar una acumulación gradual de desplazamientos en el bloque. Además, se demostró que la acumulación de desplazamientos se exagera con el aumento de la amplitud del cambio de temperaturas  $\Delta T$ .

Bakun-Mazor et al. (2013) monitorearon distintos bloques en caras opuestas de la montaña en Masada. En este trabajo se midieron deformaciones y temperaturas en un bloque del lado Oeste, y además se analizaron los registros de los bloques ubicados en la cara Este de Masada, que ya habían sido estudiados por Hatzor et al. (2003). El periodo de registro de datos de la estación Oeste fue desde julio 2009 hasta agosto 2011. Como principal caso de estudio se consideró un bloque en la cara Este, el cual registraba un desplazamiento acumulado de 200 mm desde el año 1998. De los datos registrados en la estación Este, se observó que existía una relación directa entre el incremento de la temperatura del aire con un cierre acumulado de las juntas de todos los bloques. Con respecto a los datos de la estación Oeste, que contenía varios ciclos estacionales, se observó que existía una fuerte relación entre el cierre y apertura de las juntas con el calentamiento y enfriamiento del aire respectivamente, identificándose deformaciones plásticas en los registros (Figura 5).

Con el objetivo de identificar la principal causa del desplazamiento de 200 mm en el bloque Este, se calcularon las deformaciones térmicas usando la solución analítica unidimensional del mecanismo propuesta por Pastén (2013). Se determinó un desplazamiento entre 0.18 y 0.26 mm/año dependiendo del coeficiente de expansión térmica.

Por otro lado, los autores elaboraron un estudio del comportamiento sísmico del sistema por medio de un "Análisis de Deformaciones Discontinuas" (DDA) (Shi 1988). Considerando un epicentro a 1 Km de Masada, se esperaba un desplazamiento menor que 42 mm para sismos moderados ( $M \leq 6.5$ ), mientras que para sismos fuertes ( $M \geq 7.0$ ) el bloque se desplazaría más de 447 mm a lo largo de la pendiente. Luego, revisando el registro sísmico histórico del lugar y relacionando la magnitud con los periodos de ocurrencia de los sismos, fue posible inferir tasas de desplazamientos anuales de 0.04

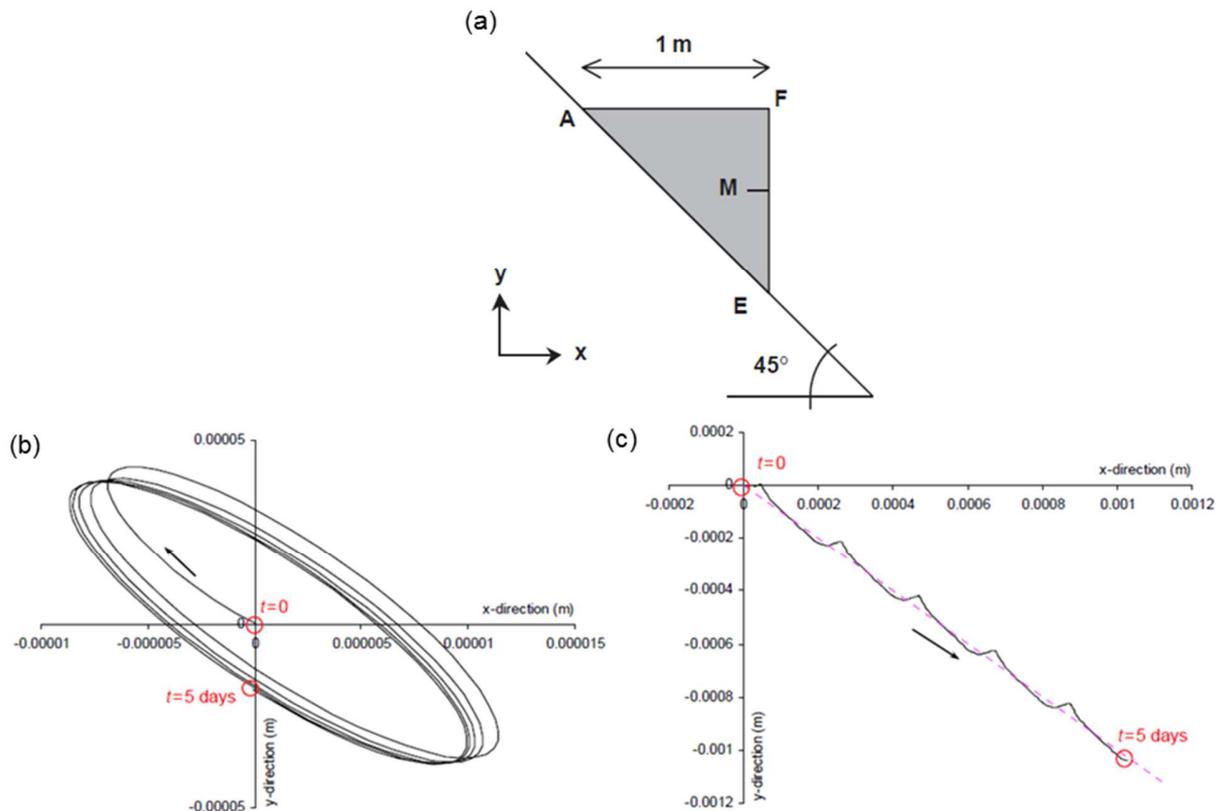
mm/año y 0.110 mm/año para los sismos moderados y fuertes, respectivamente. Vale recalcar que estos valores consideraban un epicentro más cercano que los factibles en el lugar. De esta manera, se determinó que el mecanismo inducido térmicamente era dominante sobre el inducido sísmicamente, debido a que generaba mayores desplazamientos anuales y justificaba los 200 mm acumulados en el bloque Este.



**Figura 5:** Registro de la estación Oeste en Masada desde julio 2009 a agosto 2011 (Bakun-Mazor et al. 2013). (a) Registros originales de humedad relativa medidos cada 2 horas. (b) Temperatura y desplazamiento de las juntas (WJM) en el tiempo.

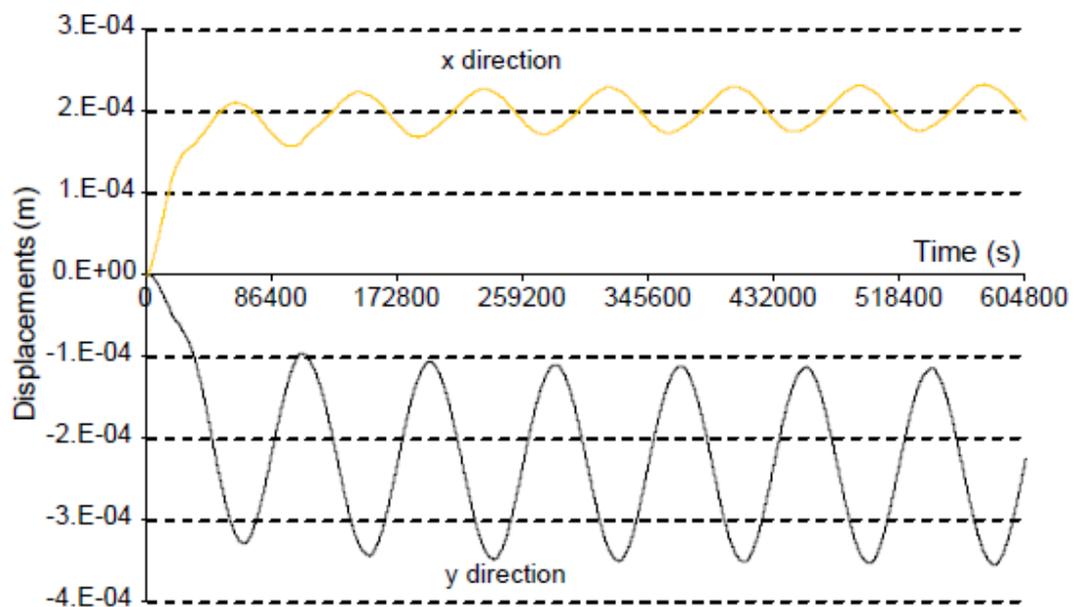
Gunzburger et al. (2005) investigaron las fallas por deslizamiento y volcamiento en taludes de roca en *Rochers de Valabres*, en la región de los Alpes, al sur de Francia. Su principal objetivo consistía en analizar la influencia de los cambios térmicos diarios en la superficie de la roca como agente causante de los desplazamientos en los taludes. En

primer lugar, se realizó un análisis numérico con el software UDEC versión 3.3 (Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, 2003) para determinar los efectos termomecánicos en las deformaciones por medio de un modelo simple de bloque triangular sobre un plano inclinado  $45^\circ$  sometido a cambios cíclicos sinusoidales de temperatura (Figura 6 a). El análisis inicialmente se desarrolló asumiendo un comportamiento elástico en las juntas, y luego se consideró el caso elastoplástico. Se estudiaron puntos específicos del modelo con el fin de realizar comparaciones entre los comportamientos de ambos casos. El análisis elástico arrojó que tras un cierto número de ciclos térmicos la trayectoria del punto se aproximaba a una curva cerrada, lo que demuestra que se alcanzó un régimen periódico estable de desplazamientos (Figura 6 b). Con respecto al análisis plástico, se determinó que se acumulaban los desplazamientos (Figura 6 c).



**Figura 6:** (a) Modelo conceptual de bloque triangular. Trayectoria del punto F del bloque triangular respecto a su posición inicial bajo condiciones (a) elásticas y (b) elastoplásticas (Gunzburger et al. 2005).

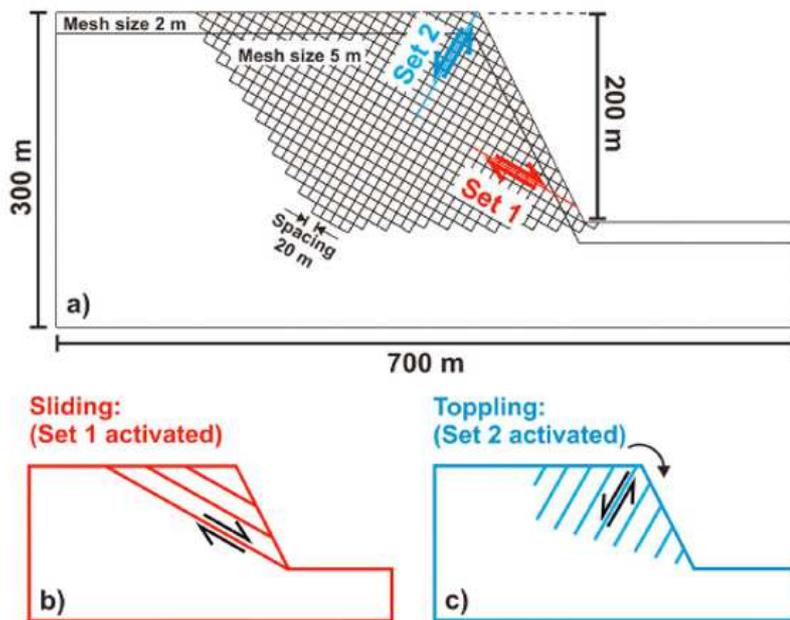
Posteriormente, se desarrolló un modelo numérico bidimensional simplificado del talud de Rochers de Valabres. Tal como en el modelo de bloque triangular, se estudió el desplazamiento puntual del modelo cuando es sometido a cambios cíclicos sinusoidales de temperatura bajo condiciones termoelásticas y termoplásticas. En el análisis termoelástico se alcanzó un régimen periódico estable de desplazamientos, semejante al obtenido en el modelo del bloque triangular. En el análisis plástico, se observó inicialmente un desplazamiento permanente debido a las deformaciones plásticas en las juntas, pero luego el desplazamiento se estabiliza y alcanza un comportamiento periódico estable de desplazamientos con una leve deriva (Figura 7). De lo anterior, se determinó que los cambios cíclicos superficiales de temperatura son capaces de generar desplazamientos acumulados en el sistema, pero el efecto se atenúa a medida que la profundidad de penetración térmica es menor, lo que ocurre cuando el sistema es sometido a breves ciclos de temperatura superficial. Por ejemplo, para las fluctuaciones de temperatura diarias las profundidades de penetración térmica son menores que para los cambios de temperatura estacionales.



**Figura 7:** Trayectoria puntual del modelo simplificado de Rochers de Valabres bajo condiciones elastoplásticas (Gunzburger et al. (2005).

Gischig et al. (2011a) desarrollaron un modelo numérico bidimensional simplificado de un talud rocoso sometido a cambios térmicos superficiales utilizando el software UDEC (Universal Distinct Element Code, Versión 4.0, Itasca International, Inc., 2008). Su objetivo consistía en analizar las deformaciones al interior de la roca debido a cambios de temperatura inducidos desde el exterior. La principal motivación fue la observación de las variaciones estacionales de las tasas de desplazamiento de un talud de roca ubicado en Randa, Suiza. Se identificaron los principales tipos de falla presentes en el talud según su ubicación: deslizamiento a lo largo de fallas en la parte inferior (Set 1) y volcamiento en la zona superior (Set 2), ambas configuraciones indicadas en la Figura 8. La simulación se desarrolló considerando en las discontinuidades comportamientos perfectamente elásticos y elastoplásticos. En la condición elastoplástica, una vez alcanzada la falla por corte en las discontinuidades, el comportamiento post-deslizamiento se supuso gobernado por distintas leyes constitutivas, considerándose que la fricción y cohesión del material decayeran inmediatamente después de la falla (*con debilitamiento*) o permanecieran constantes (*sin debilitamiento*). El modelo consideraba los valores de difusión térmica y coeficiente de expansión térmica constantes. Como condiciones de borde, se asumió que en la base la temperatura permanecía constante a 0°C y que en los costados no había flujo de calor. Se aplicó una función sinusoidal de temperaturas en la superficie del talud rocoso, con una amplitud de 15°C y un periodo de un año.

La modelación elástica consideró un total de 10 años de aplicación del ciclo térmico. Se observó que tras los primeros años de aplicación del ciclo térmico, se alcanzó un régimen periódico estable de desplazamientos en ambas direcciones. La amplitud máxima peak-to-peak de desplazamiento horizontal fue de 1.2 mm en la superficie, decayendo a 0.4 mm a 100 m de profundidad. En cuanto a la amplitud del desplazamiento vertical, su valor máximo fue de 2 mm en la superficie, disminuyendo a 0.4 mm a 100 m de profundidad. Además, se determinó que la onda térmica anual penetró hasta una profundidad de 20 m, donde las fluctuaciones anuales de temperatura eran de tan solo 0.3°C aproximadamente.



**Figura 8:** Configuraciones y modos de falla considerados en el modelo bidimensional de un talud de roca en Randa, Suiza. Las fallas consideradas son deslizamiento (b) y volcamiento (c) (Gischig et al. 2011a).

En el análisis elastoplástico del modelo se aplicó el mismo ciclo térmico que para el análisis elástico, pero durante un mayor número de años. En el estudio del caso *sin debilitamiento* de la resistencia tras la falla por deslizamiento, se observó que los esfuerzos inducidos por los ciclos térmicos provocaron la falla por deslizamiento en varias discontinuidades y además que se propagaran otras fallas ya existentes que habían sido originadas por las cargas gravitacionales. Los desplazamientos en los planos de corte en las fallas variaban según su ubicación y origen. En los puntos donde la falla se originó por acción gravitacional, se obtuvo una dislocación inicial en los primeros años que luego se estabilizaba en el tiempo; en cambio, en los puntos donde ocurrió deslizamiento a causa de los cambios térmicos inducidos, se determinó una dislocación inicial en los primeros años que después se estabilizaba cíclicamente en el tiempo. Con respecto al análisis del volcamiento, los cambios de temperatura también indujeron fallas en las discontinuidades, concentrándose en la parte posterior del talud. El mayor incremento en la extensión de estas fallas ocurrió durante los primeros 5 años de acción del ciclo térmico, posteriormente su efecto se atenuó a través de los años. Se realizó un análisis

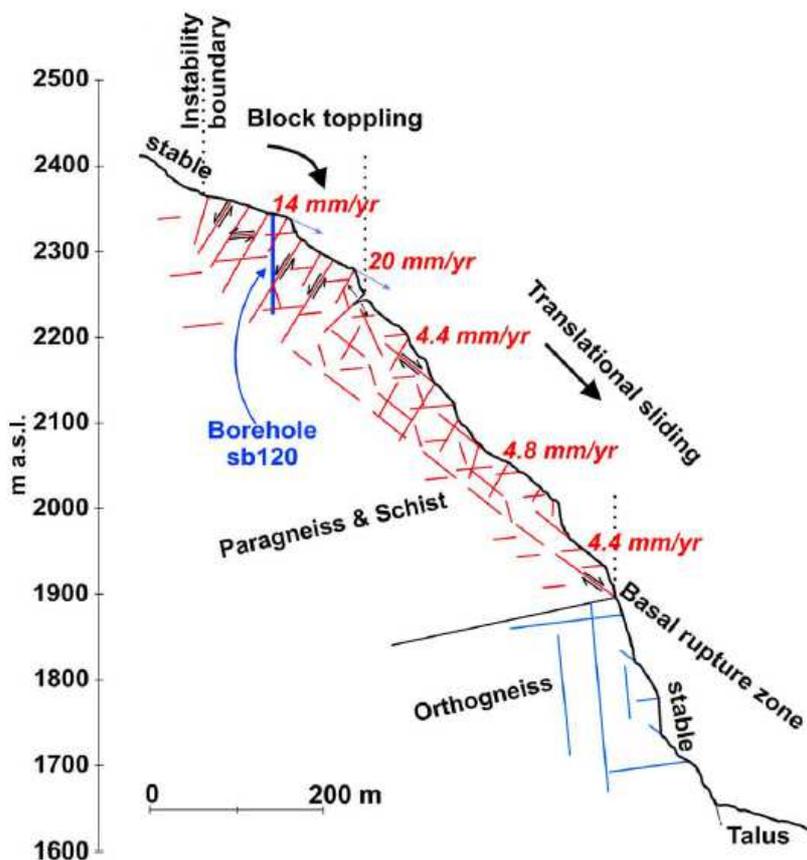
estacional y se observó que durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento se presentaron deformaciones acumuladas, debido principalmente a que en invierno no se lograban recuperar la totalidad de los desplazamientos ocurridos durante el verano. En el análisis del caso *con debilitamiento*, los esfuerzos de corte que una junta podía soportar eran reducidos. En consecuencia, parte de los esfuerzos inducidos en las discontinuidades eran inmediatamente transferidos a la masa de roca adyacente a la falla, lo cual promovía la posterior falla de discontinuidades cercanas a ésta.

Gischig et al. (2011b) monitorearon durante un periodo aproximado de 8 años un talud rocoso inestable ubicado en Randa que sufría desplazamientos de hasta 20 mm/año, con el objetivo de determinar la influencia de los efectos termomecánicos en las deformaciones, especialmente en profundidad. Estudios topográficos permitieron identificar los principales tipos de falla presentes en la estructura: volcamiento en zona superior y deslizamiento en la parte inferior (Figura 9).

Se llevó a cabo un exhaustivo programa de monitoreo, con la instalación de sensores tanto en la superficie como en profundidad del sistema rocoso. Dos extensómetros se dispusieron en fracturas para registrar la dislocación normal. Se perforaron tres pozos con profundidades de 50 y 120 m, donde se dispusieron inclinómetros y extensómetros, además de piezómetros para medir las presiones de poros. Todos estos equipos eran del tipo vibrating-wire e incluían sensores propios de temperatura. Para la medición de la temperatura superficial se instaló una red de nueve termocuplas en distintas posiciones y profundidades. También se llevó un registro de los parámetros meteorológicos del lugar (temperatura del aire y humedad, entre otros). Los desplazamientos absolutos del talud se midieron remotamente utilizando una estación total, con un total de 34 reflectores dispuestos en distintas ubicaciones sobre la zona de inestabilidad. El periodo de registro comprendió desde septiembre de 2008 a septiembre de 2009.

A partir de los registros de la estación total, se obtuvo que los desplazamientos acumulados de los puntos eran de 8 a 12 mm. Los mayores desplazamientos ocurrieron en invierno, de 7 a 10 mm, mientras que en verano eran considerablemente menores. Se infirió que las variaciones de las temperaturas estacionales en Randa se relacionaban

inversamente a las deformaciones en los taludes de roca, pues los desplazamientos eran exacerbados cuando decaían las temperaturas.



**Figura 9:** Bosquejo de la estructura interna y cinemática del talud inestable de estudio ubicado en Randa (Gischig et al. 2011b).

Adicionalmente, se realizó un estudio conceptual de los efectos termomecánicos del talud en Randa, por medio de una modelación numérica bidimensional con el software UDEC. Se estudiaron modelos de junta puramente elásticos y elastoplásticos, considerándose las fallas por volcamiento y deslizamiento. Se aplicó una función sinusoidal de temperatura con una amplitud de 10°C, una temperatura media de 0°C y un periodo de un año en la superficie. De los resultados de la modelación numérica, se observó que las deformaciones calculadas eran menores que las medidas in situ, pero del mismo orden de magnitud. Las tasas de desplazamientos del modelo tanto en la superficie como en la

profundidad del macizo rocoso poseían amplitudes similares a las registradas en terreno. El modelo numérico determinó que los periodos de incremento de las tasas de desplazamiento no ocurrían estrictamente en el invierno, sino que también en verano.

Finalmente, se demostró tanto en las mediciones in situ como en la modelación numérica la viabilidad de los efectos termomecánicos como factores causantes de deformaciones en taludes rocosos (superficiales y en profundidad), como el analizado en Randa. Estos efectos son promovidos por la topografía escarpada, las propiedades de resistencia y térmicas del macizo rocoso y la presencia de discontinuidades en su estructura.

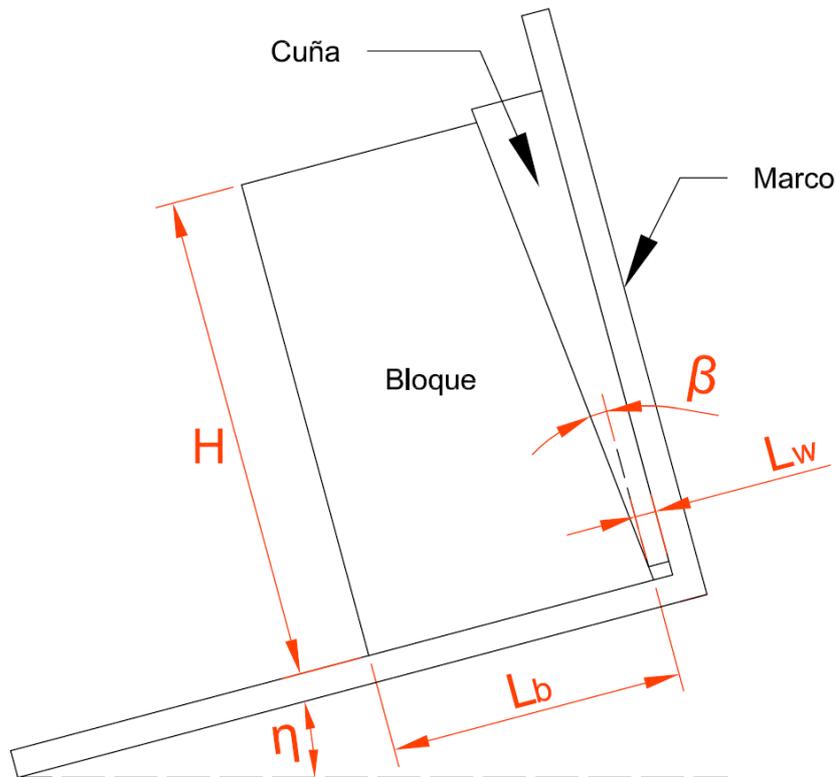
Tras la elaboración de la revisión bibliográfica se deduce que los taludes en roca son propensos al fenómeno de acumulación de desplazamientos a causa de cambios cíclicos de temperatura superficial, lo que ha sido comprobado analíticamente (Pastén 2013), numéricamente (Gunzburger et al. 2005 y Gischig et al. 2011a), experimentalmente (Pastén 2013) y en terreno (Hatzor et al. 2003, Bakun-Mazor et al. 2013 y Gischig et al. 2011b). De esta manera, se espera que sea factible reproducir experimentalmente el mecanismo de acuñamiento inducido térmicamente. El diseño del sistema se basa en la validación experimental del mecanismo de acuñamiento inducido térmicamente desarrollada por Pastén (2013).

### 3. Diseño Experimental

#### 3.1. Modelo Experimental

##### 3.1.1 Materiales

Este estudio contempla el uso de un modelo físico que consiste en un sistema bloque-cuña de acrílico que reacciona en un marco rígido de aluminio (Figura 10). La elección de estos materiales se debe a la diferencia entre sus coeficientes de expansión térmica, donde el valor asociado al acrílico supera unas 4 veces al del aluminio (Tabla 1). Lo anterior resulta en que las deformaciones térmicas inducidas son superiores en los elementos de acrílico y en consecuencia se potencia el mecanismo. En la Tabla 1 se presentan las principales propiedades termomecánicas y físicas de algunos materiales. Las dimensiones y ángulos del modelo corresponden a la altura del bloque  $H$ , el largo mayor del bloque  $L_b$ , el largo menor de la cuña  $L_w$ , el largo total del acrílico  $L_t = L_b + L_w$ , el ángulo de inclinación de la base  $\eta$  y el ángulo de contacto bloque-cuña  $\beta$ .



**Figura 10:** Modelo experimental del sistema bloque/cuña.

El modelo experimental se monta dentro de un contenedor térmicamente aislado de dimensiones 104 x 69 x 69 cm con paredes interiores de poliestireno expandido de 5 cm de espesor y 10 kg/m<sup>3</sup> de densidad y recubierto con madera aglomerada MDF de 1.8 cm de espesor. El poliestireno expandido y la madera MDF tienen un coeficiente de conductividad térmica de 0.043 W/(m·K) y 0.100 W/(m·K) respectivamente, con lo que se obtiene una estructura capaz de atenuar eficientemente la transferencia de calor con el exterior.

**Tabla 1:** Propiedades termomecánicas referenciales de distintas rocas, acrílico, aluminio y acero ASTM A36.

	Símbolo	Unidad	Granito	Basalto	Dolomita	Acrílico	Aluminio	Acero A36
Densidad	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2650	2850	2550	1180	2700	7850
Módulo de Young	E	[Gpa]	50	70	50	2.5	70	200
Conductividad térmica	$k_T$	[W/m/K]	3	2	4	0.25	210	41
Calor específico	$c_p$	[J/kg/K]	900	900	900	1466	910	574
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	[10 <sup>-6</sup> /°C]	8	5	8	90	23	11.7
Difusividad térmica	$D_T$	[10 <sup>-6</sup> · m <sup>2</sup> /s]	1.3	0.8	1.7	0.1	85.5	9.1

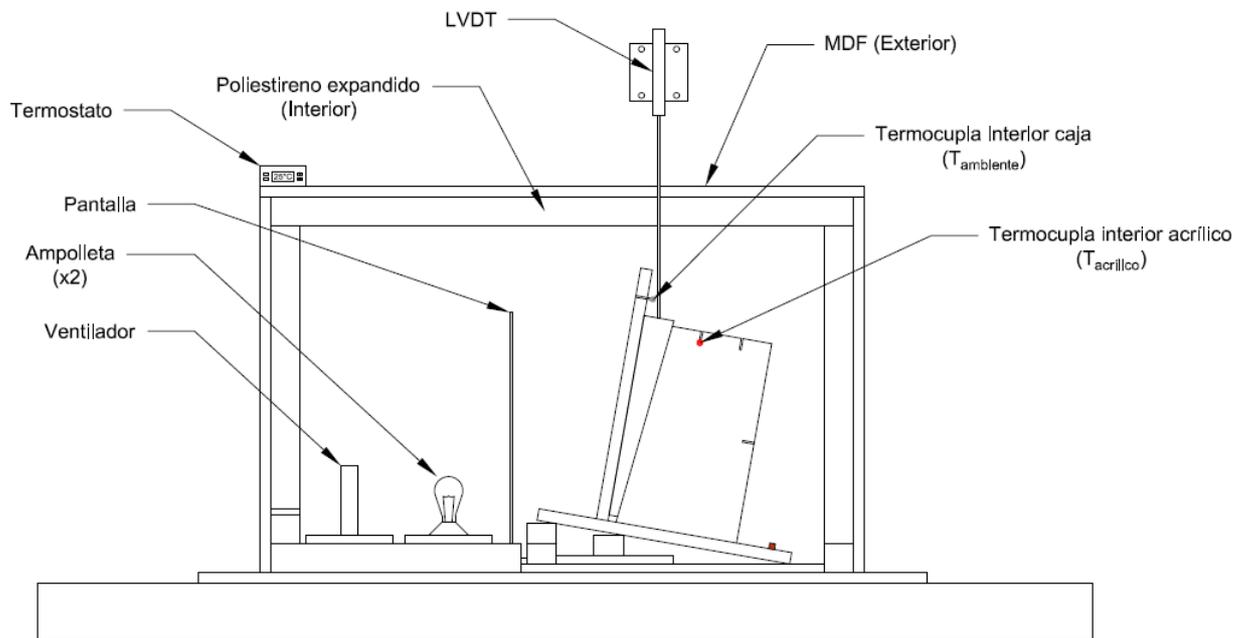
### 3.1.2 Instrumentos y Sensores

Los registros de las variaciones de temperatura y posición de la cuña se llevan a cabo por medio de termocuplas y un transductor diferencial de variación lineal (LVDT), respectivamente. Las termocuplas utilizadas son del tipo K, las cuales son de pequeñas dimensiones y pueden funcionar en ambientes a temperaturas menores a 100°C. El LDVT es marca Schaevitz® modelo DC-SE 2000 y tiene un rango de medición de 2 pulgadas.

Se instala una termocupla dentro de la caja contenedora y otras al interior del bloque de acrílico en las posiciones indicadas en la Figura 11. Adicionalmente, se ubica una termocupla fuera del sistema que monitorea la variación de temperatura en el laboratorio. El sensor LVDT se coloca fuera de la caja y se ubica verticalmente sobre la cuña para

registrar sus desplazamientos en dicha dirección (Figura 11). El LVDT posee un rango de temperaturas operativo de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .

Los datos de las posiciones y temperaturas se registran con el uso de un equipo de adquisición de datos marca Agilent modelo 34972A. La información se procesa en un computador portátil con el uso del software Agilent BenchLink Data Logger 3. La fuente de poder marca Agilent modelo E3630A alimenta el LVDT. En el Anexo A se detallan las características de los sensores y equipos utilizados en el modelo experimental.



**Figura 11:** Estructuración general del modelo experimental.

### 3.1.3 Elementos Adicionales

Los cambios de temperatura se generan con una fuente de calor correspondiente a 2 ampollitas de distinta potencia, que son controladas por un termostato digital de panel frontal. El termostato cuenta con un sensor de temperatura propio que se instala al interior del contenedor. Adicionalmente, se utiliza un ventilador para homogeneizar la temperatura en el interior del contenedor y una pantalla para impedir la radiación directa de la fuente de calor sobre los elementos de acrílico y sensores.

## **3.2. Análisis Experimental**

Se determinan experimentalmente los ángulos de fricción interna de la interfaz entre los materiales de acrílico/acrílico, acrílico/aluminio y acrílico/acero ASTM A36, lo que permite obtener una estimación de los esfuerzos de corte que se generan en cada uno de los contactos. Por otro lado, para determinar el ángulo de contacto  $\beta$  y los distintos ángulos de inclinación  $\eta$ , se realiza un análisis de la estabilidad del sistema frente a dos tipos de fallas principales: deslizamiento y volcamiento.

### **3.2.1. Características del Modelo y Definición de Variables**

El modelo experimental es sometido a tres etapas térmicas: calentamiento, ciclo térmico y enfriamiento. En la etapa de calentamiento, las ampollitas controladas por el termostato permanecen encendidas hasta que el interior del contenedor alcanza una temperatura máxima previamente definida. Luego, durante la aplicación de los ciclos térmicos, el sistema se somete a cambios periódicos de temperatura, por medio del termostato que enciende y apaga las ampollitas. Por último, en la etapa de enfriamiento se apagan permanentemente las ampollitas, permitiendo que la temperatura del sistema se equilibre con el medio exterior. Se determinan las bandas de temperatura a las que se somete el sistema por medio del registro comparativo de las variaciones de temperaturas al interior del contenedor ( $T_{\text{ambiente}}$ ) y al interior del bloque de acrílico ( $T_{\text{acrílico}}$ ). Las etapas de calentamiento inicial y enfriamiento final pueden ser considerados como cambios a largo plazo o estacionales de temperatura, mientras que las variaciones de temperatura durante las etapas cíclicas pueden ser consideradas como cambios a corto plazo o diarios de temperatura.

Las variables que se consideran en el análisis experimental son la temperatura media y amplitud de cada ciclo térmico, el tiempo de duración del periodo cíclico  $t_{\text{ciclo}}$ , y el ángulo de inclinación  $\eta$ . La temperatura media y amplitud del ciclo térmico se regulan con el termostato. El tiempo de duración de la etapa cíclica es definido por el usuario, considerando una extensión temporal que permita observar al menos 5 ciclos de temperaturas. El ángulo de inclinación de la base se define manualmente, ajustando la pendiente del marco. El ángulo de contacto bloque-cuña  $\beta$  es fijo y se configura en la etapa de confección de las piezas de acrílico.

### 3.2.2. Determinación de los Ángulos de Fricción Interna

En el montaje experimental se tienen tres contactos distintos entre los materiales, estos son: bloque/cuña, bloque/marco y cuña/marco. En dichos contactos se estudia la fricción entre dos piezas de acrílico y entre una pieza de acrílico con otra de aluminio.

Para medir los ángulos de fricción interna, se coloca una pieza de material sobre un plano cuya pendiente se incrementa hasta que la pieza comienza a deslizarse por el plano. Se registran los ángulos de deslizamiento para cada tipo de contacto. En la Tabla 2 se resumen los ángulos de fricción promedio medidos entre los distintos materiales junto con el número de repeticiones, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos. El ángulo de fricción interna promedio entre las piezas de acrílico es  $17.5^\circ$ , mientras que el de los contactos entre el acrílico con el marco de aluminio es  $21.9^\circ$ .

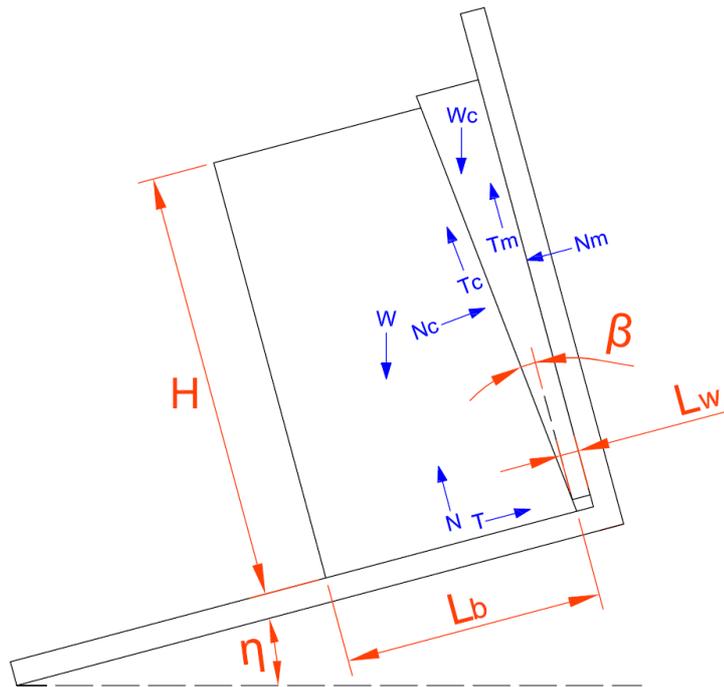
**Tabla 2:** Resumen de los registros para determinación de los ángulos de fricción interna.

$\varphi$	Nº Repeticiones	Desviación estándar [°]	Promedio [°]	Máx [°]	Mín [°]
Acrílico/Acrílico	35	1,9	17,5	22,2	13,1
Acrílico/Aluminio	35	1,4	21,9	23,7	17,7

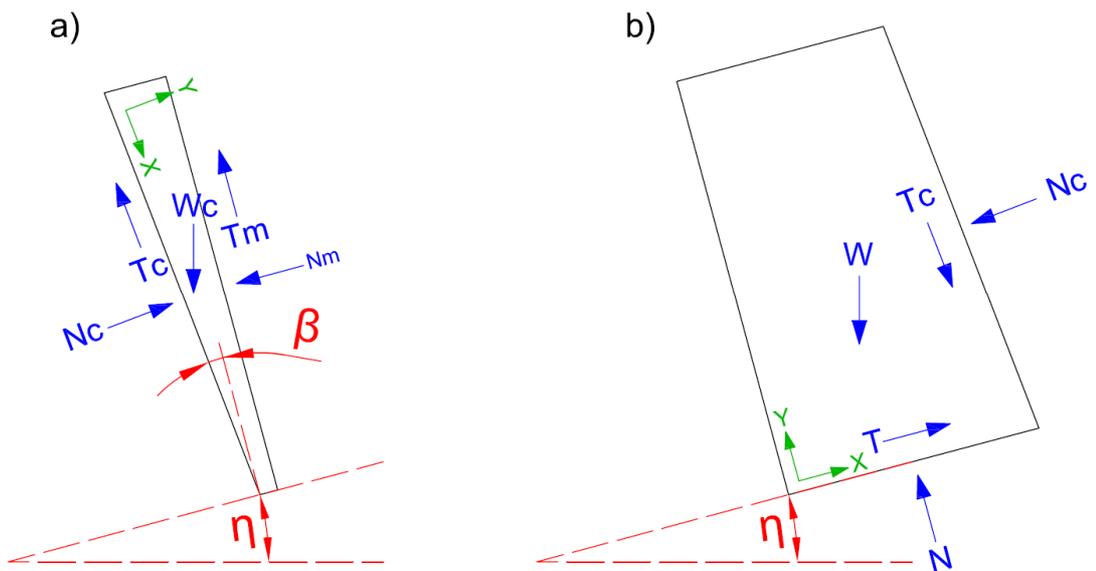
### 3.2.3. Análisis de Estabilidad al Deslizamiento

En esta sección se analiza la estabilidad del sistema frente al deslizamiento, para lo cual se calcula el factor de seguridad para distintas relaciones de esbeltez  $H/L_t$ , ángulos de inclinación  $\eta$  y ángulos de contacto  $\beta$ . En el análisis se considera la variación del ángulo de contacto  $\beta$  y la relación  $L_w/L_t$ .

En la Figura 12 se muestra el diagrama de cuerpo libre del sistema (DCL), destacándose tanto las fuerzas tangenciales como perpendiculares a las superficies de contacto, además de los pesos. Las fuerzas se representan en azul y tanto las dimensiones como los ángulos en rojo. Se considera en el análisis las fuerzas de contacto entre bloque – cuña, las reacciones del acrílico con el marco de aluminio y los pesos.



**Figura 12:** Fuerzas actuantes y dimensiones del sistema. Nota:  $W_c$ = peso de la cuña,  $W$ = peso del bloque,  $T_m$ = fuerza de roce entre marco y cuña,  $T_c$ = fuerza de roce entre bloque y cuña,  $T$ = fuerza de roce entre marco y bloque,  $N_m$ = fuerza normal del marco sobre la cuña,  $N_c$ = fuerza normal del bloque sobre la cuña y  $N$ = fuerza normal del marco sobre el bloque.



**Figura 13:** Fuerzas actuantes y dimensiones de la cuña (a) y el bloque (b).

Primero, se plantean las ecuaciones de equilibrio de fuerzas de la cuña según las direcciones X-Y indicadas en la Figura 13 (a).

$$\sum F_X = 0 \Rightarrow W_c \cdot \text{sen}(90-\eta-\beta) - N_m \cdot \text{cos}(90-\beta) - T_c - T_m \cdot \text{cos}(\beta) = 0 \quad (3-1)$$

$$\sum F_Y = 0 \Rightarrow N_c + T_m \cdot \text{sen}(\beta) - N_m \cdot \text{sen}(90-\beta) - W_c \cdot \text{cos}(90-\eta-\beta) = 0 \quad (3-2)$$

Reemplazando  $T_m = N_m \cdot \tan(\varphi_m)$  y  $T_c = N_c \cdot \tan(\varphi_c)$  en (3-1) y (3-2) y combinando ambas ecuaciones, se puede encontrar la siguiente expresión para la normal  $N_c$ :

$$N_c = \frac{W_c \cdot \text{cos}(\eta + \beta) \cdot \left[ \tan(\eta + \beta) - \frac{K_c}{K_s} \right]}{1 - \tan(\varphi_c) \cdot \frac{K_c}{K_s}} \quad (3-3)$$

Donde,  $K_s = \tan(\varphi_m) \cdot \text{cos}(\beta) + \text{sen}(\beta)$  y  $K_c = \tan(\varphi_m) \cdot \text{sen}(\beta) - \text{cos}(\beta)$ .

Luego, se procede a estudiar el DCL del bloque determinando las ecuaciones de equilibrio de fuerzas según las direcciones X-Y indicadas en la Figura 13 (b). Además, se incorpora el término asociado al factor de seguridad frente al deslizamiento del bloque  $T = N \cdot \tan(\varphi) / FS_d$ .

$$\sum F_X = 0 \Rightarrow T + T_c \cdot \text{cos}(90-\beta) - N_c \cdot \text{cos}(\beta) - W \cdot \text{sen}(\eta) = 0 \quad (3-4)$$

$$\sum F_Y = 0 \Rightarrow N - N_c \cdot \text{sen}(\beta) - W \cdot \text{cos}(\eta) - T_c \cdot \text{sen}(90-\eta) = 0 \quad (3-5)$$

Combinando las ecuaciones (3-4) y (3-5) se obtiene una expresión para determinar el factor de seguridad:

$$FS_d = \frac{\tan(\varphi) \cdot [N_c \cdot \text{sen}(\beta) + W \cdot \text{cos}(\eta) + T_c \cdot \text{cos}(\beta)]}{N_c \cdot \text{cos}(\beta) + W \cdot \text{sen}(\eta) - T_c \cdot \text{sen}(\beta)} \quad (3-6)$$

El peso del bloque ( $W$ ) y de la cuña ( $W_c$ ) se pueden expresar en función de sus dimensiones ( $H$ ,  $L_w$  y  $L_b$ ), espesores ( $e$ ) y densidades ( $\gamma$  y  $\gamma_c$ , respectivamente):

$$W = \gamma \cdot e \cdot H \cdot \left[ L_b - \frac{H}{2} \cdot \tan(\beta) \right] \quad (3-7)$$

$$W_c = \gamma_c \cdot e \cdot H \cdot \left[ L_w + \frac{H}{2} \cdot \tan(\beta) \right] \quad (3-8)$$

Combinando (3-7) y (3-8) y reemplazando en (3-3), se obtiene una expresión para la normal  $N_c$ :

$$N_c = \frac{\gamma_c}{\gamma} \cdot W \cdot R \quad (3-9)$$

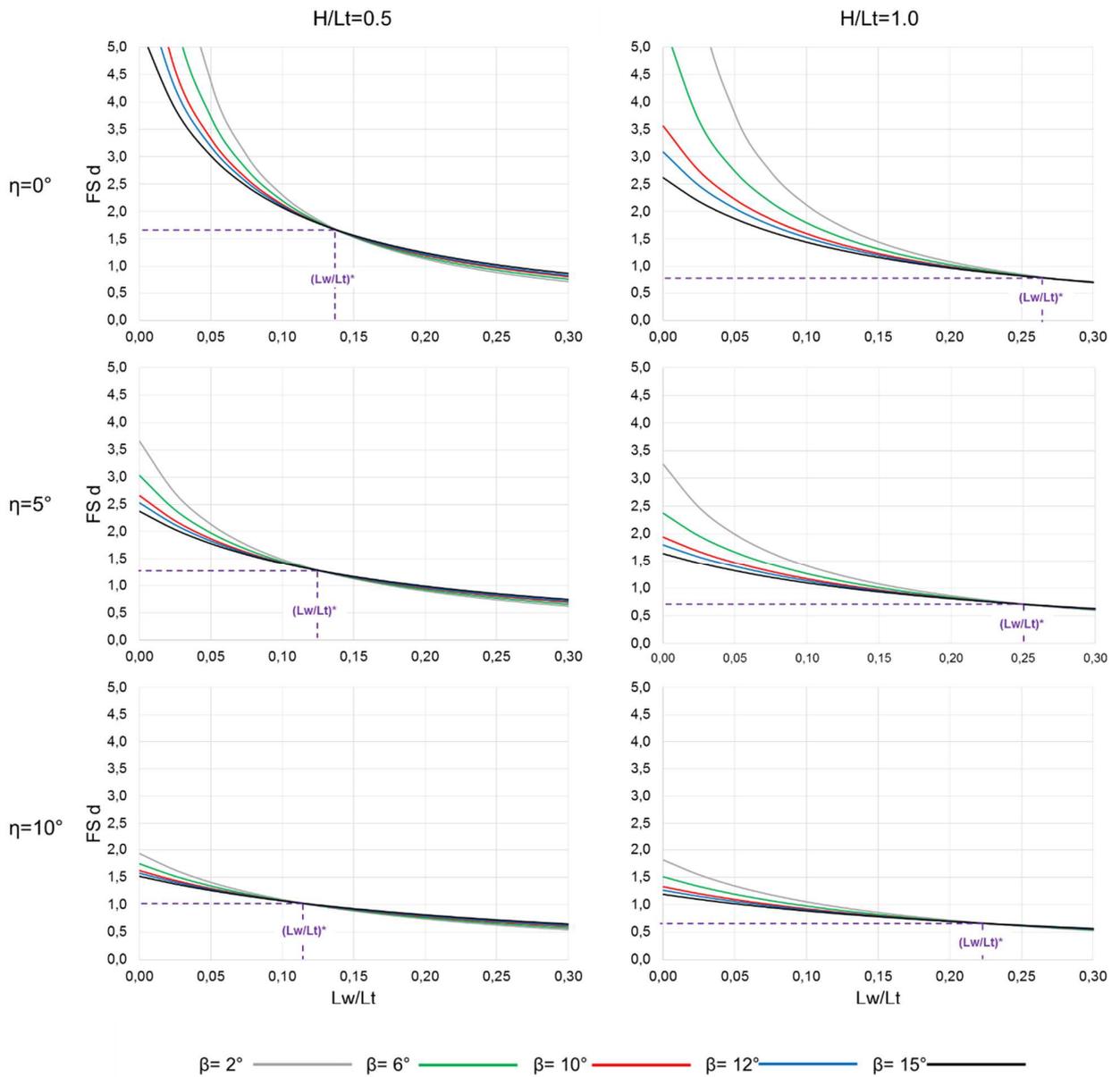
$$\text{Donde } R = \left[ \frac{2L_w + H \cdot \tan(\beta)}{2L_b - H \cdot \tan(\beta)} \right] \cdot \cos(\eta + \beta) \cdot \left[ \frac{K_s \cdot \tan(\eta + \beta) - K_c}{K_s - \tan(\varphi_c) \cdot K_c} \right].$$

Por último, sustituyendo (3-9) en (3-6) se obtiene la expresión final para el cálculo del factor de seguridad al deslizamiento ( $FS_d$ ):

$$FS_d = \tan(\varphi) \cdot \left[ \frac{R \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma} \cdot [\text{sen}(\beta) + \tan(\varphi_c) \cdot \cos(\beta)] + \cos(\eta)}{R \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma} \cdot [\cos(\beta) - \tan(\varphi_c) \cdot \text{sen}(\beta)] + \text{sen}(\eta)} \right] \quad (3-10)$$

Un caso particular es cuando  $L_w=0$ ,  $\beta=0^\circ$  y  $W_c=N_c=T_c=0$ . En tal caso, se recupera el  $FS_d = \tan(\varphi)/\tan(\eta)$  que corresponde al caso de deslizamiento libre de un bloque sobre un plano inclinado.

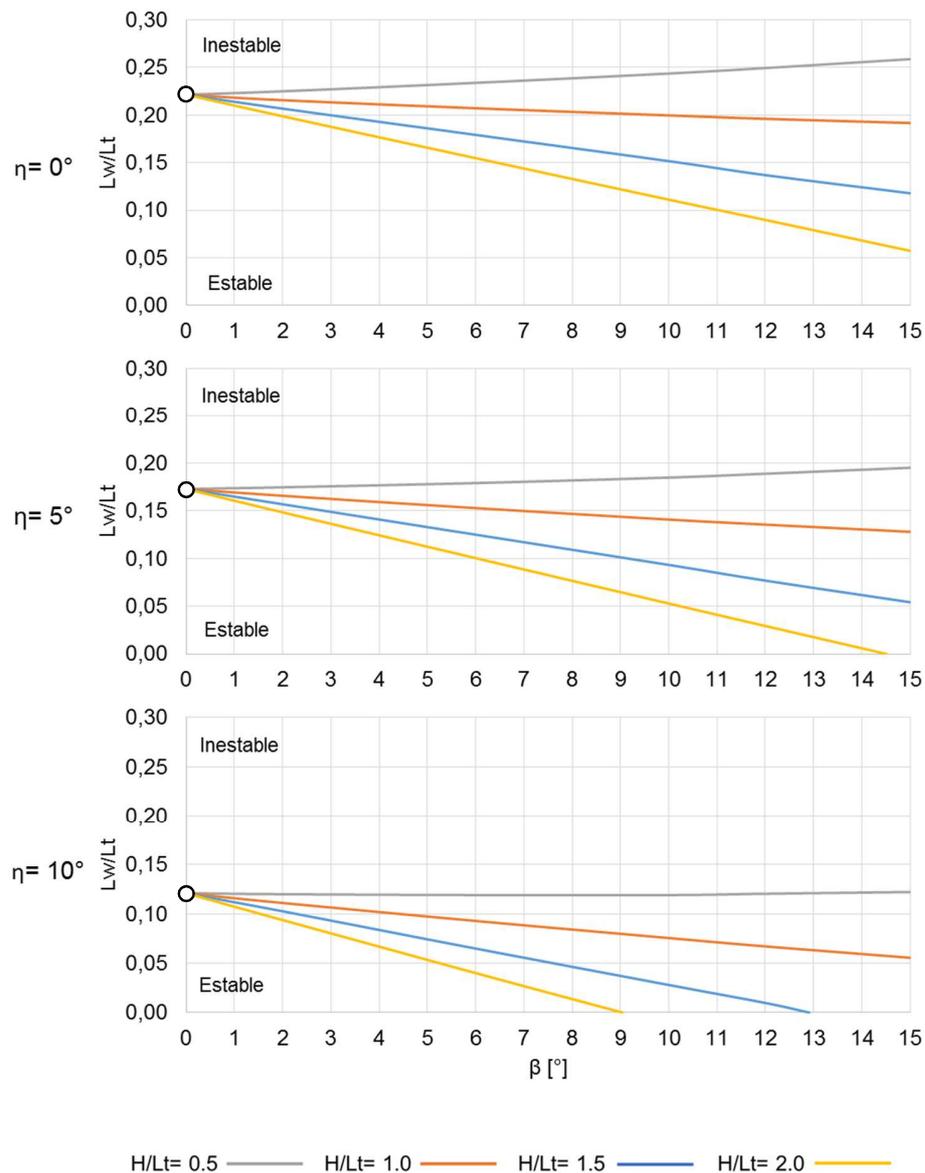
El análisis de estabilidad del sistema bloque-cuña frente al deslizamiento se desarrolla a partir de la ecuación (3-10) y considera que los ángulos de fricción interna entre los materiales son  $\varphi_m = 21.9^\circ$  (cuña/marco) y  $\varphi_c = 17.5^\circ$  (bloque/cuña).



**Figura 14:** Factor de seguridad al deslizamiento  $FS_d$  según  $L_w/L_t$  con  $H/L_t = 0.5$  y  $1.0$  considerando  $L_t = 22.5$  cm para distintos ángulos de inclinación  $\eta$  y de contacto  $\beta$  calculados con la ecuación (3-10). Incluye la relación  $(L_w/L_t)^*$  en la que el FS es independiente del ángulo de contacto  $\beta$ .

En la Figura 14 se observa que el  $FS_d$  decrece con la relación  $L_w/L_t$  y el ángulo de inclinación de la base  $\eta$ . En otras palabras, mientras mayor es el tamaño relativo de la cuña y el ángulo de inclinación de la base  $\eta$ , más inestable es la configuración. Existe un

valor de la relación  $L_w/L_t = (L_w/L_t)^*$  en el que el  $FS_d$  es independiente del ángulo de contacto  $\beta$  para cada relación de esbeltez  $H/L_t$  y ángulo de inclinación  $\eta$ . Si  $L_w/L_t > (L_w/L_t)^*$  entonces el  $FS_d$  aumenta con el ángulo de contacto  $\beta$ , pero si  $L_w/L_t < (L_w/L_t)^*$  entonces el  $FS_d$  disminuye con el ángulo de contacto  $\beta$ . La razón  $(L_w/L_t)^*$  aumenta con la relación de esbeltez  $H/L_t$  y disminuye con la inclinación de la base  $\eta$ .

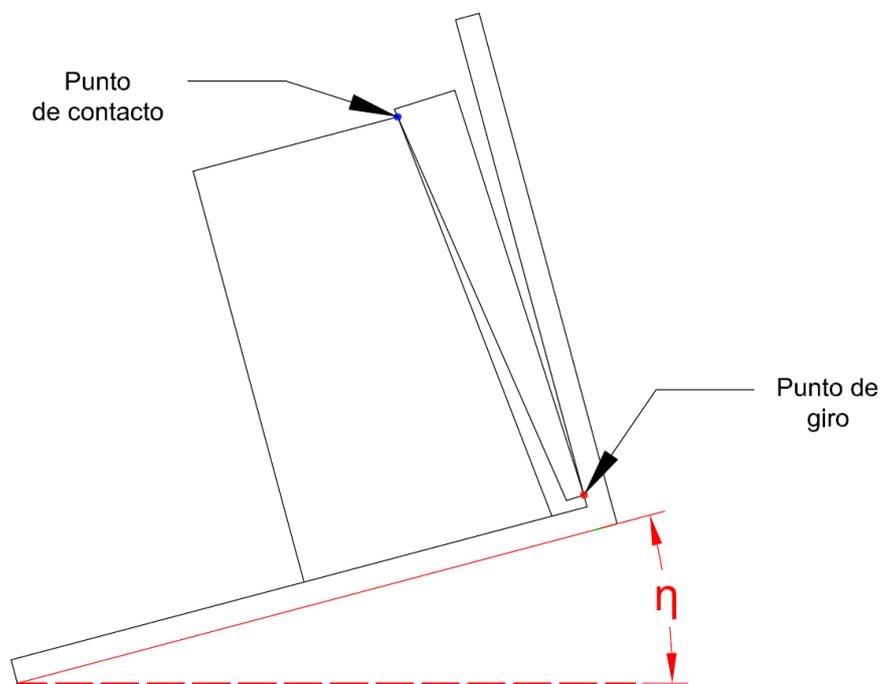


**Figura 15:**  $L_w/L_t$  con  $L_t = 22.5$  cm según  $\beta$  para  $FS_d = 1.0$  para cada ángulo de inclinación  $\eta$  con distintos  $H/L_t$ . Bajo cada una de las curvas el sistema es estable frente al deslizamiento, sobre las curvas presenta inestabilidad.

La Figura 15 muestra los valores de la relación  $L_w/L_t$  que tienen  $FS_d = 1.0$  en función del ángulo  $\beta$  para distintas relaciones de esbeltez  $H/L_t$  y ángulos de inclinación de la base  $\eta$ . Por ejemplo, un sistema con esbeltez  $H/L_t = 2.0$ , inclinación de la base  $\eta = 5^\circ$  y un ángulo  $\beta = 10^\circ$  es estable siempre y cuando la razón  $L_w/L_t$  sea menor que 0.05. Para esbelteces  $H/L_t = 1.0, 1.5$  y  $2.0$  un incremento del ángulo  $\beta$  perjudica la estabilidad del sistema frente al deslizamiento. En general, la estabilidad del sistema frente al deslizamiento decrece con la esbeltez. Adicionalmente, se observa que para cada ángulo de inclinación  $\eta$  la relación  $H/L_t$  admite sólo un rango de valores de  $\beta$  donde la configuración es estable frente al deslizamiento. Por ejemplo, para una relación de esbeltez  $H/L_t = 2.0$  y una inclinación  $\eta = 10^\circ$  se admiten sólo ángulos de contacto  $\beta$  inferiores a  $9^\circ$ .

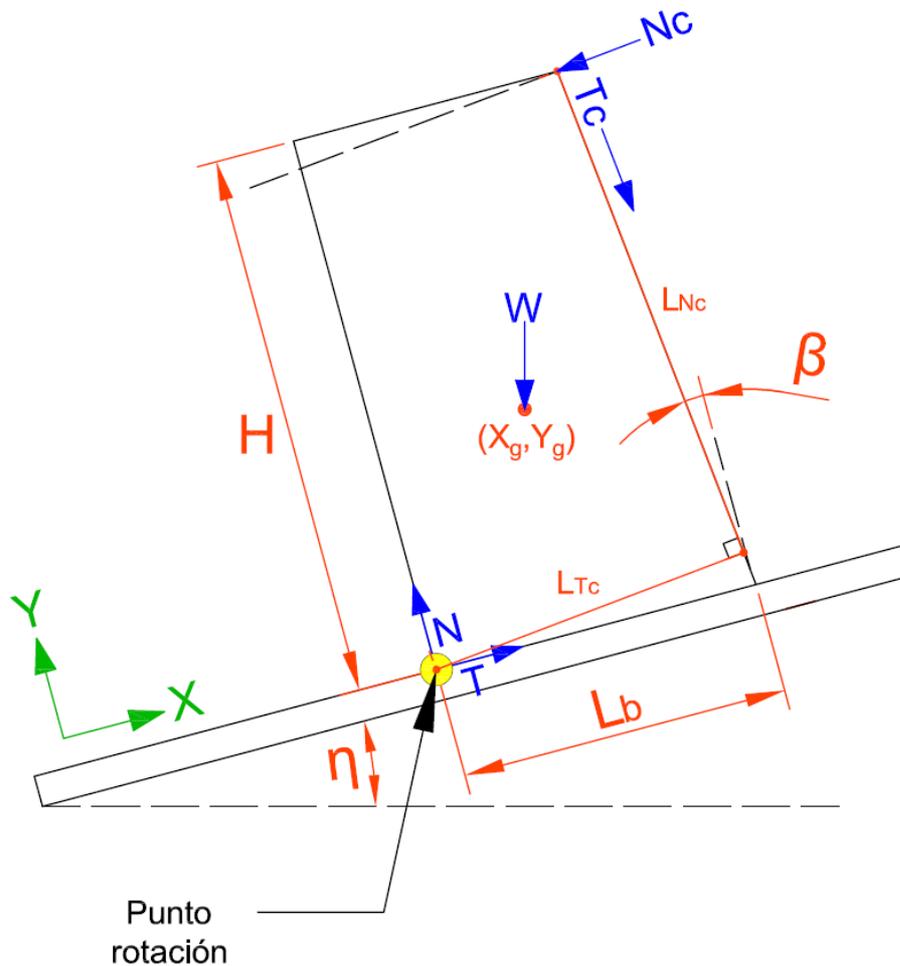
### 3.2.4. Análisis de Estabilidad al Volcamiento

En esta sección se determinan los distintos ángulos de inclinación límites para los cuales el sistema falla al volcamiento. Se considera como el caso más desfavorable cuando la cuña concentra su apoyo en un punto de contacto en el extremo superior del bloque, lo que se justifica al considerar que la cuña gira previamente en torno a un punto de apoyo en el marco (Figura 16).



**Figura 16:** Caso más desfavorable considerado para análisis del volcamiento.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de cuerpo libre del bloque (DCL), destacándose tanto las fuerzas tangenciales como perpendiculares a las superficies de contacto, además del peso  $W$ . El análisis considera las fuerzas de contacto entre bloque-cuña ( $N_c$  y  $T_c$ ) y las reacciones de la base de aluminio ( $N$  y  $T$ ). En el caso límite de volcamiento de la pieza, el bloque concentra su apoyo en el punto de rotación, lo que significa que tanto  $N$  como  $T$  se aplican en dicho punto.



**Figura 17:** Diagrama de fuerzas y dimensiones para análisis del volcamiento.

Para la obtención del ángulo de volcamiento  $\alpha_{vol}$ , se determina la ecuación de equilibrio de momentos en torno al punto de rotación indicado en la Figura 17:

$$\sum M_0 = 0 \Rightarrow -W \cdot \cos(\alpha_{vol}) \cdot x_g + W \cdot \sin(\alpha_{vol}) \cdot y_g - T_c \cdot L_{Tc} + N_c \cdot L_{Nc} = 0 \quad (3-11)$$

El peso del bloque  $W$  se indica en la ecuación (3-7). Los valores de  $N_c$  y  $T_c$  se obtienen análogamente que en el análisis del deslizamiento del bloque, debido a que se satisfacen las mismas ecuaciones de equilibrio de fuerzas. El punto  $(x_g, y_g)$  corresponde a la posición del centro de gravedad del bloque considerando el sistema de referencia de la Figura 17 centrado en el punto de rotación. Los términos  $L_{Tc}$  y  $L_{Nc}$  son las distancias al eje de giro asociado a  $T_c$  y  $N_c$ , respectivamente.

Considerando  $d = L_b - H \cdot \tan(\beta)$  y  $A_{\text{bloque}} = H \cdot (L_b + d) / 2$ , se determinan los valores de  $x_g$ ,  $y_g$ ,  $L_{Tc}$  y  $L_{Nc}$ .

$$x_g = \frac{1}{A_{\text{bloque}}} \cdot \frac{H}{2} \cdot \left[ d^2 + H \cdot \tan(\beta) \cdot \left( d + \frac{1}{3} \cdot H \cdot \tan(\beta) \right) \right] \quad (3-12)$$

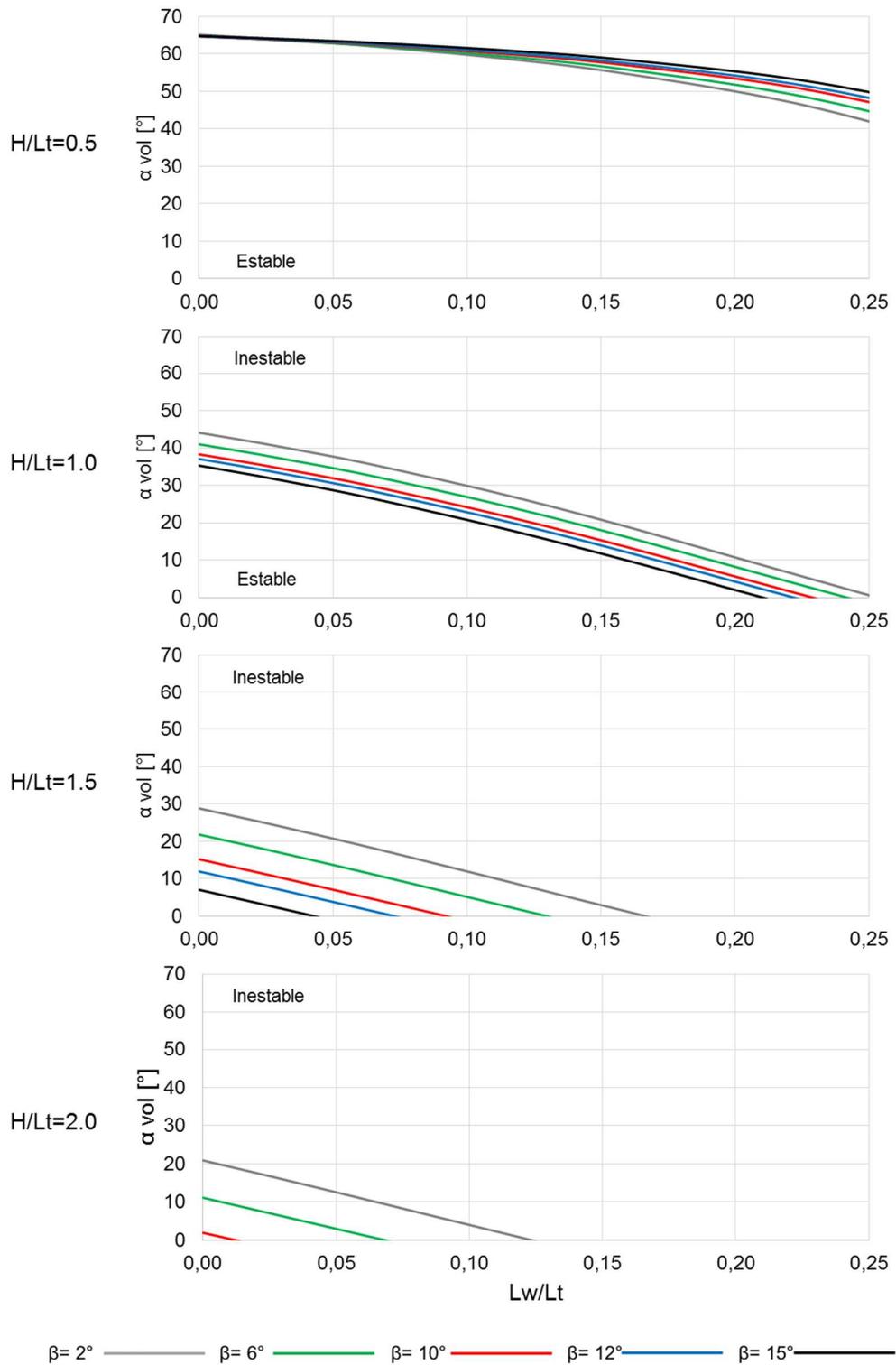
$$y_g = \frac{1}{A_{\text{bloque}}} \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \left[ d + \frac{H}{3} \cdot \tan(\beta) \right] \quad (3-13)$$

$$L_{Tc} = \sqrt{\left( \frac{L_B}{1 + \tan^2(\beta)} \right)^2 + \left( \frac{L_B \cdot \tan(\beta)}{1 + \tan^2(\beta)} \right)^2} \quad (3-14)$$

$$L_{Nc} = \sqrt{\left( d - \frac{L_B}{1 + \tan^2(\beta)} \right)^2 + \left( H - \frac{L_B \cdot \tan(\beta)}{1 + \tan^2(\beta)} \right)^2} \quad (3-15)$$

Sustituyendo (3-7), (3-9), (3-12), (3-13), (3-14) y (3-15) en (3-11) es posible determinar el ángulo de inclinación  $\alpha_{\text{vol}}$  para distintas configuraciones del sistema.

A continuación, se analiza el volcamiento del sistema bloque/cuña para distintas configuraciones a partir de la ecuación (3-11), considerando las relaciones adimensionales  $H/L_t$  y  $L_w/L_t$ , además de la variación del ángulo  $\beta$  (Figura 17). Los ángulos de fricción interna entre los materiales son  $\phi_m = 21.9^\circ$  (cuña/escuadra) y  $\phi_c = 17.5^\circ$  (bloque/cuña). Se estudia la variación del ángulo de volcamiento  $\alpha_{\text{vol}}$  con respecto al término  $L_w/L_t$ , para distintos valores de esbeltez  $H/L_t$  y ángulos  $\beta$ .



**Figura 18:** Ángulo de inclinación  $\alpha_{vol}$  que induce el volcamiento del sistema según  $L_w/L_t$  con  $H/L_t = 0.5, 1.0, 1.5$  y  $2.0$  con  $L_t = 22.5$  cm. Bajo cada una de las curvas el sistema es estable frente al volcamiento, sobre las curvas presenta inestabilidad.

La Figura 18 muestra que el ángulo  $\alpha_{vol}$  decrece cuando la relación  $L_w/L_t$  se incrementa, lo que indica que el aumento del largo relativo de la cuña favorece el volcamiento. Se aprecia que para las esbelteces  $H/L_t = 1.0, 1.5$  y  $2.0$  un aumento de  $\beta$  facilita el volcamiento de la pieza. En cambio, para la esbeltez  $H/L_t = 0.5$  el aumento de  $\beta$  favorece la estabilidad del sistema. Se deduce que existe una relación de esbeltez  $0.5 < H/L_t < 1.0$  a partir de la cual el incremento de  $\beta$  perjudica la estabilidad frente al volcamiento, mientras que para valores inferiores a dicha razón se invierte esta relación. Además, se observa que existe un rango de esbelteces acotado donde el sistema es estable al volcamiento para un ángulo  $\beta$  dado. Por ejemplo, para  $\beta = 10^\circ$  un sistema con  $H/L_t = 2.0$  es estable para un reducido rango de ángulo de inclinación  $\eta$ . En general, un aumento de la esbeltez reduce la estabilidad del sistema frente al volcamiento.

### 3.2.5. Selección de Variables Geométricas

A partir de los análisis anteriores, se determinan las dimensiones de la pieza de acrílico que se ensaya con el marco para que no se produzcan fallas por deslizamiento ni por volcamiento en un rango de ángulos de inclinación de la base  $\eta$  de  $0^\circ$  a  $10^\circ$ . Se escoge  $H = 35$  cm y  $L_t = 22.5$  cm para que la relación de aspecto  $H/L_t = 35/22.5 = 1.56$  se aproxime a la relación observada en uno de los bloques de estudio en Masada (Pastén 2013). En la Tabla 3 se indican las dimensiones del acrílico, junto a sus análisis de estabilidad respectivos. El  $FS_d$  es el factor de seguridad frente al deslizamiento de la pieza de acrílico para los ángulos de inclinación de la base  $\eta = 0^\circ, 5^\circ$  y  $10^\circ$ . El  $\alpha_{vol}$  es el ángulo de volcamiento del elemento.

**Tabla 3:** Dimensiones de la pieza de acrílico.

	H [cm]	L <sub>t</sub> [cm]	H/L <sub>t</sub>	L <sub>w</sub> [cm]	$\beta$ [°]	Espesor [cm]	FS <sub>d</sub> $\eta=0^\circ$	FS <sub>d</sub> $\eta=5^\circ$	FS <sub>d</sub> $\eta=10^\circ$	$\alpha_{vol}$ [°]
Acrílico	35.0	22.5	1.6	1.2	6.0	3.0	2.3	1.6	1.2	13.4

### 3.2.6. Análisis Térmico

Este análisis se realiza para determinar el rango de temperaturas a los que se somete el sistema en los ensayos experimentales. El estudio contempla el uso de ampollitas de

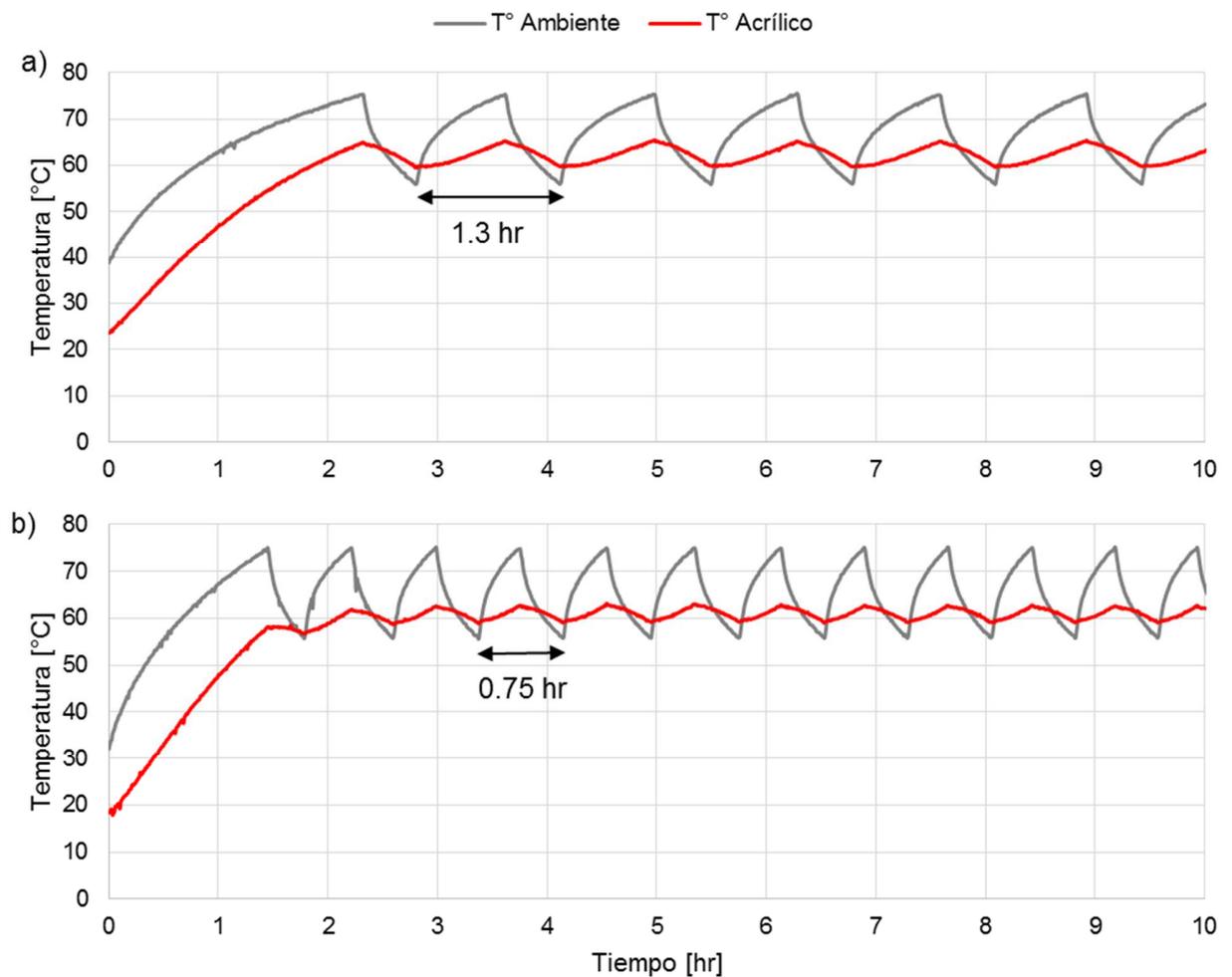
distinta potencia (25, 40, 60 y 100 W) que se configuran para permanecer encendidas o apagadas. Las termocuplas ubicadas según indica la Figura 11 miden las variaciones de temperaturas al interior del contenedor ( $T_{\text{ambiente}}$ ) y al interior del bloque de acrílico ( $T_{\text{acrílico}}$ ). Una ampolleta con encendido permanente es aquella que se mantiene encendida independiente del control del termostato. En cambio, una ampolleta con encendido variable es aquella que es controlada por el termostato, y por lo tanto permanece encendida sólo durante las fases de calentamiento inicial y de cada ciclo térmico. Se realiza una serie de ensayo para distintas configuraciones térmicas y combinaciones de las ampolletas, lo que permite realizar un análisis comparativo de los registros.

Cuando una de las ampolletas permanece encendida, el tiempo de enfriamiento de cada ciclo térmico se extiende, siendo este incremento directamente proporcional a la potencia de la ampolleta que permanece encendida. Además, el mantener una ampolleta encendida permanentemente provoca que la temperatura mínima al interior del contenedor sea superior a la temperatura del laboratorio, impidiendo alcanzar temperaturas menor si se quisiera. Por ejemplo, para una ampolleta fija de 40 W la  $T_{\text{ambiente}}$  mínima es aproximadamente 45°C. A causa de estas observaciones, se descarta el uso de ampolletas con encendido permanente.

Cuando ambas ampolletas se configuran para encenderse y apagarse simultáneamente, la etapa cíclica de temperaturas se alcanza fácilmente. La potencia de las ampolletas influye en la etapa de calentamiento de cada ciclo térmico; al aumentar la potencia, la etapa de calentamiento se acelera y el periodo del ciclo térmico disminuye. La duración de la fase de calentamiento afecta el comportamiento térmico del acrílico, ya que un menor periodo del ciclo térmico provoca que se alcancen amplitudes de temperatura inferiores al interior del acrílico.

La Figura 19 (a) muestra un registro típico de temperaturas para una configuración con ampolletas de 60 W y 100 W que se encienden y apagan simultáneamente. Cuando se define una temperatura media de 65°C y una amplitud térmica de 20°C a través del termostato, se obtiene un periodo en la etapa cíclica de  $t_{\text{ciclo}} \approx 1.3$  hrs. Por otro lado, en la Figura 19 (b) se indica el registro para una configuración con ambas ampolletas de 100

W que se encienden y apagan simultáneamente. Si la temperatura media y la amplitud térmica se definen igual que el caso anterior, el periodo de la etapa cíclica es de  $t_{\text{ciclo}} \approx 0.75$  hrs. De esta manera, se corrobora la relación inversa entre la potencia de las ampollitas y los periodos de los ciclos térmicos. En la misma figura se observa que la doble amplitud de la temperatura al interior del acrílico es proporcional a la duración del ciclo térmico e inversamente proporcional a la potencia de las ampollitas, alcanzando valores de  $A_{\text{ciclo}} = 6^\circ\text{C}$  y  $A_{\text{ciclo}} = 4^\circ\text{C}$ , respectivamente. Con estos resultados, se establece que los ensayos se realizarán únicamente con ampollitas de encendido variable. Las potencias de las ampollitas se eligen para alcanzar diferentes periodos y amplitudes térmicas.



**Figura 19:** Registro de temperaturas para configuración de ampollitas: (a) 60W-variable y 100W-variable y (b) 100W-variable y 100W-variable.

Por otro lado, la ubicación del sensor de temperaturas del termostato al interior del contenedor afecta la duración del periodo cíclico y la amplitud de temperatura inducida en el acrílico, debido a que en el sistema predomina la transferencia de calor por convección. De esta manera, si el sensor de control del termostato se ubica en una posición cercana a las ampollitas, entonces la amplitud de temperatura inducida en el interior del acrílico resulta menor a que si el sensor se ubica en un punto distante de las fuentes de calor. Finalmente, el sensor del termostato se sitúa sobre la base del contenedor en una posición lejana a la ubicación de las ampollitas.

### **3.2.7. Comentarios**

Durante la etapa de calibración de los equipos y registros, se utilizaron sensores de temperatura LM35, por su bajo costo y disponibilidad (ver características en Anexo A). Sin embargo, su uso se descarta por su baja precisión y corta vida útil.

## 4. Resultados Experimentales

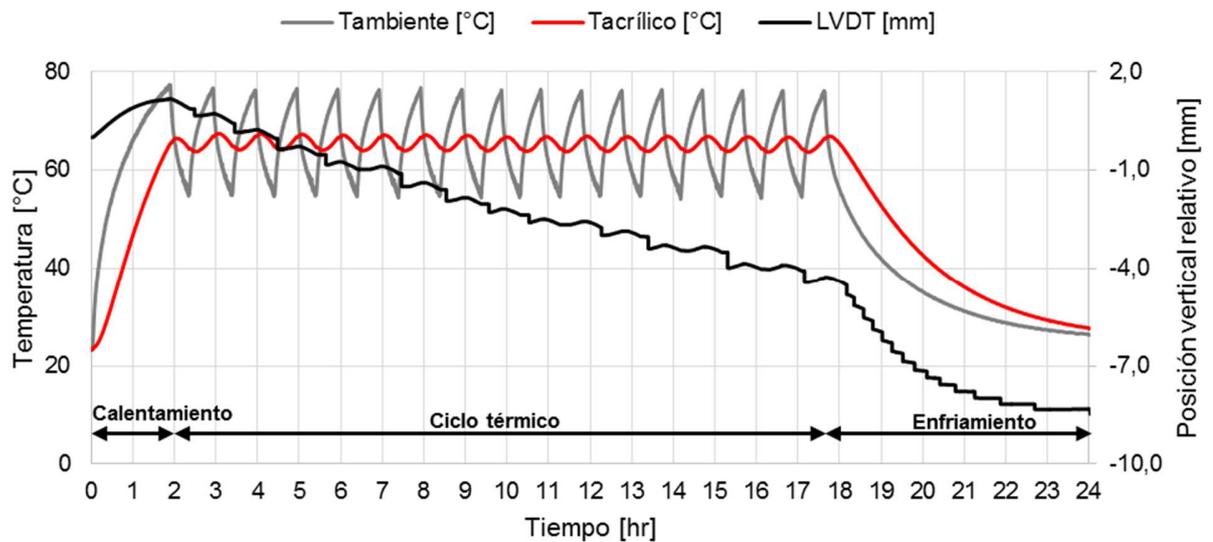
A continuación, se presentan los registros de distintas configuraciones experimentales con las siguientes variables: doble amplitud del ciclo térmico del acrílico  $A_{\text{ciclo}}$ , tiempo de duración del ciclo térmico  $t_{\text{ciclo}}$ , y el ángulo de inclinación de la base  $\eta$ .

### 4.1. Descripción General de un Ensayo

En los ensayos se utilizan dos termocuplas y un sensor LVDT. Una termocupla se ubica al interior del contenedor ( $T_{\text{ambiente}}$ ) y otra dentro del bloque de acrílico ( $T_{\text{acrílico}}$ ). El LVDT registra la posición vertical relativa de la cuña. La ubicación de los sensores se indica en la Figura 11.

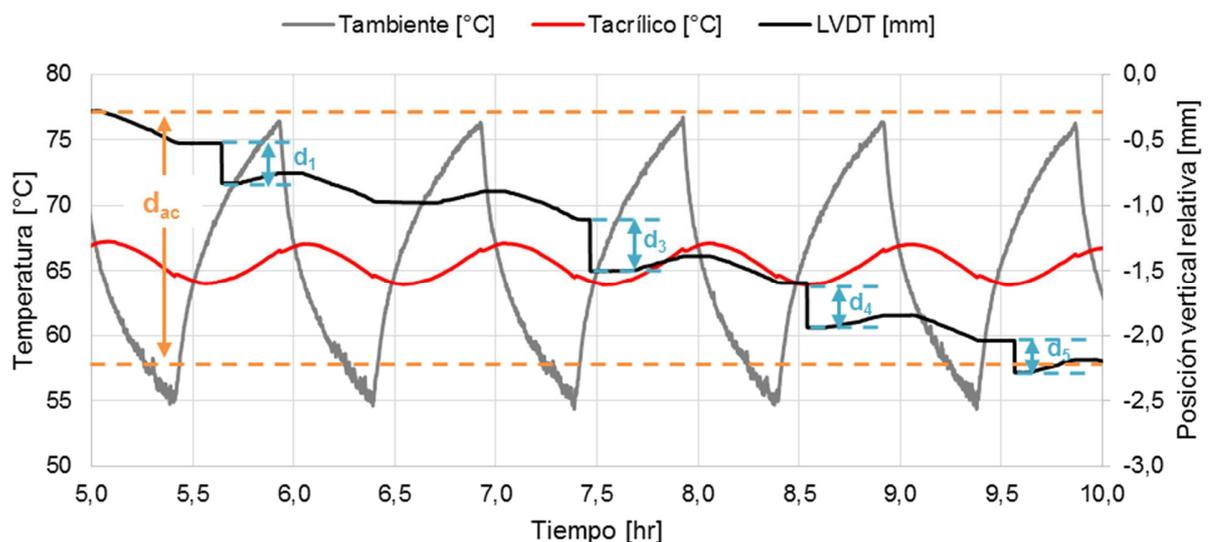
En la Figura 20 se muestra el registro típico de un ensayo con base horizontal  $\eta = 0^\circ$ , el cual comprende tres etapas térmicas: calentamiento ( $\sim 2$  hrs), ciclo térmico ( $\sim 15.5$  hrs) y enfriamiento ( $\sim 6.5$  hrs). El calentamiento inicial tiene una amplitud de  $\Delta T \approx 49^\circ\text{C}$ , y se induce una doble amplitud del ciclo térmico en el acrílico  $A_{\text{ciclo}} \approx 3.2^\circ\text{C}$ . El periodo de cada ciclo de temperatura es  $t_{\text{ciclo}} \approx 59$  min, con una fase de calentamiento de 31 min y de enfriamiento de 28 min. Se observa que durante la fase de calentamiento inicial la cuña sufre una expansión relativamente constante hasta alcanzar la temperatura máxima, mientras que en la fase de enfriamiento final la cuña sufre un desplazamiento escalonado regular. En la etapa cíclica, se aprecian sucesivos ciclos de expansión y contracción de la cuña, junto con la presencia de caídas abruptas en algunos de sus ciclos. El desplazamiento total en la etapa cíclica de 15.5 hrs es  $-5.52\text{mm}$ . Con respecto a la etapa de enfriamiento final del registro, se observa que la cuña sufre un desplazamiento  $d_{\text{ef}} \approx -4.18\text{mm}$ , el cual corresponde a la suma de caídas graduales y abruptas de la cuña.

En la etapa cíclica y en la de enfriamiento final se tienen desplazamientos elásticos y plásticos. Los desplazamientos plásticos se asocian a caídas abruptas de la cuña por reacomodamiento del sistema hasta alcanzar una nueva posición de equilibrio a causa del desplazamiento lateral acumulado del bloque, mientras que los desplazamientos elásticos se relacionan con la expansión y contracción térmica que sufre el acrílico sin que exista movimiento relativo entre las piezas.



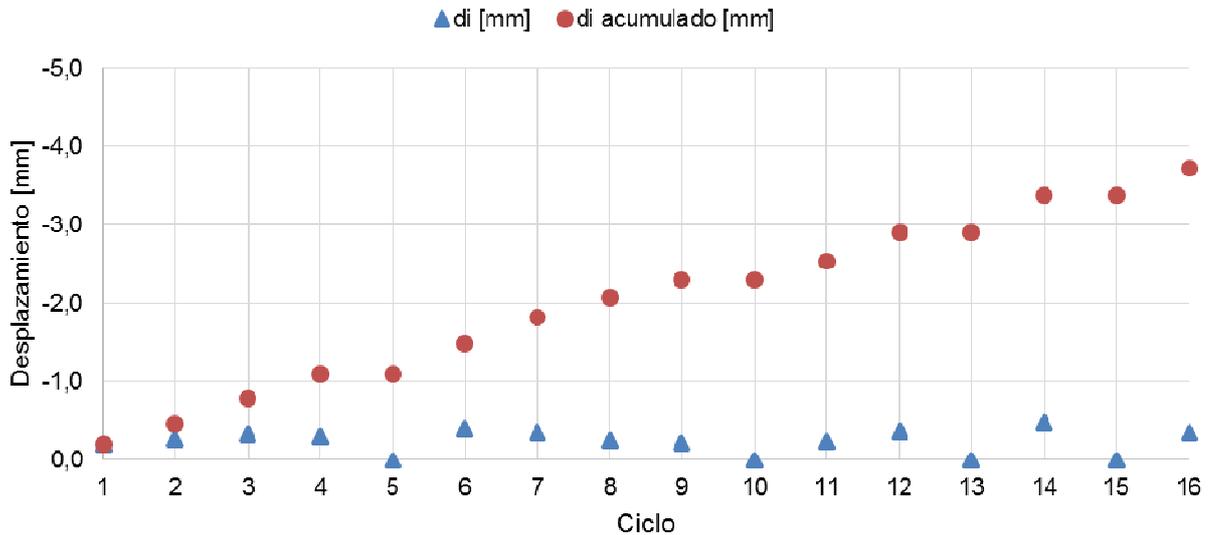
**Figura 20:** Registro de un ensayo sobre marco de aluminio con  $\eta=0^\circ$ ,  $\beta=6^\circ$  y un periodo de  $t_{\text{ciclo}}=59$  min.

En la Figura 21 se muestra una ventana temporal de 5 hrs de la etapa cíclica de temperatura del registro anterior. Se aprecian caídas abruptas en las fases de calentamiento de algunos de sus ciclos ( $d_1$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  y  $d_5$ ). La cuña en este periodo sufre un desplazamiento acumulado  $d_{ac} \approx -1.91$  mm.



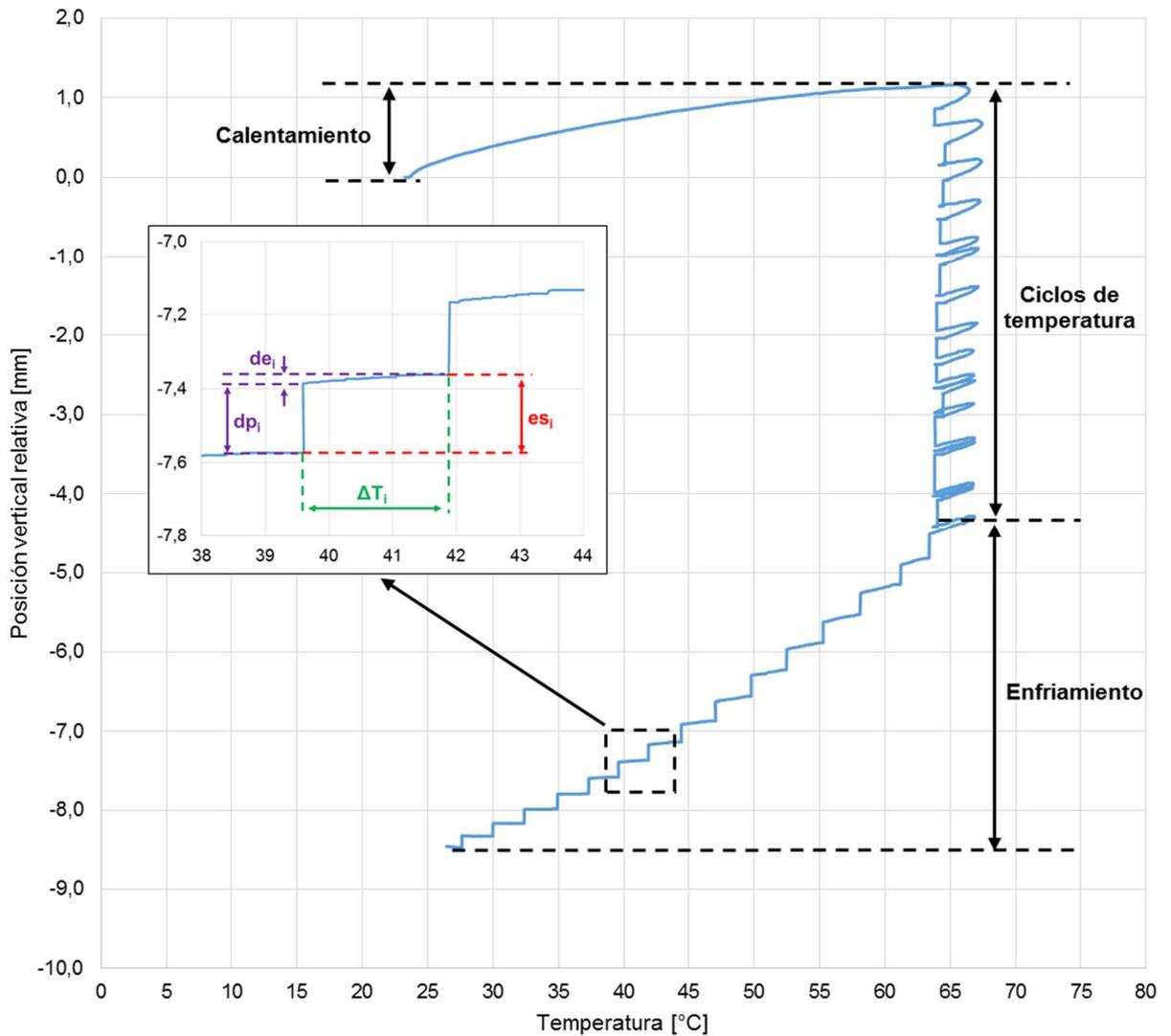
**Figura 21:** Ventana temporal del ensayo en la Figura 20.

En la Figura 22 se indican los valores de las caídas unitarias  $d_i$  y acumuladas de la etapa cíclica de temperaturas del registro de la Figura 20. La sumatoria de las caídas abruptas en algunos de sus ciclos es  $\sum d_i = -3.72\text{mm}$ , lo que representa un 67.4% del desplazamiento total de la etapa cíclica.



**Figura 22:** Desplazamientos plásticos durante la etapa cíclica del ensayo en la Figura 20.

En la Figura 23 se muestra la variación de la posición vertical de la cuña en función de la temperatura al interior del bloque de acrílico del registro de la Figura 20. Se distinguen las etapas térmicas del registro: calentamiento (de 23°C a 65°C aprox.), etapa cíclica (temperatura media ~65°C) y enfriamiento (de 65°C a 26°C aprox.). En el inserto de la Figura 23 se muestra el detalle de la fase de enfriamiento del registro, distinguiéndose los desplazamientos elásticos ( $d_{e_i}$ ) y plásticos ( $d_{p_i}$ ) según cada escalón ( $es_i$ ) y el cambio de temperatura respectivo ( $\Delta T_i$ ).

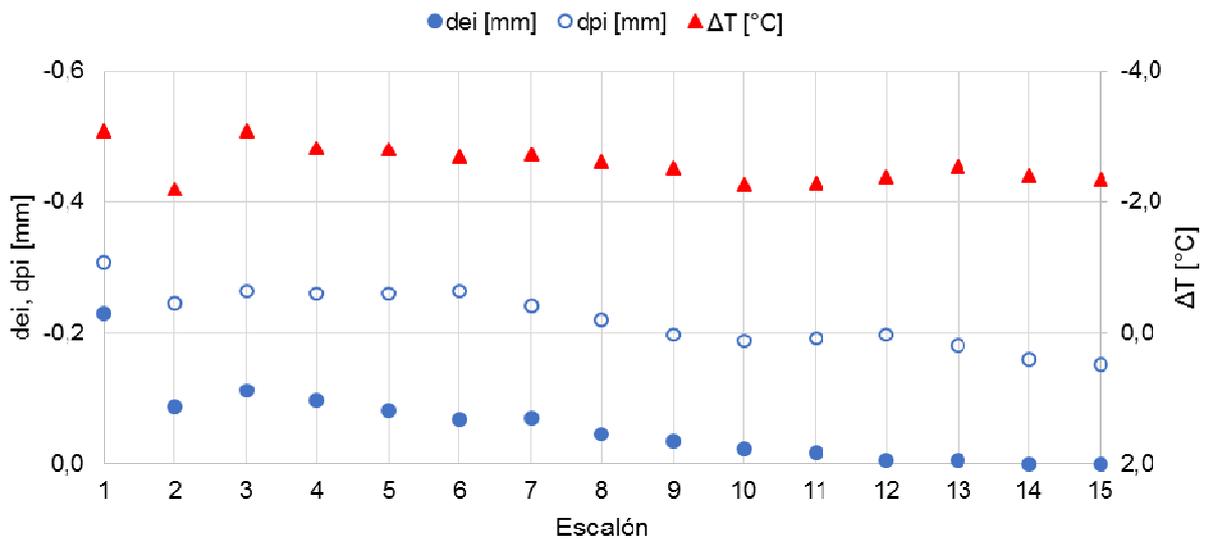


**Figura 23:** Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico del ensayo en la Figura 20. El inserto indica el detalle de la fase de enfriamiento final, indicando los desplazamientos elásticos  $de_i$  y desplazamientos plásticos  $dp_i$  en un escalón  $es_i$ .

A partir de la fase de calentamiento inicial del registro de la Figura 23 es posible comparar la expansión térmica práctica y teórica del acrílico. Se observa que la cuña sufre una expansión  $\Delta L_r = 1.09 \text{ mm}$  con una diferencia de temperatura  $\Delta T = 43.2^\circ\text{C}$ , mientras que la expansión libre teórica sería  $\Delta L_t = \alpha_{\text{acrílico}} \cdot \Delta T \cdot L_0 = 90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C} \cdot 43.2^\circ\text{C} \cdot 350 \text{ mm} = 1.36 \text{ mm}$ . De esta manera, las propiedades teóricas del acrílico se ajustan a lo registrado experimentalmente, debido a que la diferencia entre ambas magnitudes se debe

principalmente a la resistencia por fricción en los contactos de la cuña que se oponen al desplazamiento térmico libre de la pieza.

En la Figura 24 se muestran los valores de cada uno de los desplazamientos plásticos  $dp_i$  y elásticos  $de_i$  en la etapa de enfriamiento final de la Figura 23. Se observa que la magnitud de los desplazamientos plásticos disminuye tras cada escalón y los desplazamientos elásticos tienden a cero.



**Figura 24:** Desplazamientos plásticos y elásticos de la etapa de enfriamiento final del ensayo en la Figura 20. La definición de  $de_i$  y  $dp_i$  se encuentra en el inserto de la Figura 23.

#### 4.2. Resumen de Resultados

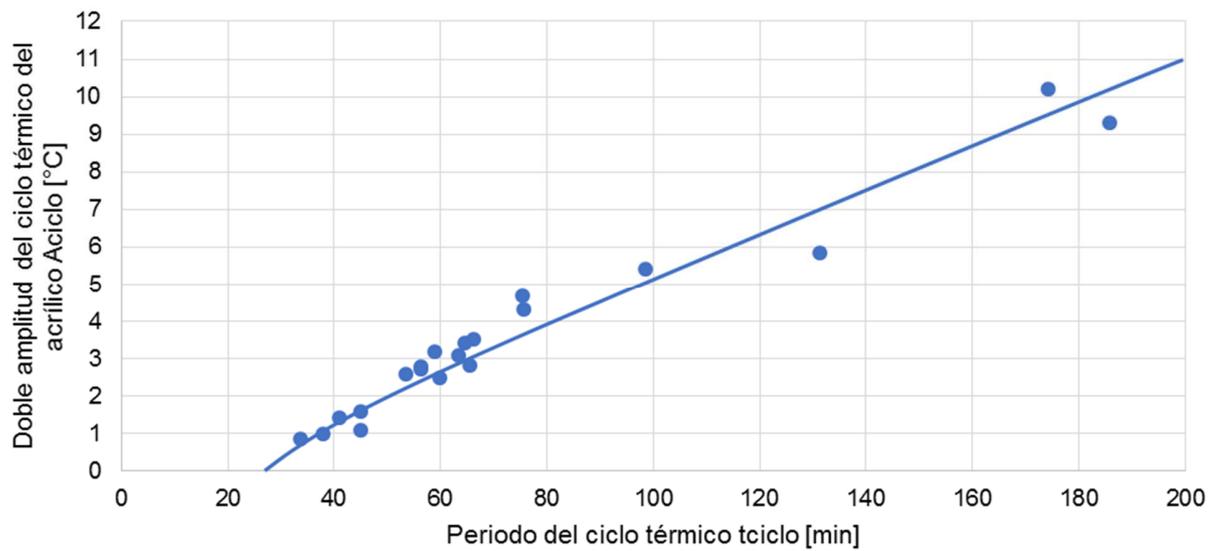
En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados de cada uno de los ensayos con el periodo  $t_{ciclo}$  y la doble amplitud  $A_{ciclo}$  del ciclo térmico, la amplitud de temperatura al interior del contenedor, los desplazamientos por ciclo y la fase en que presenta las caídas plásticas. El desplazamiento vertical por ciclo promedio de la cuña  $D_{cuña}$  se corrige por la inclinación de la base  $\eta$ , ya que se considera sólo el desplazamiento en la dirección perpendicular a la base del marco de aluminio. El desplazamiento horizontal del bloque  $D_{bloque}$  está relacionado geoméricamente con el desplazamiento vertical de la cuña  $D_{cuña}$  como  $D_{bloque} = D_{cuña} \cdot \tan(\beta)$ .

**Tabla 4:** Resumen de los resultados de los ensayos realizados con el marco de aluminio.

Ensayo [n°]	Ángulo de inclinación de la base $\eta$ [°]	Doble amplitud del ciclo térmico al interior del contenedor $A_{con}$ [°C]	Doble amplitud del ciclo térmico al interior del acrílico $A_{ciclo}$ [°C]	Periodo del ciclo térmico $t_{ciclo}$ [min]	Fase en la que presenta caídas plásticas	Desplazamiento vertical por ciclo promedio de la cuña $D_{cuña}$ [mm/ciclo]	Desplazamiento horizontal por ciclo promedio del bloque $D_{bloque}$ [mm/ciclo]
1	0	17.8	0.9	34	-	0.002	0.000
2	0	18.7	1.4	41	C	-0.189	0.020
3	0	22.0	2.8	56	C	-0.323	0.034
4	0	21.6	3.2	59	C	-0.367	0.039
5	0	21.2	4.3	76	C/E	-0.475	0.050
6	0	21.0	5.4	99	C/E	-0.503	0.053
7	5	18.6	1.0	38	-	-0.020	0.002
8	5	19.1	1.6	45	C	-0.190	0.020
9	5	21.8	2.7	56	C	-0.293	0.031
10	5	22.0	3.5	66	C	-0.327	0.034
11	5	23.6	5.8	131	C/E	-0.459	0.048
12	7	16.0	1.1	45	C	-0.142	0.015
13	7	21.9	2.6	53	C	-0.290	0.031
14	7	20.2	2.5	60	C	-0.240	0.025
15	7	22.3	3.1	63	C	-0.322	0.034
16	7	21.5	3.4	65	C	-0.387	0.041
17	7	20.5	2.8	66	C	-0.247	0.026
18	7	21.5	10.2	174	C/E	-0.905	0.095
19	7	20.4	9.3	186	C/E	-0.901	0.095
20	10	23.2	4.7	75	C	-0.567	0.060

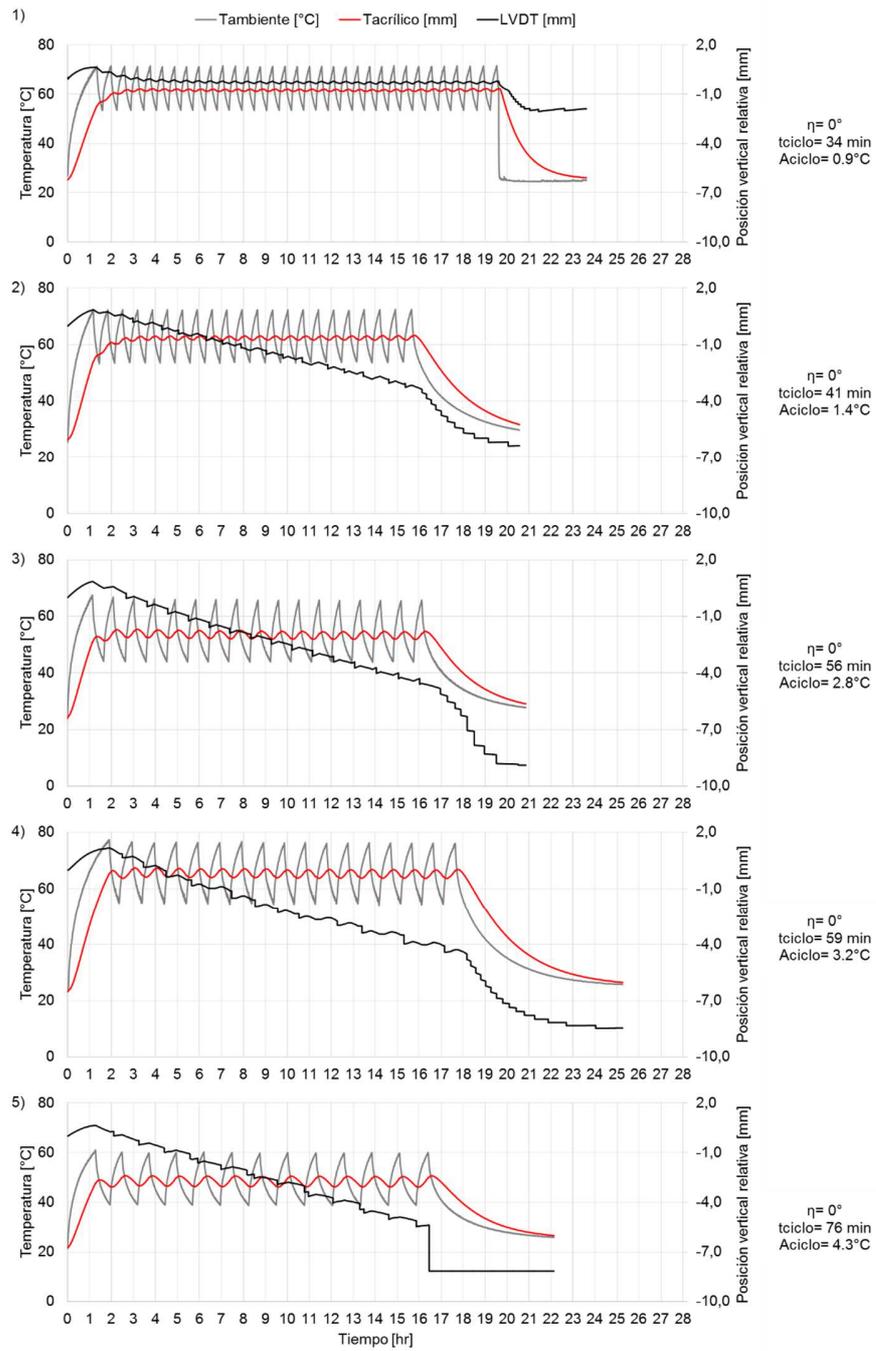
C: Calentamiento E: Enfriamiento C/E: Calentamiento y enfriamiento

Como se describe en la sección sobre el análisis térmico, los tiempos de calentamiento y enfriamiento del sistema afectan el comportamiento térmico del acrílico. En la Figura 25 se comprueba la directa proporcionalidad entre el periodo cíclico y la doble amplitud de temperatura al interior del acrílico en la etapa cíclica. La tendencia indica que periodos menores a 25 min aproximadamente no producen cambios de temperatura al interior del acrílico.

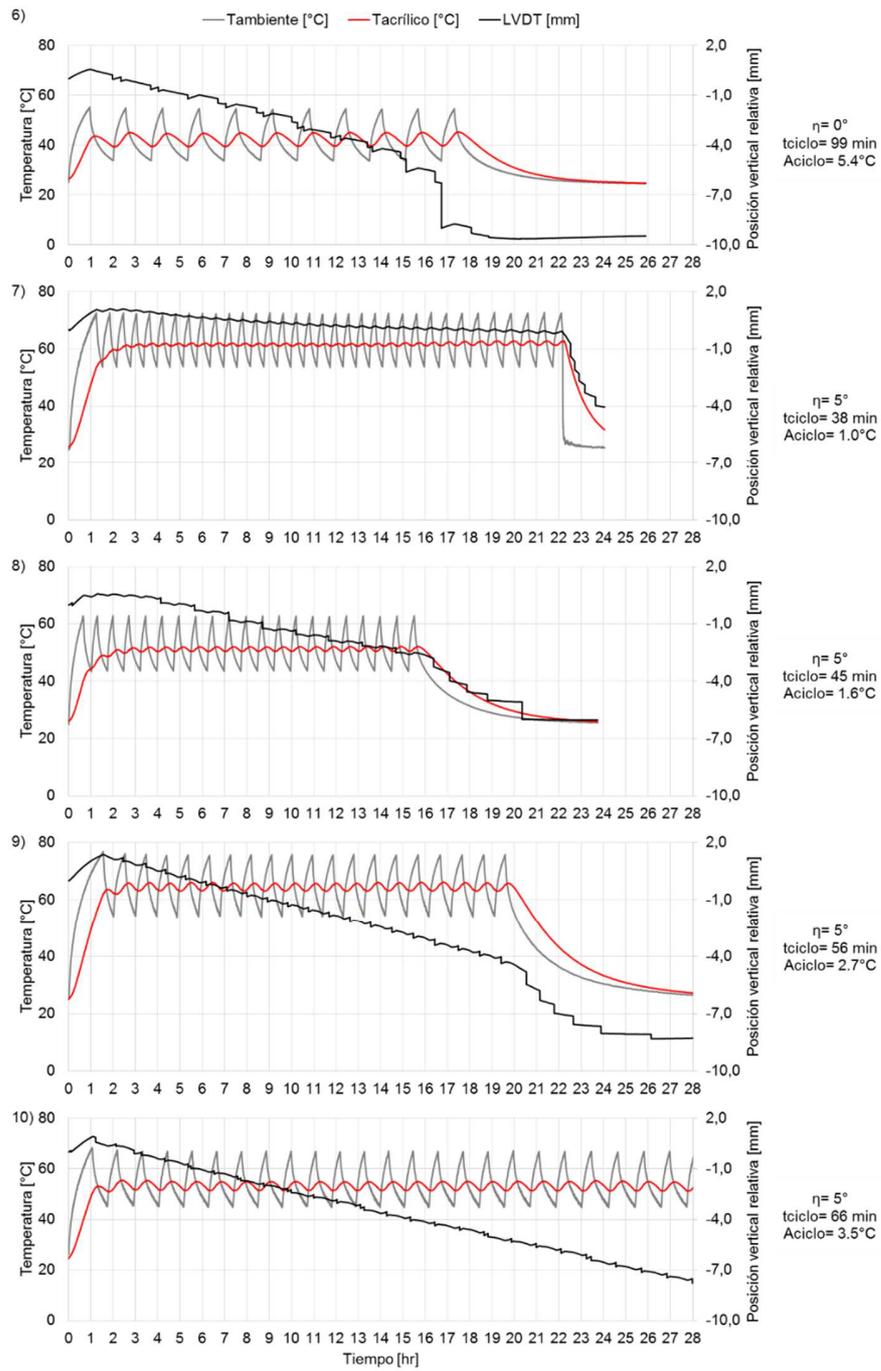


**Figura 25:** Relación entre el periodo cíclico y la amplitud de la temperatura al interior del acrílico para los 19 ensayos.

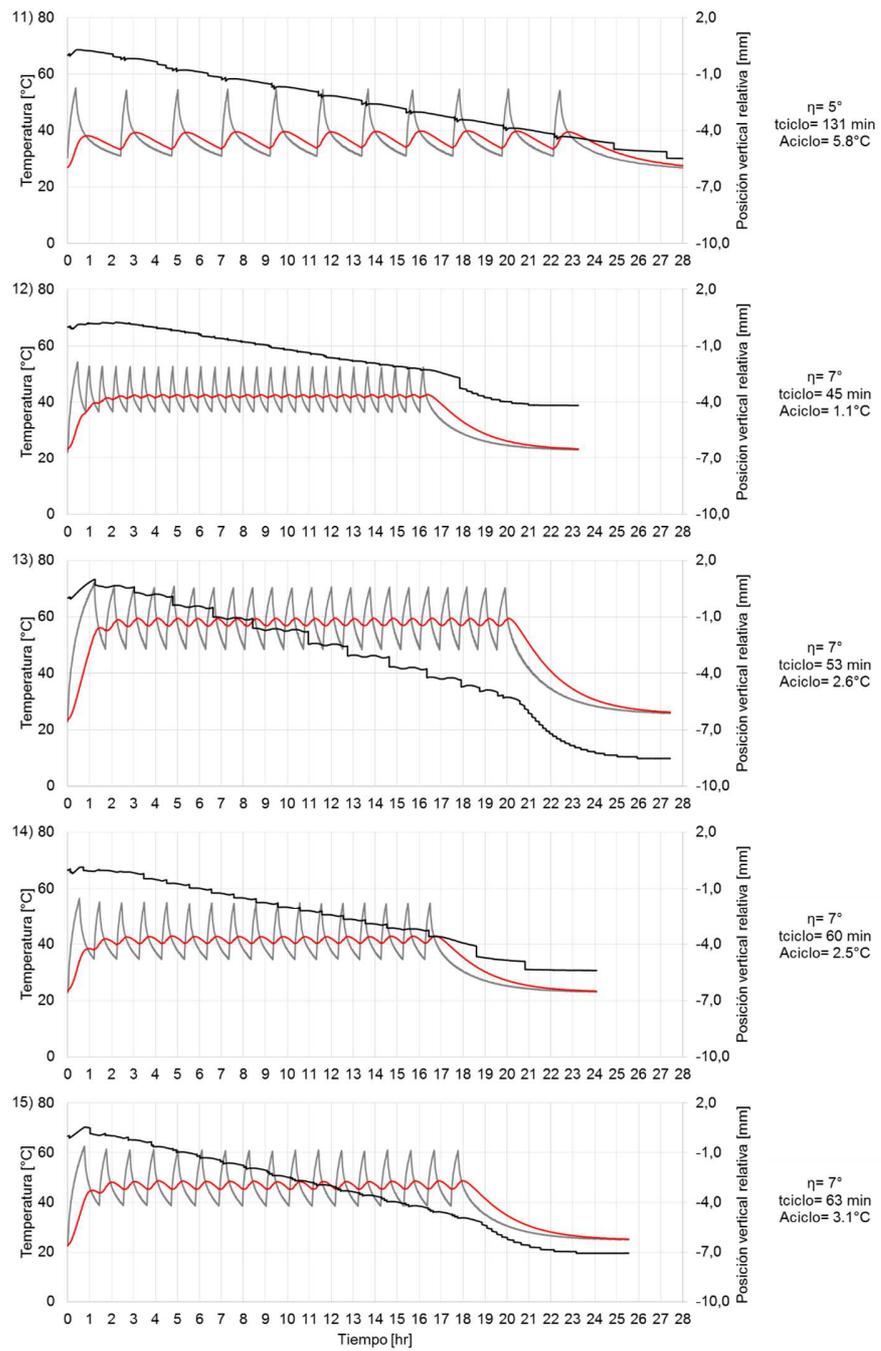
En la Figura 26 se muestran los registros completos de todos los ensayos organizados según la Tabla 4, los cuales comprenden las etapas térmicas de calentamiento inicial, ciclo térmico y enfriamiento final.



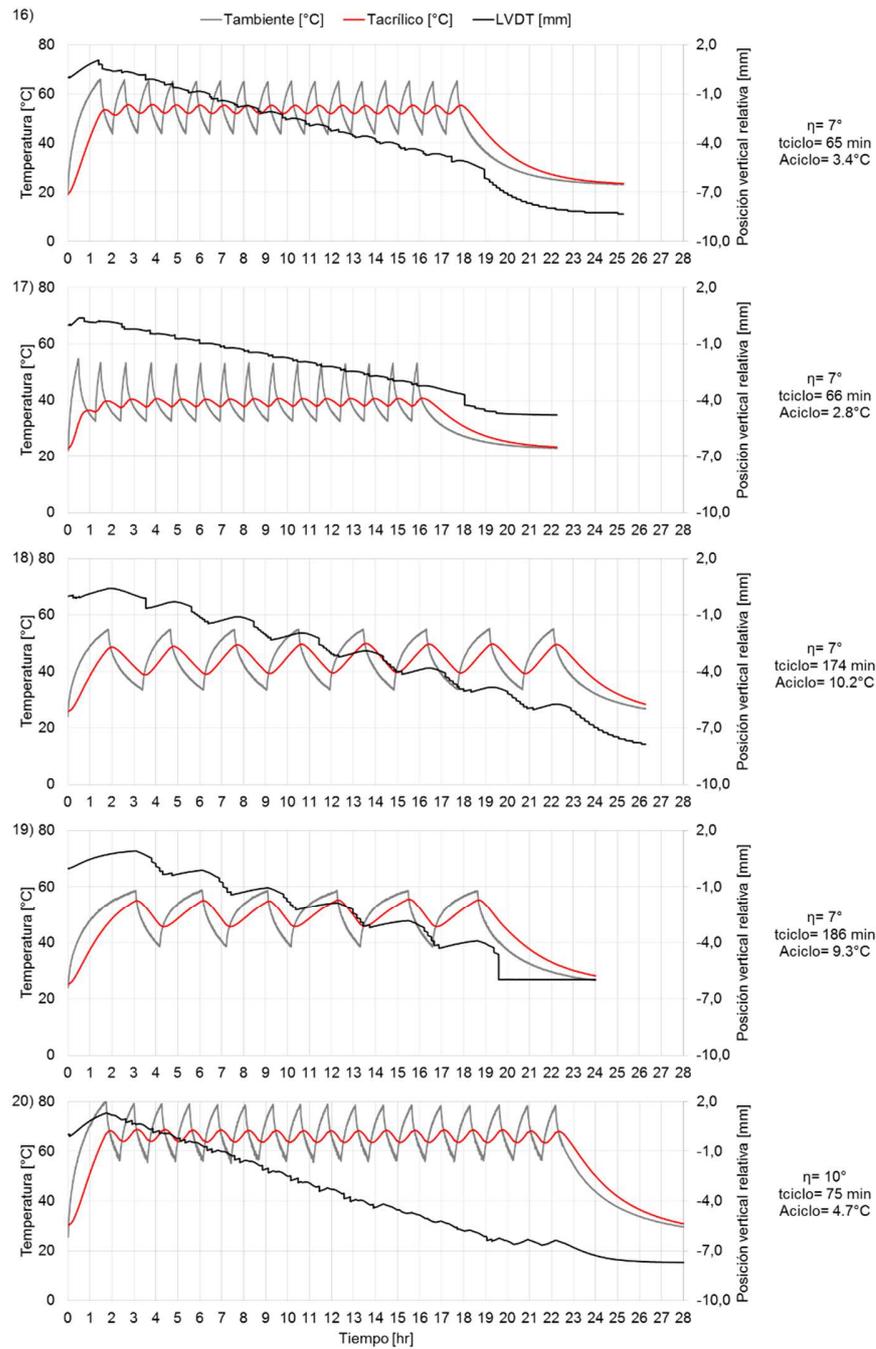
**Figura 26:** Registros completos de todos los ensayos realizados que se muestran en la Tabla 4.



**Figura 26:** Registros completos de todos los ensayos realizados que se muestran en la Tabla 4 (continuación).



**Figura 26:** Registros completos de todos los ensayos realizados que se muestran en la Tabla 4 (continuación).



**Figura 26:** Registros completos de todos los ensayos realizados que se muestran en la Tabla 4 (continuación).

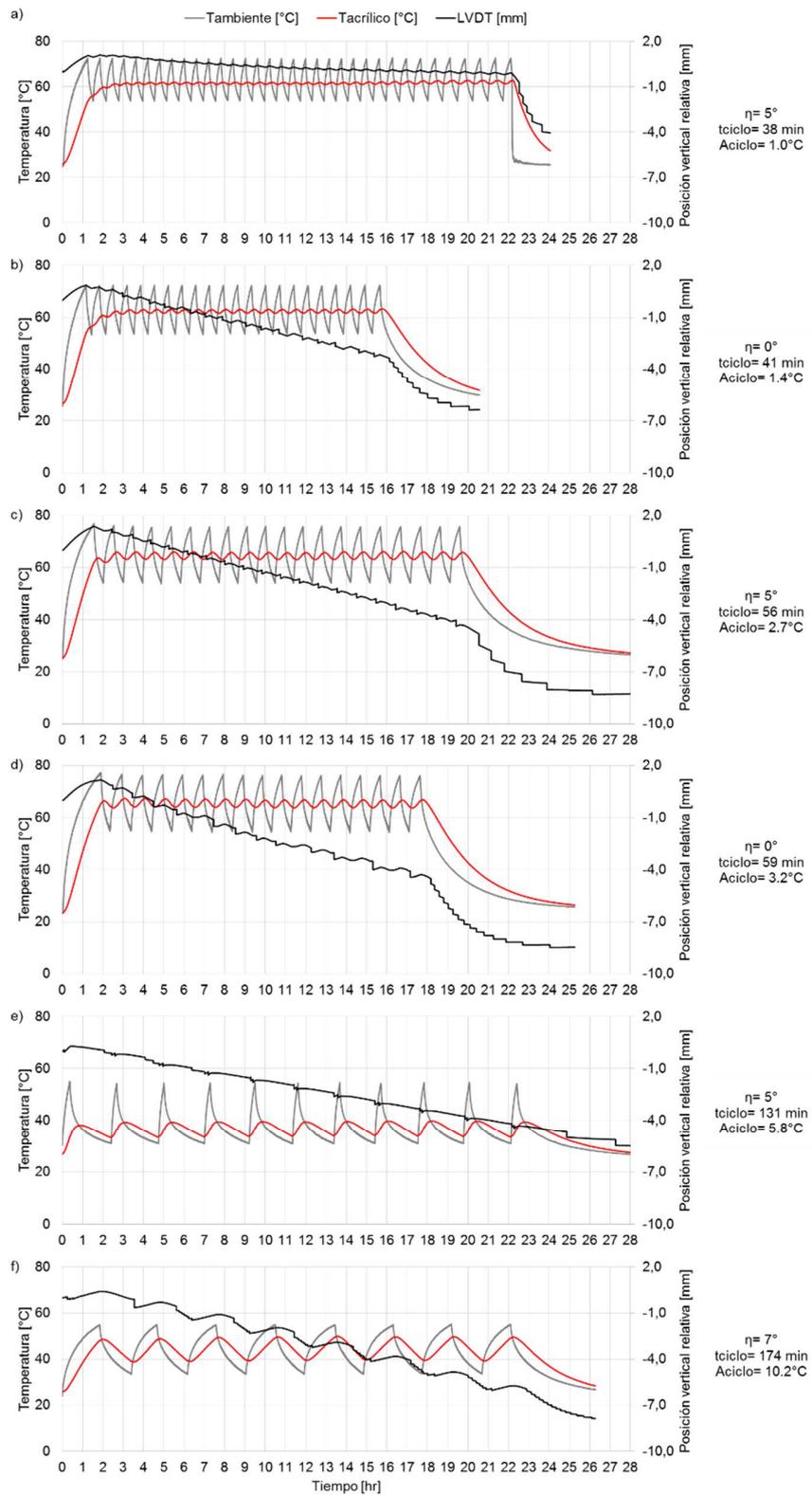
### 4.3. Resultados Típicos

En esta sección se muestran los resultados típicos de los ensayos según los ángulos de inclinación de la base  $\eta$ , los periodos de los ciclos de temperatura  $t_{ciclo}$ , la temperatura

dentro del contenedor  $T_{\text{ambiente}}$ , la temperatura al interior del acrílico  $T_{\text{acrílico}}$  y el desplazamiento de la cuña (LVDT). En la Figura 27 se muestran los registros de los ensayos durante 28 hrs, los cuales comprenden las etapas térmicas de calentamiento inicial, ciclo térmico y enfriamiento final. Los registros considerados son los n° 7 (a), 2 (b), 9 (c), 4 (d), 11 (e) y 18 (f) de la Tabla 4.

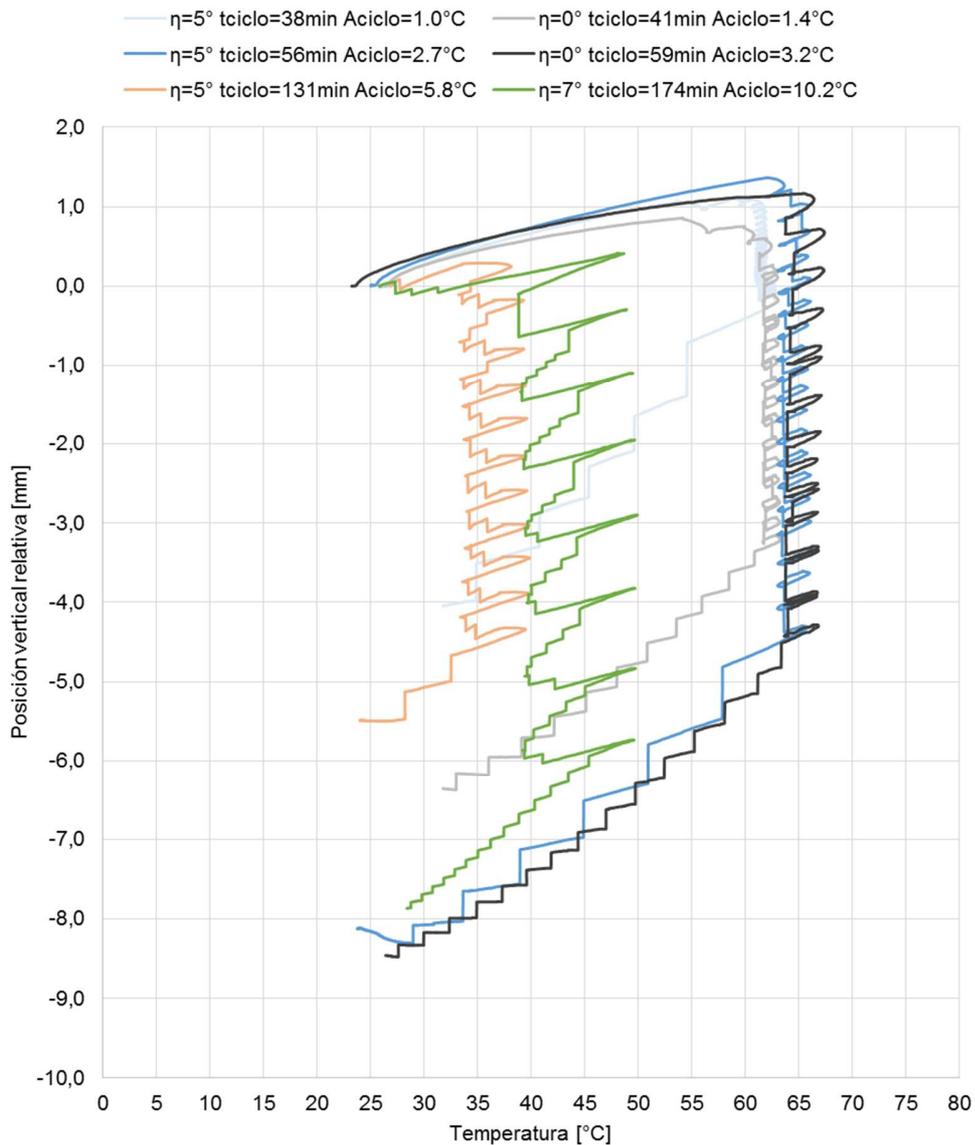
A partir de los registros completos indicados en los resultados experimentales en la Figura 27, se observa que es factible reproducir experimentalmente el mecanismo de cuña inducido térmicamente. Los cambios térmicos ambientales inducen sucesivos ciclos de expansión y contracción en el sistema, generando una acumulación de desplazamientos debido a los desplazamientos plásticos de las piezas. La etapa de enfriamiento final provoca una sucesión de caídas graduales de la cuña, cuyas magnitudes se atenúan a medida que se alcanza la temperatura de equilibrio con el entorno ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ , temperatura media del laboratorio).

Por otro lado, a medida que se incrementa la diferencia entre la temperatura media de la etapa cíclica del contenedor y la temperatura de equilibrio del sistema con el entorno ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ), las fases de calentamiento son más extensas y las de enfriamiento más breves. Esta diferencia de comportamiento se puede observar en los registros de la Figura 27 (e) y Figura 27 (c), los cuales poseen una temperatura promedio de la etapa cíclica de  $\sim 40^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 65^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. En el ensayo de la Figura 27 (e) se obtiene en la etapa cíclica de temperatura una duración promedio de la fase de calentamiento y enfriamiento de 17 min y 115 min, respectivamente; mientras que en el registro de la Figura 27 (c) se tiene una duración de 28 min para ambas fases. Adicionalmente, se observa que la diferencia entre las duraciones de ambas fases es superior a medida que la temperatura media de la etapa cíclica del contenedor es más cercana a la temperatura de equilibrio con el entorno, debido principalmente al incremento de la duración de la etapa de enfriamiento. Por lo tanto, la magnitud de los periodos de las etapas cíclicas de temperatura depende principalmente de la duración de la fase de enfriamiento. En consecuencia, el desplazamiento acumulado de la cuña es mayor cuando la temperatura media de la etapa cíclica del contenedor es cercana a la temperatura de equilibrio con el ambiente, debido a que aumenta el periodo del ciclo térmico.



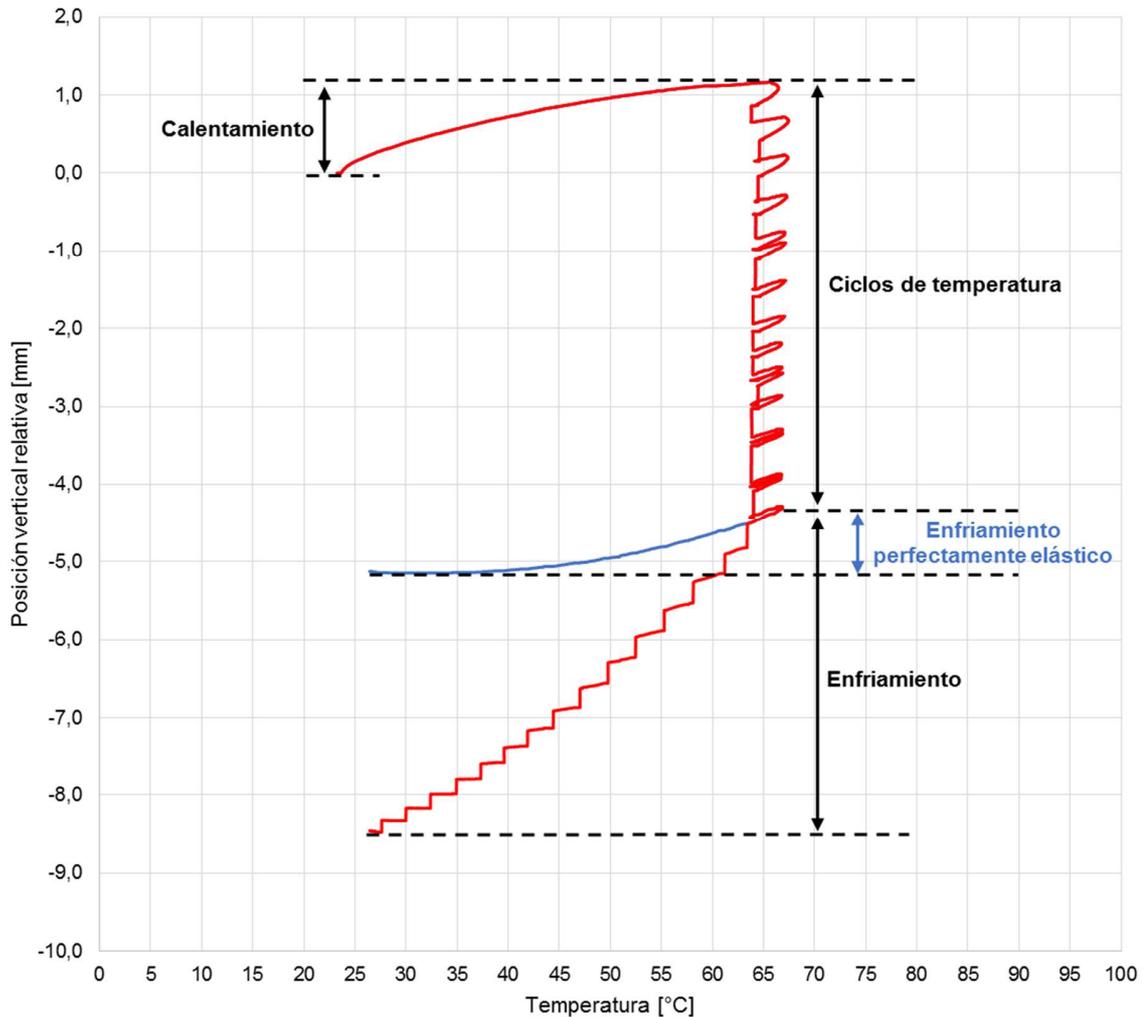
**Figura 27:** Registros completos de algunos de los ensayos de la Tabla 4. El resto de los ensayos de la Tabla 4 se pueden ver en la Figura 26.

En la Figura 28 se muestra la variación de la posición vertical de la cuña en función de la temperatura al interior del bloque de acrílico en los ensayos de la Figura 27. Se observa que durante la etapa de calentamiento inicial la cuña se expande gradualmente. En la etapa cíclica se distinguen los sucesivos ciclos de expansión y contracción de la cuña junto con las caídas plásticas. En la etapa de enfriamiento final la cuña presenta un desplazamiento escalonado regular, debido al reacondicionamiento de la cuña. En el Anexo B se indica el gráfico de la Figura 28 con todos los ensayos.



**Figura 28:** Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico de los ensayos en la Figura 27.

Se observa que el modo y magnitud de las caídas plásticas en la etapa cíclica de los ensayos depende principalmente del periodo  $t_{\text{ciclo}}$  y de la amplitud  $A_{\text{ciclo}}$  de los ciclos de temperatura. Se tienen desplazamientos plásticos sólo en la etapa cíclica y en la de enfriamiento final. La posición vertical relativa de la cuña depende principalmente de la duración de la etapa cíclica y de la etapa de enfriamiento, debido a que en ambas fases la cuña sufre caídas plásticas.

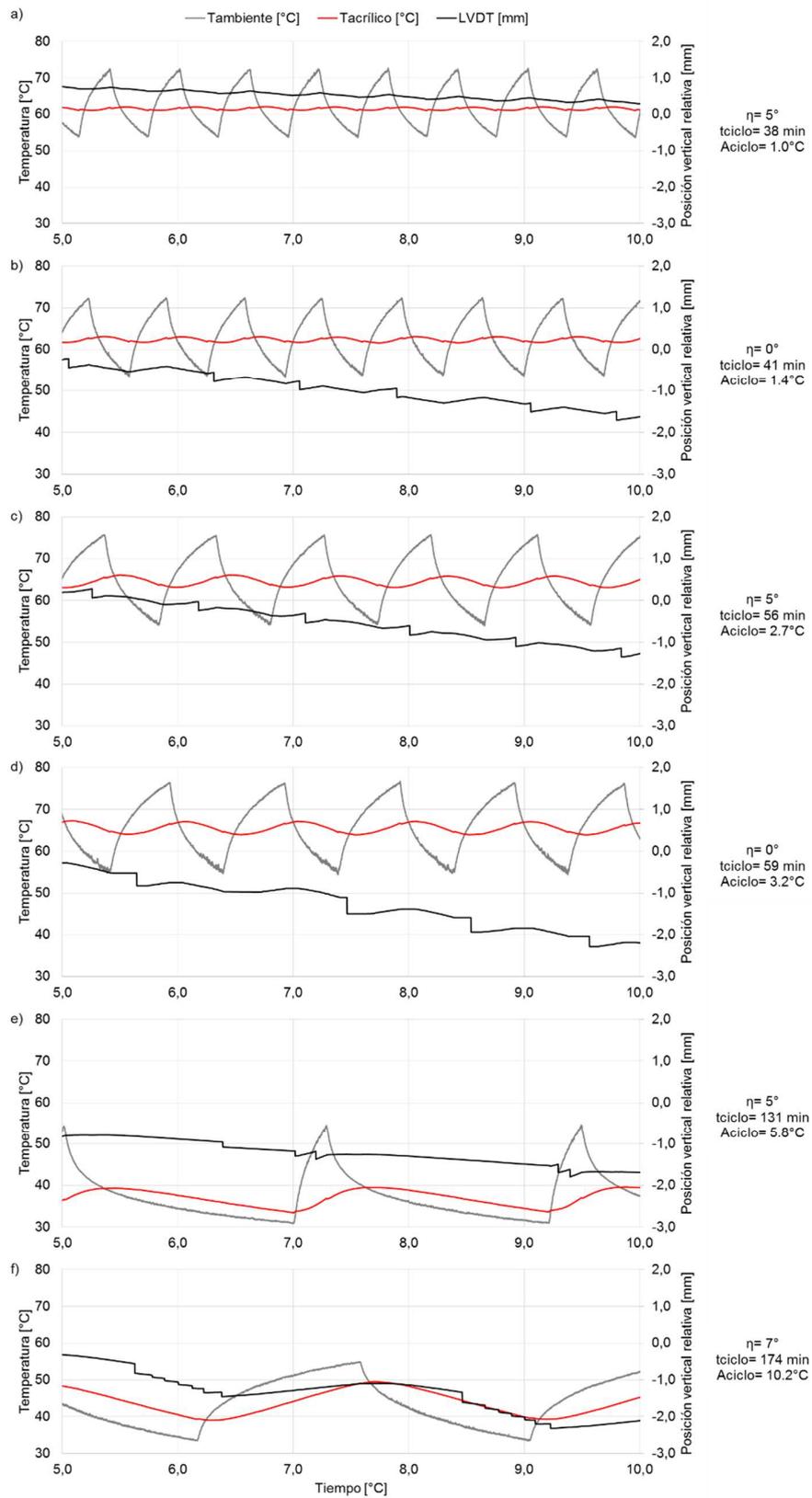


**Figura 29:** Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico del ensayo en la Figura 27 (d) incluyendo la etapa de enfriamiento perfectamente elástico. El enfriamiento perfectamente elástico corresponde a la etapa de enfriamiento descontando los desplazamientos plásticos.

El desplazamiento durante la etapa de calentamiento depende mayormente del coeficiente de expansión térmica del acrílico, mientras que el desplazamiento durante la etapa de enfriamiento depende tanto del coeficiente de expansión térmica como de la magnitud de los desplazamientos plásticos. En la Figura 29 se muestra la variación de la posición vertical de la cuña según la temperatura al interior del acrílico del ensayo en la Figura 27 (d) eliminando los desplazamientos plásticos de la etapa de enfriamiento (enfriamiento perfectamente elástico). Se verifica en la figura que la etapa de calentamiento posee un comportamiento asintótico similar al de la etapa de enfriamiento en condiciones perfectamente elásticas.

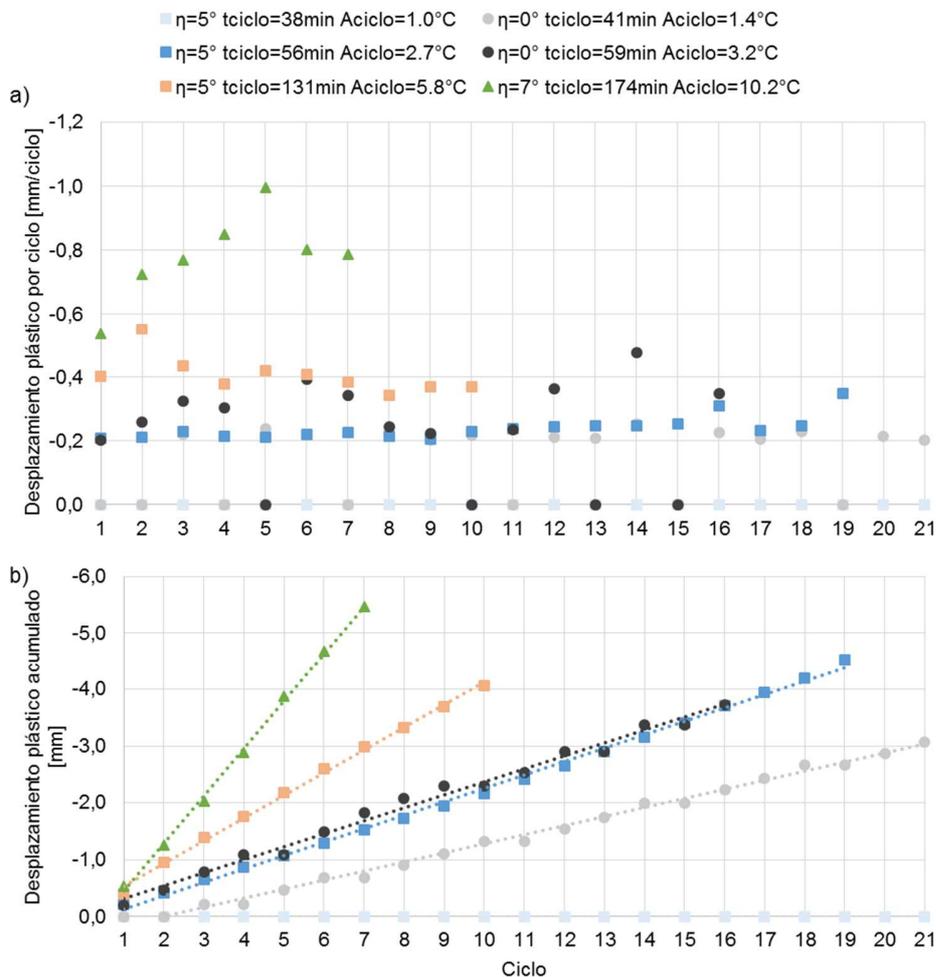
#### **4.3.1. Etapa Cíclica**

En la Figura 30 se muestra una ventana temporal de 5 hrs de la etapa cíclica de los ensayos de la Figura 27, se nota que los desplazamientos plásticos durante los ciclos de temperatura se generan en las fases de calentamiento o enfriamiento según el periodo cíclico  $t_{\text{ciclo}}$  de cada uno de los ensayos, como se indica en la Tabla 4. Por ejemplo, en la ventana temporal de la Figura 30 (e) para el ensayo con una inclinación  $\eta=5^\circ$  y un periodo cíclico de 131 min, se observa que la cuña sufre un desplazamiento plástico tanto en las fases de calentamiento como de enfriamiento; mientras que en el registro de la Figura 30 (c), que posee la misma inclinación de la base, pero un periodo de 56 min, las caídas ocurren sólo en las fases de calentamiento. Aún más, en el registro de la Figura 30 (f), que posee un inclinación  $\eta =7^\circ$  y un periodo de 174 min, los desplazamientos plásticos ocurren mayormente en las fases de enfriamiento de cada ciclo. De esta manera, los desplazamientos plásticos tienden a presentarse en las fases de calentamiento cuando se tienen periodos cortos y en las de enfriamiento cuando se tienen periodos largos. Durante la fase de enfriamiento el bloque se contrae, incrementando la separación de la junta posterior del bloque con la cuña, lo que permite que la cuña descienda hasta una nueva posición de equilibrio. Así, se deduce que los desplazamientos plásticos se tienden a desarrollar en las fases de enfriamiento de cada ciclo, pero si la duración de estas fases es corta, entonces las caídas se presentan en las fases de calentamiento del ciclo siguiente. Además, se observa que este comportamiento es relativamente independiente del ángulo de inclinación de la base  $\eta$ .



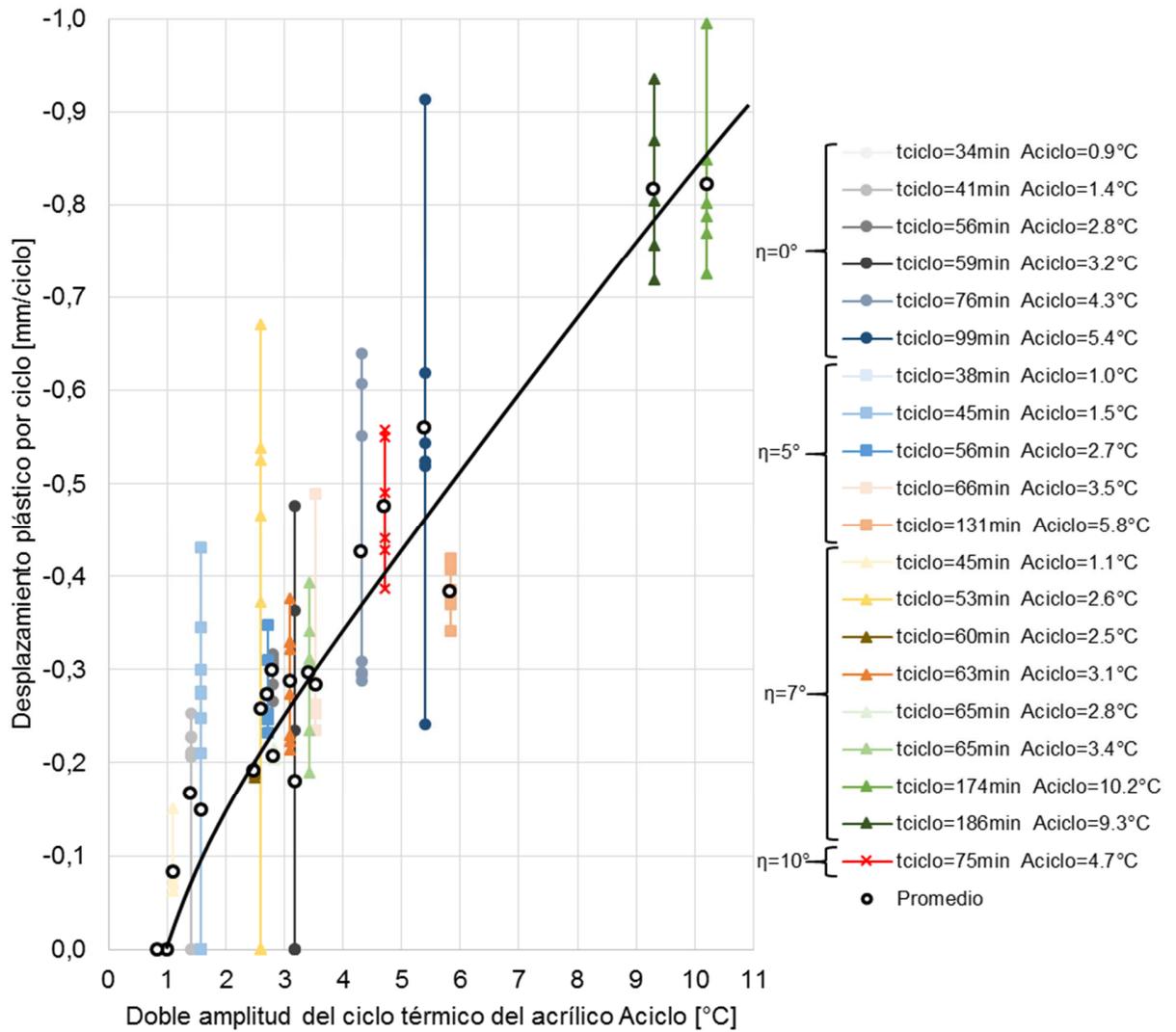
**Figura 30:** Ventana temporal de los ensayos en la Figura 27.

La Figura 31 muestra los desplazamientos plásticos por ciclo y acumulados en la etapa cíclica de los ensayos en la Figura 27. Se observa que los desplazamientos plásticos acumulados aumentan con el periodo  $t_{\text{ciclo}}$  (y con la doble amplitud  $A_{\text{ciclo}}$ ) del ciclo térmico (Figura 31 b). El registro con el menor periodo  $t_{\text{ciclo}}$  no presenta acumulación de desplazamientos plásticos, mientras que el registro con el mayor periodo  $t_{\text{ciclo}}$  presenta la mayor acumulación de desplazamientos plásticos. Además, a medida que se incrementa el periodo  $t_{\text{ciclo}}$  (y la doble amplitud  $A_{\text{ciclo}}$ ) se tienden a presentar caídas plásticas sucesivas en cada uno de los ciclos, lo que se traduce en una acumulación sostenida de desplazamientos plásticos. En el Anexo B se indica el gráfico de la Figura 31 con todos los ensayos.

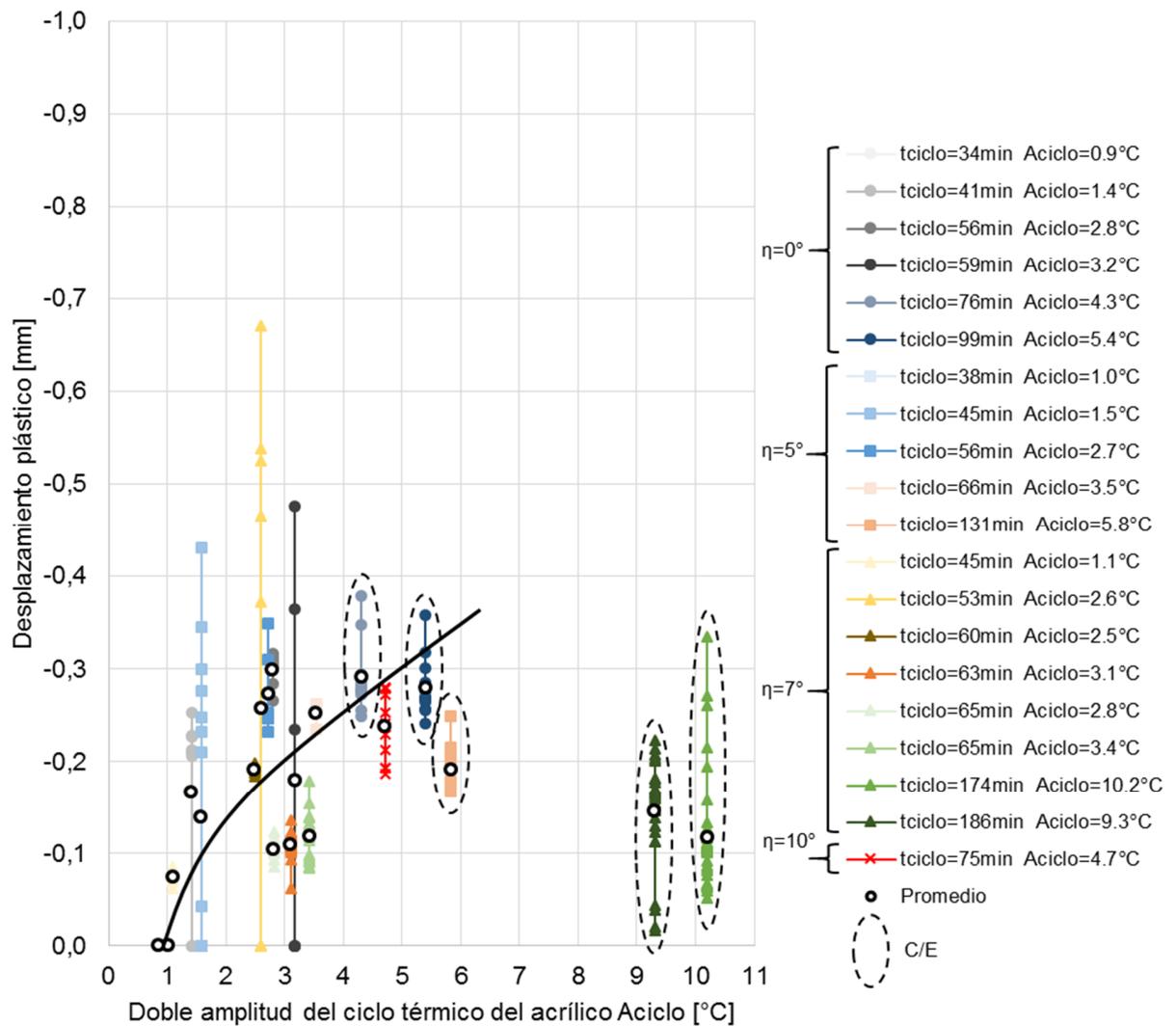


**Figura 31:** Caídas plásticas en las etapas cíclicas de los ensayos en la Figura 27: (a) desplazamientos por ciclo y (b) desplazamientos acumulados.

En la Figura 32 se muestran los valores de los desplazamientos plásticos por ciclo de los últimos ciclos continuos de los registros de la Tabla 4, junto con los desplazamientos plásticos por ciclo promedio. Se obtiene que la magnitud de los desplazamientos plásticos por ciclo promedio son proporcionales a la doble amplitud de temperaturas al interior del acrílico. La tendencia indica que las dobles amplitudes térmicas del acrílico menores a 1°C no inducirían desplazamientos plásticos.



**Figura 32:** Desplazamientos plásticos por ciclo en función de la doble amplitud del ciclo térmico del acrílico de los últimos ciclos continuos de los ensayos realizados sobre el marco de aluminio en la Tabla 4. El promedio de cada ensayo se representa con un círculo (o). La tendencia corresponde al promedio de los ensayos.



**Figura 33:** Desplazamientos plásticos en función de la doble amplitud del ciclo térmico del acrílico de los últimos ciclos continuos de los ensayos realizados sobre el marco de aluminio en la Tabla 4. El promedio de cada ensayo se representa con un círculo (●). C/E corresponde a los registros que presentan desplazamientos plásticos en la fase de calentamiento y enfriamiento. La tendencia corresponde al promedio de los ensayos que presentan desplazamientos plásticos sólo en la fase de calentamiento.

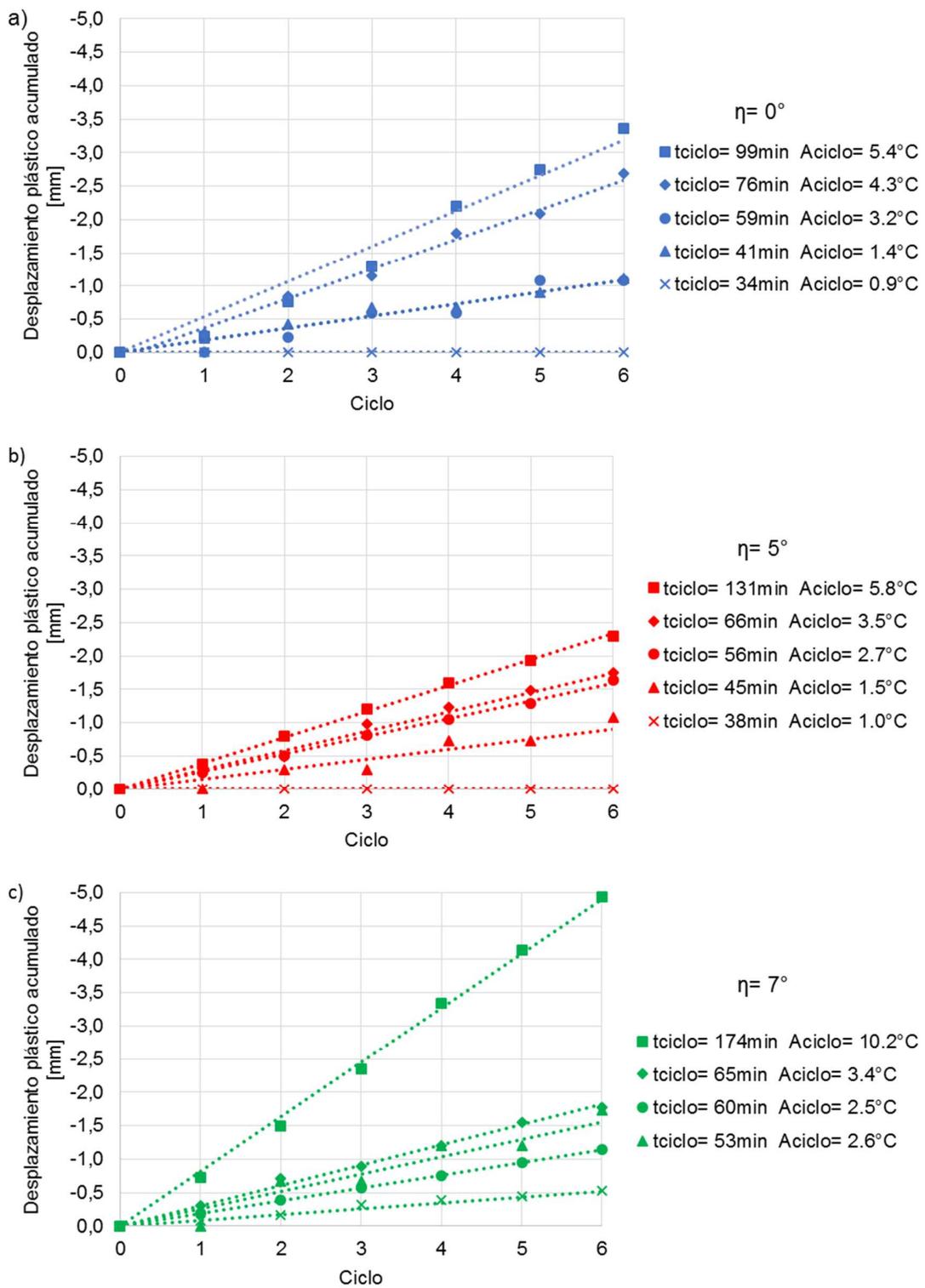
En la Figura 33 se muestran los desplazamientos plásticos de los últimos ciclos continuos de los registros de la Tabla 4, junto con los desplazamientos plásticos promedio. Además, se destacan como C/E aquellos ensayos que presentan desplazamientos plásticos en la fase de calentamiento y enfriamiento, mientras que el resto de los ensayos tiene

desplazamientos plásticos sólo en la fase de calentamiento. Se observa que los desplazamientos plásticos de los ensayos que tienen caídas sólo en la fase de calentamiento son proporcionales a la doble amplitud del ciclo térmico del acrílico  $A_{\text{ciclo}}$ , como se indica con la línea de tendencia. Por el contrario, los desplazamientos plásticos de los ensayos que presentan caídas en la fase de calentamiento y enfriamiento (C/E) no son proporcionales a la amplitud  $A_{\text{ciclo}}$ .

Se aprecia en la figura que la magnitud de los desplazamientos plásticos de los ensayos con amplitudes  $A_{\text{ciclo}}$  mayores a  $3.4^{\circ}\text{C}$  no supera los 0.4 mm, mientras que en algunos de los ensayos con amplitudes menores a  $3.4^{\circ}\text{C}$  se tienen desplazamientos plásticos de hasta 0.7 mm aproximadamente. Esto demuestra que los registros con mayores amplitudes  $A_{\text{ciclo}}$  presentan una mayor acumulación de desplazamientos por ciclo a pesar de poseer desplazamientos plásticos mayoritariamente inferiores a algunos de los registros con menores amplitudes.

La frecuencia de muestreo del equipo de adquisición de datos altera la magnitud de los desplazamientos plásticos que se registran, como los indicados en la Figura 33. Por ejemplo, una frecuencia de muestreo elevada permite registrar desplazamientos plásticos breves sucesivos, mientras que con una frecuencia de muestreo menor es posible que los mismos desplazamientos se registren como uno solo equivalente a la suma de todos ellos. Debido a esto, en el estudio experimental se considera una frecuencia de muestro constante de 0.2 Hz.

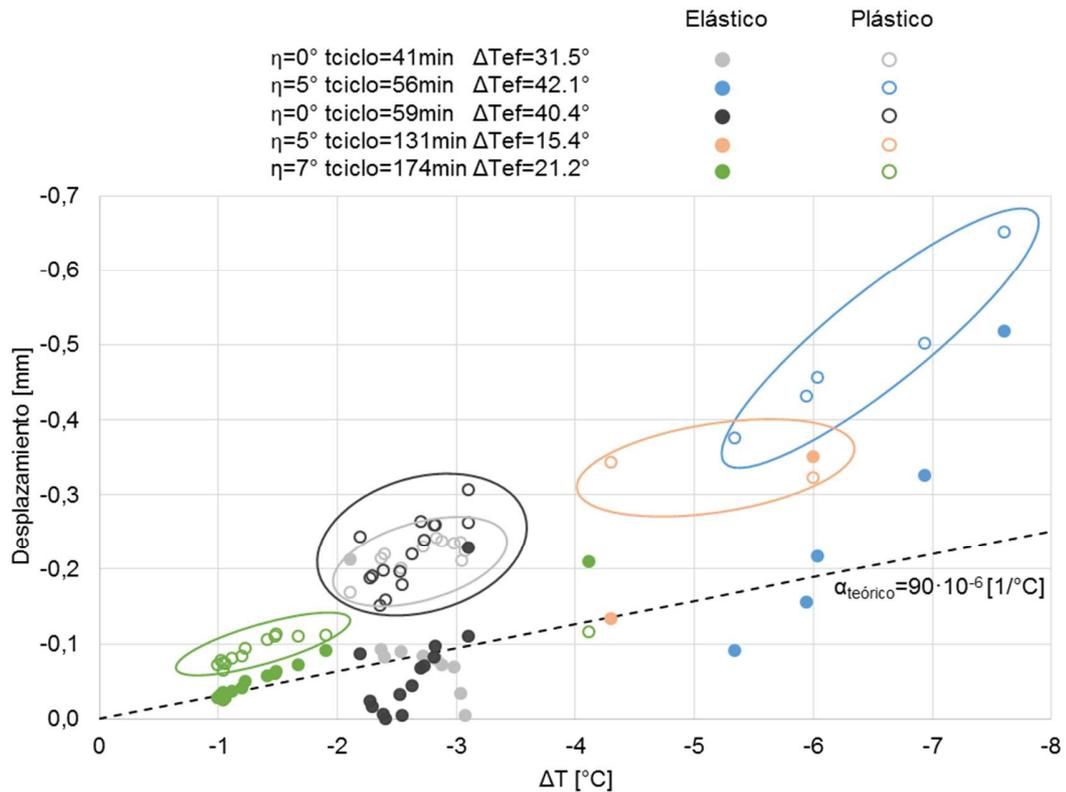
En la Figura 34 se indican los valores de los desplazamientos plásticos acumulados según el ángulo de inclinación de la base ( $\eta = 0^{\circ}, 5^{\circ}$  y  $7^{\circ}$ ). Se observa que los desplazamientos plásticos se acumulan principalmente en los registros con periodos  $t_{\text{ciclo}}$  y doble amplitudes de temperaturas al interior del acrílico  $A_{\text{ciclo}}$  mayores, lo que se cumple para cada ángulo de inclinación.



**Figura 34:** Desplazamientos plásticos acumulados por ciclo según inclinación de la base: (a)  $\eta=0^\circ$ , (b)  $\eta=5^\circ$  y (c)  $\eta=7^\circ$ .

### 4.3.2. Etapa de Enfriamiento Final

En la Figura 35 se indican los desplazamientos elásticos  $d_{ei}$  y plásticos  $d_{pi}$  en la etapa de enfriamiento final de los ensayos en la Figura 27 según el detalle indicado en el inserto de la Figura 23. Además, se muestra la curva de expansión térmica teórica del acrílico con un coeficiente de expansión térmica  $\alpha_{teórico} = 90 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  (Tabla 1) y para un largo inicial de 35 cm (que corresponde a la altura de la cuña). Se observa que los desplazamientos plásticos tienden a ser mayores que los desplazamientos elásticos y la magnitud de los desplazamientos elásticos tiende a cero tras cada escalón. Se aprecia que los desplazamientos elásticos tienden a comportarse según la curva de expansión térmica teórica, mientras que los desplazamientos plásticos se relacionan directamente con el cambio de temperatura  $\Delta T$  de cada escalón.



**Figura 35:** Caídas elásticas  $d_{ei}$  y plásticas  $d_{pi}$  en las etapas de enfriamiento final de los ensayos en la Figura 27.  $\Delta T_{ef}$  corresponde al descenso de la temperatura al interior del acrílico durante la etapa de enfriamiento final. Se indica la curva de expansión térmica teórica del acrílico con  $\alpha_{teórico} = 90 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  y para un largo inicial de 35 cm.

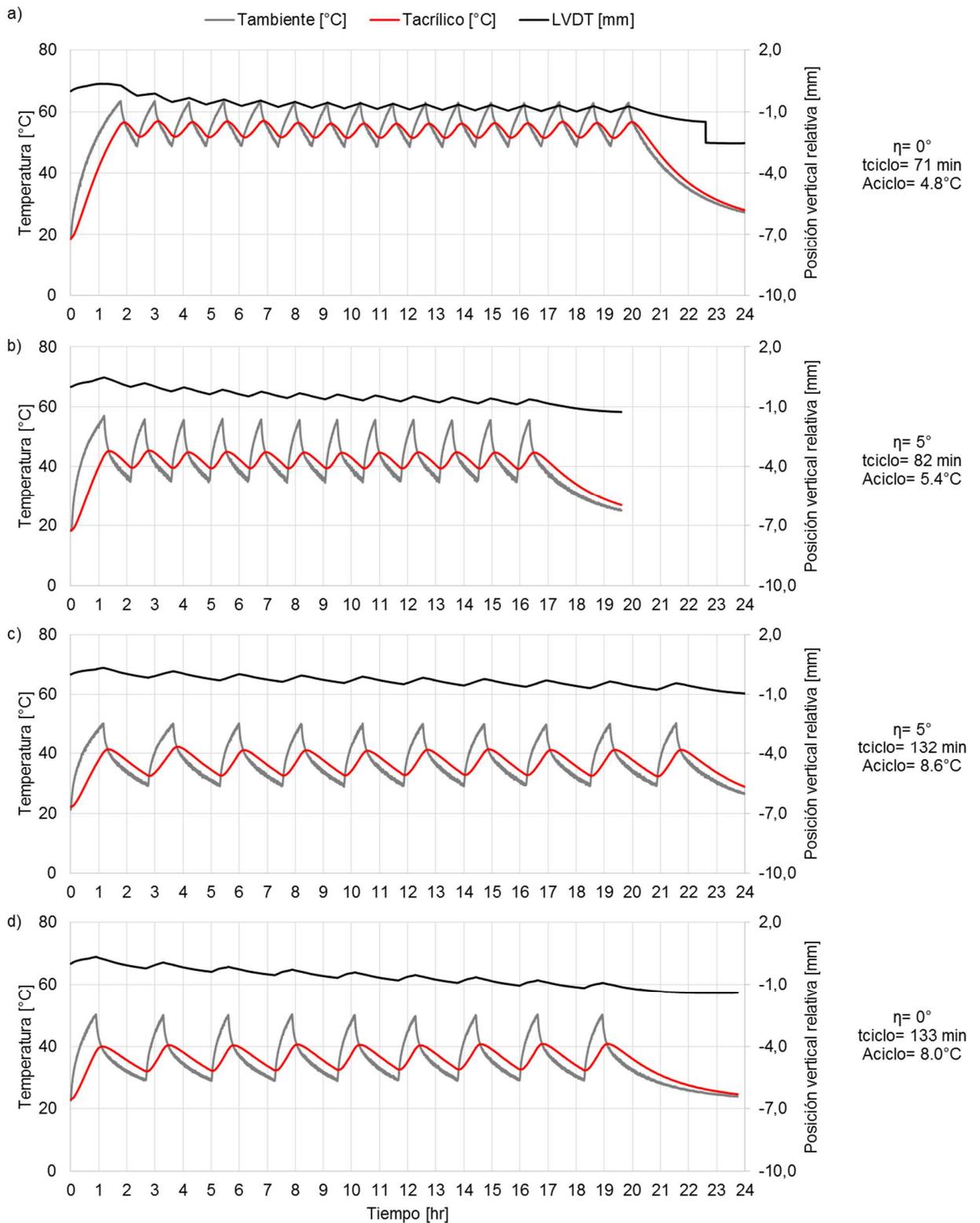
La magnitud de los desplazamientos plásticos en la etapa de enfriamiento final de los registros con periodos cíclicos  $t_{\text{ciclo}}$  de 131 min y 174 min es similar a la obtenida durante la etapa cíclica (Figura 33), ya que la magnitud no supera los 0.4 mm y se concentra entre los 0.1 mm y 0.3 mm, aproximadamente. Además, en ambos ensayos los desplazamientos plásticos en la etapa cíclica tienden a presentarse en la fase de enfriamiento. De esta manera, se plantea que los desplazamientos plásticos en el enfriamiento, tanto en la etapa cíclica como en la etapa de enfriamiento, están directamente relacionadas con el cambio de temperatura  $\Delta T$  (según el inserto de la Figura 23).

#### **4.4. Ensayos Complementarios**

Adicionalmente se realizan cuatro ensayos en un marco de acero ASTM A36 con la configuración que se indica en la Figura 11. En la Figura 36 se muestran los registros de los ensayos durante 24 hrs, los cuales comprenden las etapas térmicas de calentamiento inicial, ciclo térmico y enfriamiento final. Se observa que ninguno de los registros presenta acumulación de desplazamientos plásticos. En la etapa de enfriamiento final de algunos ensayos se presentan caídas abruptas irregulares.

El acero posee un coeficiente de expansión térmica que es aproximadamente la mitad que el del acrílico (Tabla 1), lo que implica que el cambio relativo de longitud del marco de acero al variar la temperatura es menor. De esta manera, se espera que el acero sea menos susceptible a las deformaciones térmicas durante los ensayos y en consecuencia altere en menor medida los desplazamientos en las piezas de acrílico.

El ángulo de fricción interna entre una pieza de acrílico con otra de acero ASTM A36 se determina por medio del registro del ángulo de deslizamiento, de igual manera que en los ensayos en el marco de aluminio. En la Tabla 5 se indica el ángulo de fricción promedio junto con el número de repeticiones, la desviación estándar y el valor máximo y mínimo. El ángulo de fricción interna promedio entre el acrílico con el marco de acero ASTM A36 es  $22.6^\circ$ , que supera al existente entre el marco de aluminio y una pieza de acrílico ( $\phi=21.9^\circ$ ).



**Figura 36:** Registros completos de los ensayos complementarios en marco de acero ASTM A36.

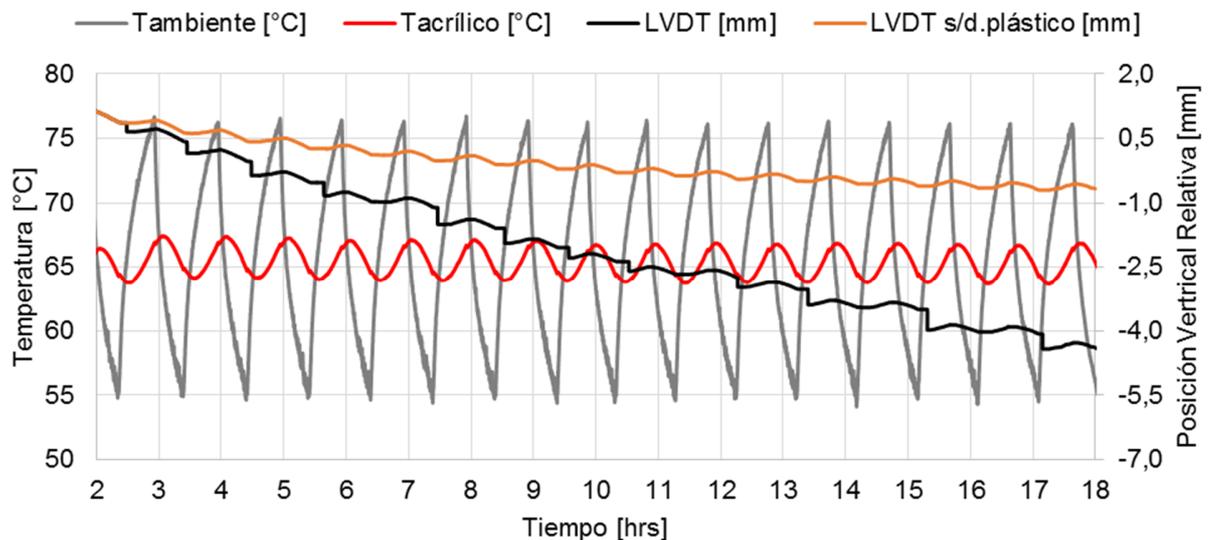
**Tabla 5:** Resumen del registro para determinación del ángulo de fricción interna entre el acrílico y el acero ASTM A36.

$\varphi$	N° Repeticiones	Desviación estándar [°]	Promedio [°]	Máx [°]	Mín [°]
Acrílico/Acero ASTM A36	35	1.2	22.6	27.2	21.3

El acero posee una mayor rigidez estructural que el acrílico, lo que implica que sufre menos deformaciones para un mismo estado de tensiones. El marco de aluminio es una estructura flexible y deformable frente a cargas pequeñas, mientras que el marco de acero es prácticamente indeformable bajo el mismo estado de cargas. La rigidez estructural del acero, mayor que la del aluminio, junto con el leve incremento del coeficiente de fricción entre el marco y las piezas de acrílico pueden justificar que los ensayos con el marco de acero ASTM A36 no presenten caídas plásticas al ser sometidos a temperaturas y periodos cíclicos similares a los ensayos realizados con el marco de aluminio.

## 5. Discusión

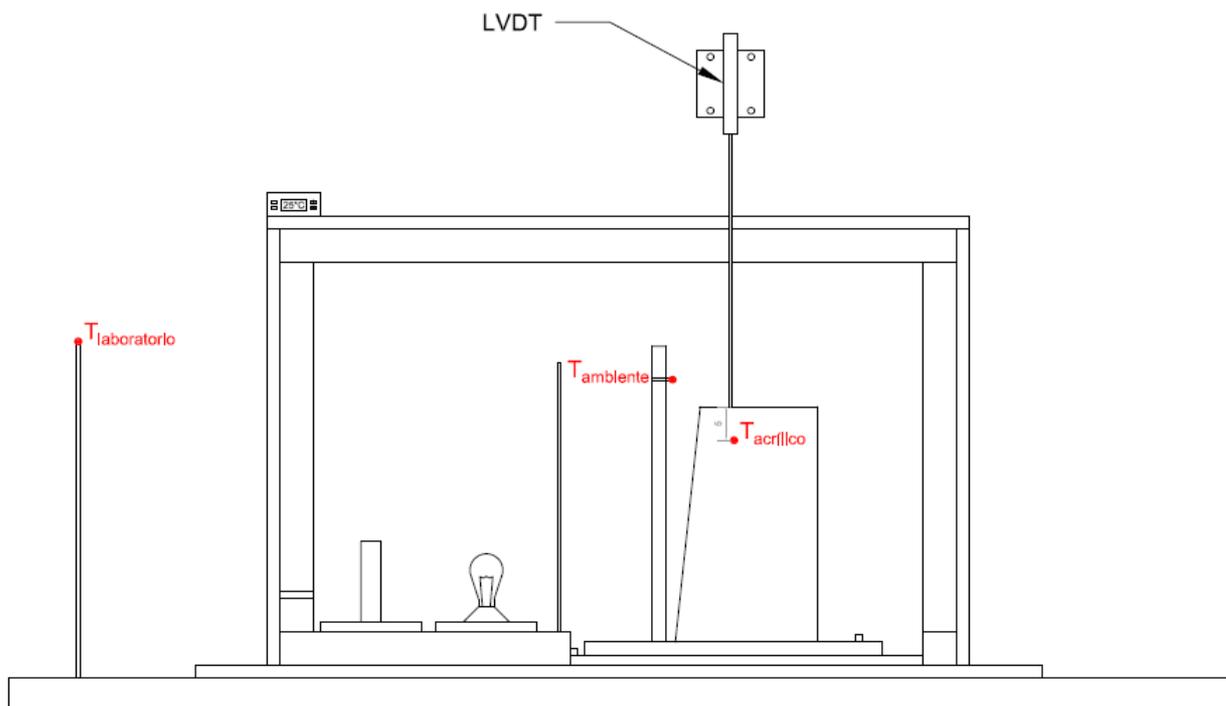
El registro de la Figura 30 (a) que no tiene desplazamientos plásticos durante la etapa cíclica, presenta una pequeña acumulación de desplazamientos a pesar de que se tienen únicamente deformaciones elásticas. Con el fin de estudiar este comportamiento, en la Figura 37 se muestra la etapa cíclica completa de un registro, indicando los desplazamientos plásticos y elásticos de la cuña (LVDT y LVDT s/d plástico, respectivamente). Se observa que al restar las caídas abruptas al desplazamiento de la cuña, las magnitudes de los desplazamientos acumulados, si bien disminuyen considerablemente, no se reducen a cero. Dicho comportamiento se contrapone a lo esperado teóricamente, pues al considerar un régimen perfectamente elástico de deformaciones durante la etapa cíclica, la posición vertical relativa de la cuña debiese oscilar sin acumular desplazamientos. Se espera que este fenómeno se justifique por las propiedades térmicas del acrílico, como el coeficiente de expansión térmica y la difusividad térmica.



**Figura 37:** Etapa cíclica completa del ensayo en la Figura 20 ( $\eta=0^\circ$ ,  $\beta=6^\circ$  y  $t_{\text{ciclo}}=59$  min). Se incluye curva sin considerar las caídas abruptas (LVDT s/d. plástico).

Se analiza experimentalmente el coeficiente de expansión térmica del acrílico por medio de un ensayo que registra la expansión del bloque en función de la variación de la

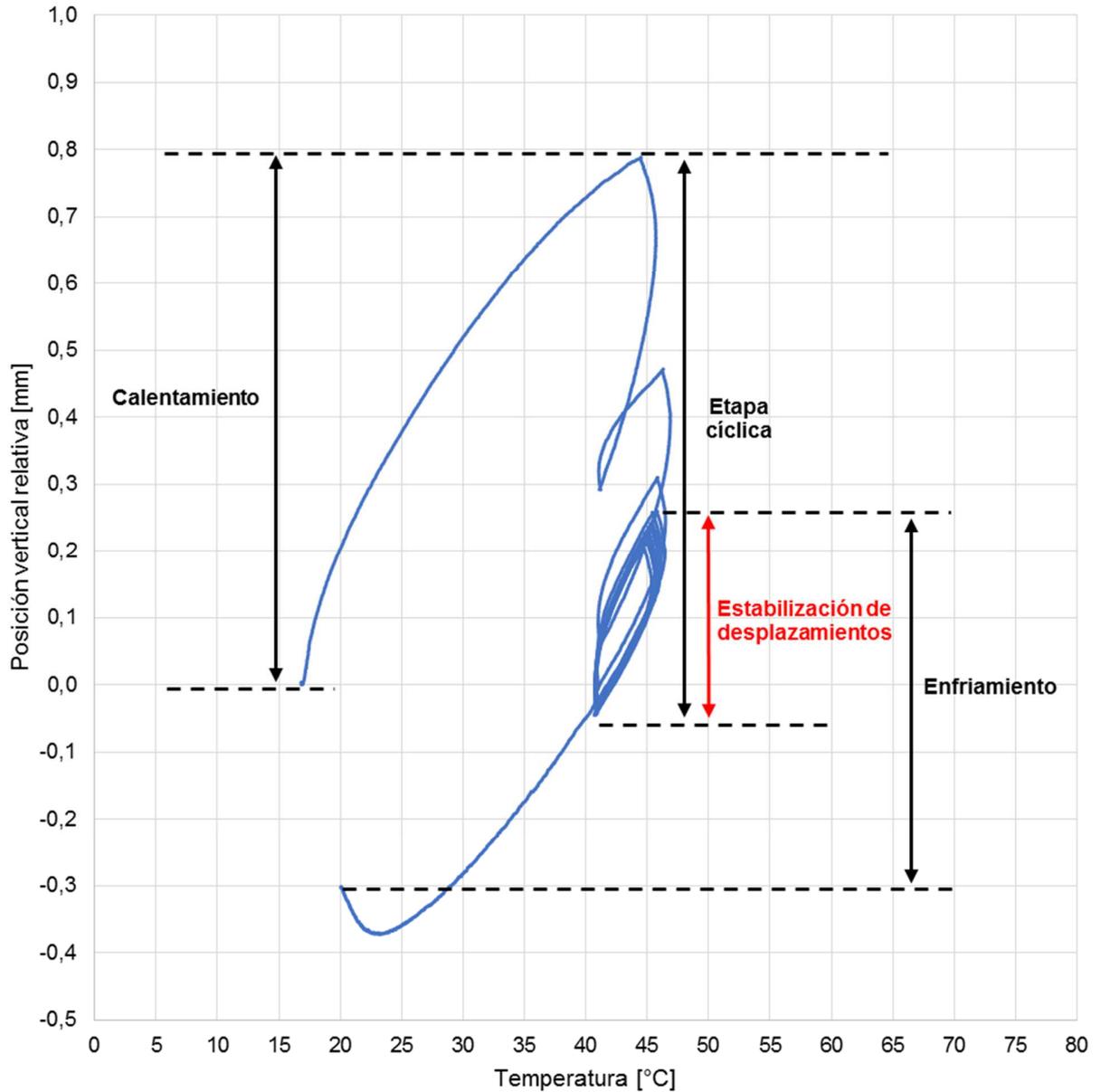
temperatura al interior del acrílico. Se instala una termocupla dentro del contenedor térmicamente aislado ( $T_{\text{ambiente}}$ ) y otra al interior del bloque de acrílico ( $T_{\text{acrílico}}$ ), como se indica en la Figura 38. El ensayo comprende tres etapas térmicas: calentamiento (~1 hrs), ciclo térmico (~17 hrs) y enfriamiento (~5 hrs).



**Figura 38:** Estructuración general del modelo experimental para la estudio del coeficiente de expansión térmica del acrílico.

En la Figura 39 se indica la variación de la posición vertical del bloque en función de la temperatura al interior del acrílico. En un comienzo el acrílico se deforma más por contracción que por dilatación térmica para una misma diferencia de temperatura. Tras cada ciclo de temperatura los desplazamientos en las fases de calentamiento y enfriamiento se tienden a igualar, disminuyendo a cero la acumulación de desplazamientos por ciclo. Se deduce que el coeficiente de expansión térmica es variable, siendo inicialmente mayor en la fase de enfriamiento que en la de calentamiento, pero dicha diferencia disminuye tras cada ciclo de temperatura hasta finalmente alcanzar un valor estable. De esta manera, se infiere que la variación del coeficiente de expansión

térmica del acrílico durante los ensayos provoca que se acumulen desplazamientos, independientemente de la presencia de caídas plásticas.



**Figura 39:** Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico en el ensayo de expansión térmica. En la etapa de estabilización de desplazamientos la magnitud de los desplazamientos elásticos de las fases de calentamiento y enfriamiento son similares.

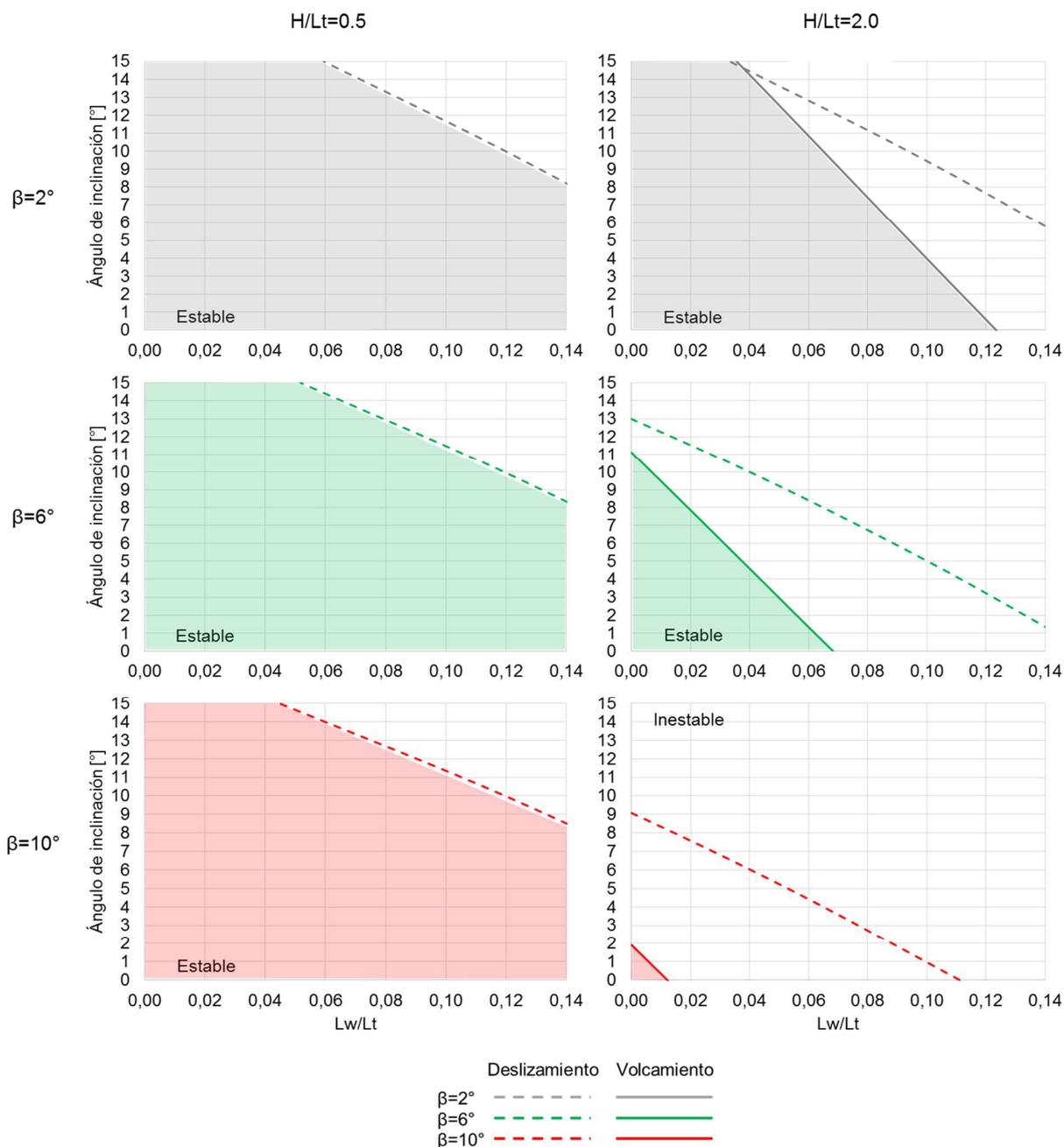
La expansión (o contracción) térmica de un material equivale a la suma de las expansiones (o contracciones) de cada una de sus partículas constituyentes en una misma dirección. La magnitud y sentido de estos desplazamientos depende principalmente de su difusividad térmica. Por ejemplo, un material con una alta difusividad térmica exacerba el flujo de calor en su interior, atenuando el desfase entre los cambios de temperatura superficiales y los inducidos en todo el elemento. Así, se propone que el coeficiente de expansión térmica se estabilizaría más rápido al tener una mayor difusividad térmica.

Es posible explicar por qué los desplazamientos plásticos tienden a presentarse en las fases de calentamiento cuando se tienen periodos cortos y en las de enfriamiento cuando se tienen periodos largos. La penetración térmica depende de la difusividad térmica y del tiempo de exposición al cambio de temperatura superficial. El acrílico posee una baja difusividad térmica en comparación a otros materiales como el aluminio o el acero A36 (Tabla 1), lo que provoca que el flujo de calor en su interior sea más lento. Generalmente, el tiempo de exposición a la fase de calentamiento es menor que al de la fase de enfriamiento, pues las fases de calentamiento tienden a ser más breves que las fases de enfriamiento. De esta manera, se espera que la penetración térmica durante la fase de enfriamiento sea mayor.

Durante la fase de enfriamiento el bloque y la cuña se contraen a medida que fluye el calor hacia su exterior, lo que genera que la junta se abra y la cuña descienda repentinamente. Cuando se inicia la fase de calentamiento el interior del acrílico aún continúa contrayéndose, lo que puede provocar que la junta se vuelva a abrir y nuevamente caiga la cuña. Por lo tanto, es factible que se tengan desplazamientos plásticos durante la fase de calentamiento, debido al desfase entre los desplazamientos superficiales e interiores del acrílico. La fase de enfriamiento es más extensa en los ensayos con periodos largos que en los con periodos cortos. Si la fase de enfriamiento es duradera, entonces la disminución de la temperatura del acrílico tiende a cero a medida que transcurre la fase. Debido a esto, al iniciar la fase de calentamiento todo el acrílico tiende a comenzar a expandirse, pues ninguna parte del acrílico se estaría contrayendo. En consecuencia, cuando se tienen periodos largos los desplazamientos plásticos tienden a presentarse en las fases de enfriamiento.

Otra interrogante corresponde a por qué no se tienen desplazamientos plásticos durante la etapa de calentamiento, mientras que en la etapa cíclica y de enfriamiento final si se presentan. Esto se justifica porque durante la etapa de calentamiento, al contrario que en las fases de calentamiento, todo el acrílico se expande a medida que se incrementa la temperatura del contenedor, debido a que siempre la temperatura del acrílico es inferior a la temperatura del contenedor. De esta manera, como sólo se tienen desplazamientos plásticos cuando la cuña y el bloque se contraen, entonces durante la etapa de calentamiento sólo se tienen desplazamientos elásticos.

Con respecto al análisis de estabilidad al deslizamiento y volcamiento del sistema, resulta necesario estudiar la estabilidad frente a ambos modos de falla. En la Figura 40 se muestran las configuraciones estables según el largo relativo de la cuña  $L_w/L_t$  con  $H/L_t=0.5$  y  $2.0$  para distintos ángulos de contacto  $\beta$ . El ángulo de contacto  $\beta$  reduce la estabilidad en el sistema con  $H/L_t=2.0$ , mientras que en el sistema con  $H/L_t=0.5$  su influencia es relativamente menor. El aumento de la esbeltez  $H/L_t$  disminuye la estabilidad del sistema, especialmente en configuraciones con mayores ángulos de contacto  $\beta$ . Se observa que en la configuración con  $H/L_t=0.5$  la falla predominante corresponde al deslizamiento, mientras que en la configuración con  $H/L_t=2.0$  prevalece la falla por volcamiento. De esta manera, se deduce que en las configuraciones más esbeltas la falla por volcamiento predomina por sobre el deslizamiento, mientras que en configuraciones menos esbeltas se invierte este comportamiento.



**Figura 40:** Estabilidad global del sistema frente al deslizamiento y volcamiento del bloque según  $L_w/L_t$  con  $H/L_t = 0.5$  y  $2.0$  considerando  $L_t = 22.5$  cm para distintos ángulos de contacto  $\beta$ . Las líneas continuas y segmentadas corresponden a los ángulos de inclinación  $\eta$  y largos relativos de la cuña  $L_w/L_t$  límites del sistema frente al volcamiento y deslizamiento, respectivamente. Las secciones rellenas representan las configuraciones estables.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

Las conclusiones de la investigación son las siguientes:

- Se comprueba que es factible reproducir experimentalmente el mecanismo de cuña inducido térmicamente, por medio de la elaboración de un modelo bloque-cuña de acrílico sometido a un sistema de control de temperaturas.
- La estabilidad del sistema frente al deslizamiento decrece con el largo relativo de la cuña  $L_w/L_t$ , la esbeltez  $H/L_t$  y el ángulo de inclinación de la base  $\eta$ .
- Para cada ángulo de inclinación  $\eta$ , esbeltez  $H/L_t$  y largo relativo de la cuña  $L_w/L_t$  (o ángulo de contacto  $\beta$ ) se admite sólo un rango de valores de  $\beta$  (o de  $L_w/L_t$ ) donde la configuración es estable frente al deslizamiento. El rango se limita aún más al aumentar la esbeltez  $H/L_t$ .
- El aumento del ángulo de contacto  $\beta$  favorece la estabilidad frente al deslizamiento en configuraciones menos esbeltas, en cambio perjudica la estabilidad frente al deslizamiento en configuraciones más esbeltas.
- La estabilidad del sistema frente al volcamiento decrece con el largo relativo de la cuña  $L_w/L_t$  y la esbeltez  $H/L_t$ . Existe un rango de  $L_w/L_t$  acotado donde el sistema es estable frente al volcamiento para cada ángulo  $\beta$  y relación de esbeltez  $H/L_t$ .
- El incremento del ángulo de contacto  $\beta$  aumenta la estabilidad frente al volcamiento en configuraciones menos esbeltas, en cambio disminuye la estabilidad frente al volcamiento en configuraciones más esbeltas.
- La falla por volcamiento predomina por sobre el deslizamiento en configuraciones más esbeltas, mientras que en configuraciones menos esbeltas prevalece la falla por deslizamiento por sobre el volcamiento.
- Se comprueba la directa proporcionalidad entre el periodo y la amplitud del ciclo de temperatura al interior del acrílico. La difusividad térmica del acrílico define el periodo del ciclo térmico a partir del cual se genera una amplitud de temperaturas al interior del acrílico.
- Los desplazamientos plásticos tienden a presentarse en las fases de calentamiento cuando se tienen periodos cortos y en las fases de enfriamiento cuando se tienen

periodos largos. Este comportamiento es relativamente independiente del ángulo de inclinación de la base  $\eta$ .

- La magnitud de los desplazamientos plásticos en el enfriamiento, tanto en la etapa cíclica como en la etapa de enfriamiento, es proporcional al cambio de temperatura  $\Delta T$  de cada escalón (según el inserto de la Figura 23). En cambio, la magnitud de los desplazamientos plásticos en la fase de calentamiento es proporcional a la amplitud del ciclo térmico del acrílico.
- Se acumulan desplazamientos en la etapa cíclica y en la etapa de enfriamiento, ya que en ambas etapas se presentan desplazamientos plásticos. En la etapa de calentamiento sólo se tienen desplazamientos elásticos por expansión térmica.
- Los desplazamientos plásticos por ciclo del sistema son proporcionales a la amplitud del ciclo térmico del acrílico (y al periodo cíclico).
- Los desplazamientos plásticos son relativamente independientes a los ángulos de inclinación  $\eta$  considerados ( $\eta = 0^\circ, 5^\circ, 7^\circ$  y  $10^\circ$ ).
- La rigidez estructural del acero, mayor que la del aluminio, puede justificar que no se tengan desplazamientos plásticos en ninguno de los ensayos realizados con el marco de acero.

## 6.2. Recomendaciones

Se recomienda estudiar experimentalmente el volcamiento del sistema bloque/cuña para comparar con el análisis de estabilidad teórico presente en esta investigación. Es posible desarrollar este experimento utilizando bloques de madera (u otro material de bajo costo) que dimensionen las piezas de acrílico del modelo para distintas relaciones de esbeltez  $H/L_t$ , largos relativos de la cuña  $L_w/L_t$  y ángulos de inclinación  $\eta$  y de contacto  $\beta$ .

Se propone desarrollar ensayos que incorporen las amplitudes del ciclo térmico al interior del acrílico  $A_{\text{ciclo}}$  no obtenidas en esta investigación. Además, se plantea explorar y cuantificar los efectos de la rugosidad de la interfaz de los contactos y la rigidez del marco sobre los ensayos. Resulta necesario determinar experimentalmente las principales propiedades térmicas del acrílico, como el coeficiente de expansión térmica y la difusividad térmica, para contrastar con los valores teóricos indicados en la Tabla 1.

Por último, se plantea que a partir de los resultados experimentales se determinen parámetros que evalúen la estabilidad de sistemas rocosos sometidos a cambios de temperatura superficial, por medio del uso de números adimensionales que relacionen las propiedades termomecánicas de distintas rocas y materiales.

## 7. Bibliografía

Hatzor, Y. 2003. "Keyblock Stability in Seismically Active Rock Slopes – Snake Path Cliff, Masada." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129 (8): 697-710

Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., Guglielmi, Y. 2005. "Influence of Daily Surface Temperature Fluctuations on Rock Slope Stability: Case Study of the *Rochers de Valabres* Slope (France)." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42 (3): 331-349

Gischig, V. S., Moore, J. R., Evans, K. F., Amann, F., Loew, S. 2011a. "Thermomechanical Forcing of Deep Rock Slope Deformation: 1. Conceptual Study of a Simplified Slope." *Journal of Geophysical Research* 116 (F04010)

Gischig, V. S., Moore, J. R., Evans, K. F., Amann, F., Loew, S. 2011b. "Thermomechanical Forcing of Deep Rock Slope Deformation: 2. The Randa Rock Slope Instability." *Journal of Geophysical Research* 116 (F04011)

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

Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y., Glaser, S. D., Santamarina, J. C. 2013. "Thermally vs. Seismically Induced Block Displacements in Masada Rock Slopes." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 61(0): 196-211

## Anexo A Descripción de Equipos y Sensores utilizados en el Montaje Experimental

### A.1. Equipos

En el estudio experimental se utilizó un equipo de adquisición de datos con una tarjeta Multiplexer incorporada junto a una fuente de poder. Las especificaciones técnicas de estos equipos se indican a continuación:

#### Equipo de adquisición de datos (LXI Data Logger)



**Figura 41:** Equipo de adquisición de datos Agilent modelo 34972A.

**Tabla 6:** Descripción general del equipo de adquisición de datos Agilent modelo 34972A.

Tipo	Equipo de adquisición de datos.
Marca	Agilent Technologies.
Modelo	34972a (Figura 41)
Características Generales	<p>3 ranuras para la adquisición de datos con un DMM de 6 1/2 Digit (22 Bit) integrado.</p> <p>11 diferentes tipos de medición de señales. Destaca el registro de temperatura (termocuplas, RTDs y termoresistores), voltaje y corriente AC/DC, resistencia en 2 o 4 hilos, frecuencia y periodo.</p> <p>Compatible con todos los módulos switch y control del 34970A.</p> <p>Conectividad LAN de 1Gbit y USB 2.0.</p> <p>Puerto USB de memoria para almacenamiento y transferencia de datos.</p> <p>Interfaz web gráfica para un ajuste y control rápido remoto.</p> <p>Software de Data Logger gratuito Benchlink.</p>

**Fuente de poder (35 W triple output, 6V, 2.5 A &  $\pm 20$  V, 0.5 A)**



**Figura 42:** Fuente de poder Agilent modelo E3630A.

**Tabla 7:** Descripción general de la fuente de poder Agilent modelo E3630A.

Tipo	Fuente de poder DC.
Marca	Agilent Technologies.
Modelo	E3630A. (Figura 42)
Características Generales	<p>3 salidas:</p> <p>0 a 6V // 0 a 2.5 A</p> <p>0 a +20V // 0 a 0.5 A</p> <p>0 a -20V // 0 a 0.5 A</p> <p>Potencia máxima: 35 W</p> <p>Ruido:</p> <p>Modo normal voltaje RMS: 350 mV.</p> <p>Peak to Peak: 1.5 mV.</p> <p>Carga y regulación 0.01% + 2 mV.</p> <p>Resolución del medidor:</p> <p>Voltaje: 10 mV (0 a 20 V), 100 mV (&gt;20 V).</p> <p>Corriente: 1 mA.</p> <p>Se puede monitorear el voltaje y la corriente simultáneamente.</p>



**Tabla 9:** Características generales del sensor LM35.

Sensor	Temperatura.
Tipo	LM35 (Figura 44)
Características Generales	Precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Rango de medición: $-55^{\circ}\text{C}$ a $150^{\circ}\text{C}$ . Opera entre 4 y 30 voltios de alimentación.

### Termocuplas tipo K



**Figura 45:** Termocupla "K".

**Tabla 10:** Características generales del sensor termocupla K.

Sensor	Temperatura.
Tipo	Termocupla tipo K (Figura 45)
Características Generales	Compuesta por NiCr-Ni Precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Rango de medición: $-40^{\circ}\text{C}$ a $1000^{\circ}\text{C}$ Recubierta con teflón

### Transductor diferencial de variación lineal (LVDT)



**Figura 46:** Sensor de desplazamiento LVDT.

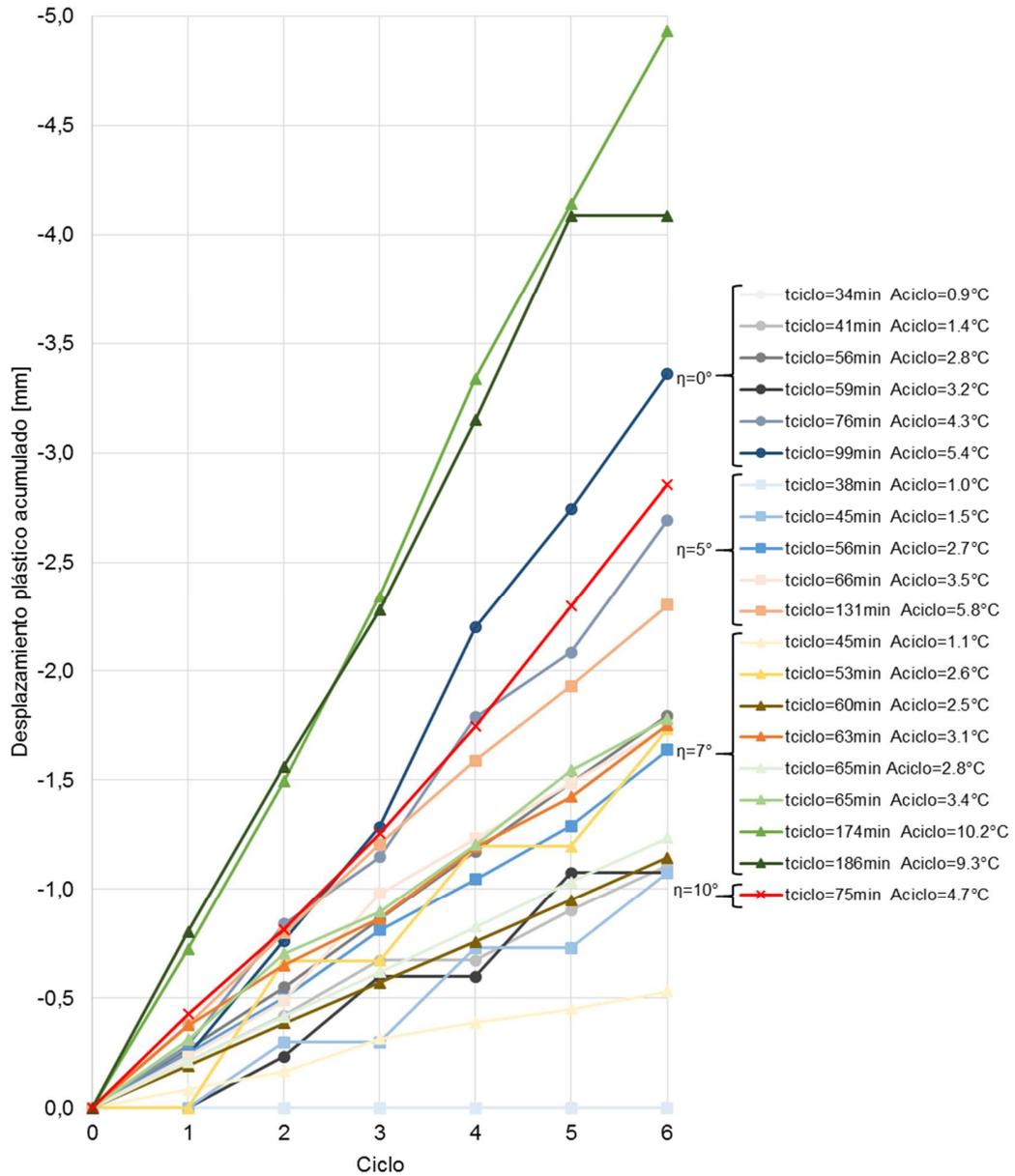
**Tabla 11:** Características generales del sensor LVDT.

Sensor	Desplazamiento lineal.
Tipo	LVDT Schaevitz® DC-SE 2000 (ver Figura 46)
Características Generales	Rango de medición: 2 pulgadas. Sensibilidad: 0.098 VDC/mm. Rango de temperatura (operación): -25°C a 85°C. Voltaje de entrada: +8.5 a +28 VDC.

## Anexo B Gráficos Complementarios de los Resultados Experimentales

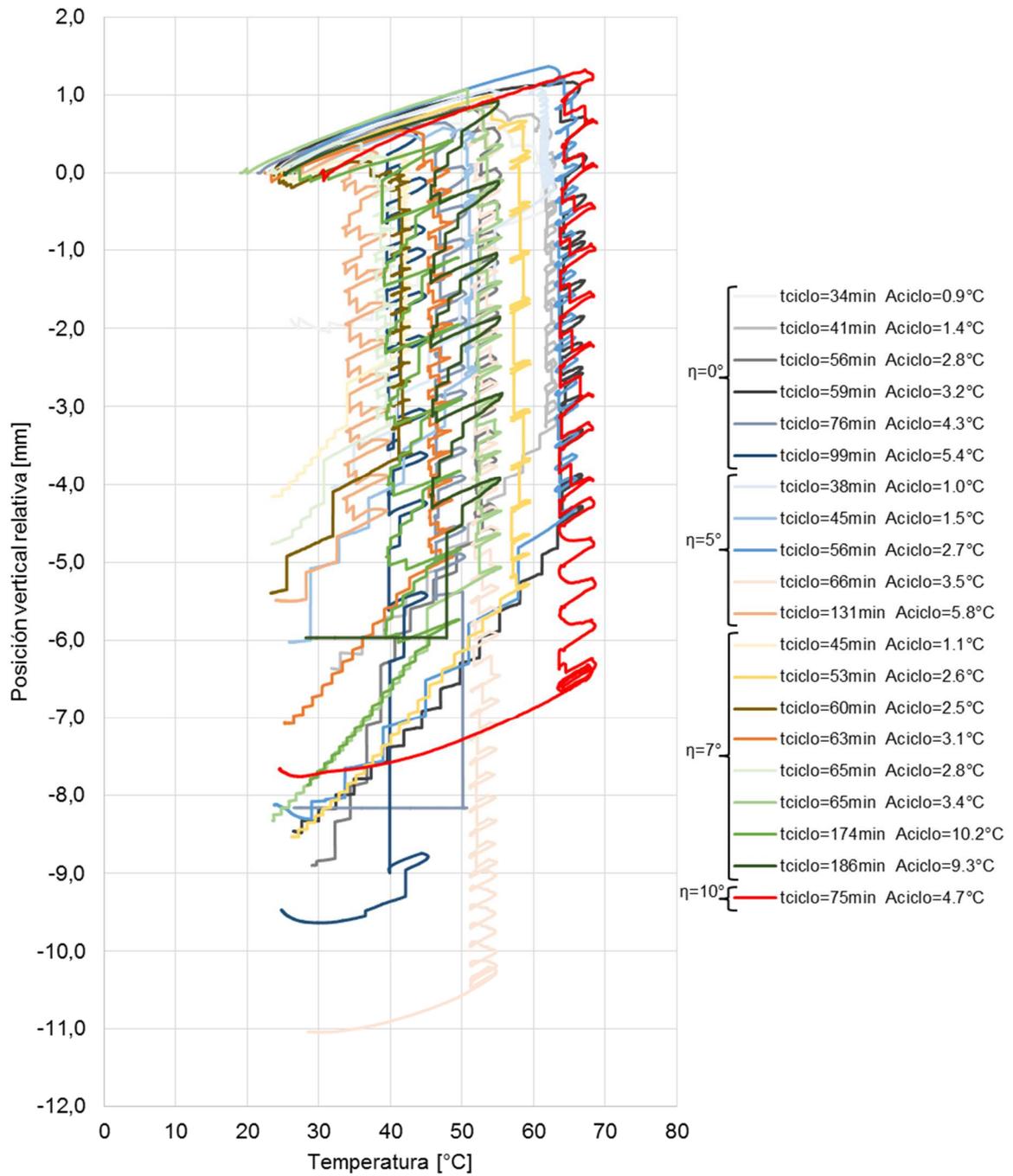
### B.1. Registros Complementarios de los Ensayos

En la Figura 47 se muestran los desplazamientos plásticos acumulados en la etapa cíclica de todos los ensayos.



**Figura 47:** Desplazamientos plásticos acumulados en la etapa cíclica de todos los ensayos.

En la Figura 48 se muestra la variación de la posición vertical de la cuña en función de la temperatura al interior del bloque de acrílico de todos los ensayos.



**Figura 48:** Posición vertical relativa de la cuña según la temperatura al interior del acrílico de todos los ensayos.