



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### PROPUESTA DE ADITIVOS NATURALES Y MICROFIBRAS DE PAPEL PARA REPARAR FISURAS EN MUROS DE MONUMENTOS HISTÓRICOS DE TIERRA

Tesis para optar por el Título de **Ingeniera Civil**, que presenta la bachillera:

**Karina Ysabel Sánchez Puerta**

Asesor: **Dr. Marcial Blondet Saavedra**

Lima, Mayo del 2010

## Propuesta de aditivos naturales y microfibras de papel para reparar fisuras en muros de monumentos históricos de tierra

### Resumen

Una gran cantidad de monumentos históricos de tierra en el Perú, y en el mundo, han sido dañados por los sismos. El daño principal es la fisuración de sus muros estructurales que degrada su resistencia y rigidez e incrementa la posibilidad de colapso durante un nuevo sismo. Con el fin de reparar y restaurar al muro sus propiedades iniciales se ha estudiado la inyección de morteros líquidos (*grouts*) de barro en las fisuras. El suelo utilizado en el grout necesita de la presencia de arcilla porque es el material aglomerante del suelo. Sin embargo, cuando el barro se seca la arcilla se contrae y se generan fisuras que reducen la capacidad de adherencia del grout. Con el fin de que la reparación sea eficiente, se debe reducir la fisuración por contracción de secado.

Este trabajo presenta los resultados de un estudio realizado sobre la incorporación de aditivos en grouts de barro para controlar el proceso de fisuración durante el secado. Los aditivos estudiados fueron: microfibras de papel, goma de tuna, clara de huevo y vaselina. Con estos aditivos se buscó 2 efectos. El primero fue el efecto de costura de las microfibras, similar al que produce la paja en el mortero de barro de la mampostería de adobe. El segundo fue el retardo de la velocidad de secado. En algunos ensayos simples se observó que la disminución de la velocidad de secado reduce la fisuración debida a la contracción de la arcilla.

Para determinar la eficiencia de los aditivos en disminuir la fisuración y mejorar la adherencia del grout, se ejecutaron 2 tipos de ensayos: el ensayo de agrietamiento en films y el ensayo de tracción indirecta. El primero fue utilizado para analizar y comparar el proceso de fisuración en capas delgadas (films) de barro y escoger las dosificaciones de grout con menor ancho de fisura. El segundo fue realizado en emparedados de adobe, con las dosificaciones escogidas previamente, para determinar si el grout estudiado proporciona una buena adherencia. Se comprobó que las microfibras logran disminuir significativamente la fisuración y como consecuencia mejoran la adherencia o resistencia del grout. La goma de tuna mejoró la adherencia de grouts finos y fluidos y la clara de huevo también fue capaz de aumentar la resistencia del grout. Finalmente la vaselina no fue útil debido a que su adición en el grout incrementa la fisuración y deja manchas en el barro seco.

## INDICE

	Pág.
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Antecedentes	11
1.2. Objetivos	13
1.3. Nomenclatura	14
Capítulo 2. PROCESO DE SECADO EN MORTEROS Y GROUTS DE BARRO	
2.1. Introducción	15
2.2. Estructura y propiedades del suelo	15
2.3. Contracción de la arcilla y formación de fisuras	16
Capítulo 3. ENSAYO DE AGRIETAMIENTO EN FILMS	
3.1. Introducción	22
3.2. Fabricación de films	23
3.3. Mezclas de grout estudiadas	26
3.4. Resultados de grouts de suelo solo	27
3.5. Observaciones	27
Capítulo 4. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
4.1. Introducción	29
4.2. Alcance	30
4.3. Fabricación de emparedados	31
4.4. Ejecución del ensayo	33
4.5. Mezclas de grout estudiadas	37
4.6. Resultados de grouts de suelo solo	37
4.7. Observaciones	38
4.8. Correlación entre los ensayos de agrietamiento en films y tracción indirecta	39
4.8.1. Conclusión	42
Capítulo 5. EFECTO DE LA ADICIÓN DE MICROFIBRAS DE PAPEL	
5.1. Fabricación de aditivo	43
5.2. Ensayo de agrietamiento en films	
5.2.1. Resultados	45
5.2.2. Observaciones	47

5.2.3. Conclusiones	49
5.3. Ensayo de tracción indirecta	
5.3.1. Resultados	49
5.3.2. Observaciones	55
5.3.3. Conclusiones	55
Capítulo 6. EFECTO DE LA ADICIÓN DE GOMA DE TUNA	
6.1. Fabricación de aditivo	57
6.2. Ensayo de agrietamiento en films	
6.2.1. Resultados	58
6.2.2. Observaciones	60
6.2.3. Conclusiones	60
6.3. Ensayo de tracción indirecta	
6.3.1. Resultados	60
6.3.2. Observaciones	65
6.3.3. Conclusiones	65
Capítulo 7. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CLARA DE HUEVO	
7.1. Fabricación de aditivo	67
7.2. Ensayo de agrietamiento en films	
7.2.1. Resultados	68
7.2.2. Observaciones	70
7.2.3. Conclusiones	70
7.3. Ensayo de tracción indirecta	
7.3.1. Resultados	71
7.3.2. Conclusiones	74
Capítulo 8. EFECTO DE LA ADICIÓN DE VASELINA	
8.1. Fabricación de aditivo	76
8.2. Ensayo de agrietamiento en film	
8.2.1. Resultados	76
8.2.2. Observaciones	78
8.2.3. Conclusiones	79
8.3. Resultados generales de los aditivos estudiados	79
Capítulo 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
9.1. Conclusiones	81

9.2. Recomendaciones y líneas futuras de investigación	83
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	
A. RESULTADOS DE ENSAYOS	
A1. Ensayo de agrietamiento en films	88
A2. Ensayo de tracción indirecta	92



# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

En el Perú, muchas culturas a lo largo del tiempo han utilizado la tierra como material de construcción debido a su disponibilidad y a su capacidad de endurecer luego de que la tierra húmeda se seca. Las construcciones antiguas, consideradas hoy monumentos históricos, han sido dañadas con el tiempo por agentes naturales y el hombre. La mayoría de las construcciones de tierra que han perdurado tienen muros robustos. La gran masa de los muros ocasiona durante un sismo el desarrollo de grandes fuerzas de inercia que generan tracciones que la tierra no es capaz de resistir provocando el agrietamiento de los muros que conlleva a la pérdida de su resistencia y rigidez (Vargas et. al 2005). Las grietas o fisuras estructurales en los muros representan un riesgo de colapso frente a la ocurrencia de un nuevo sismo. En la Figura 1.1 se observa un ejemplo del daño ocasionado por el terremoto de Pisco del 2007 a los muros estructurales de adobe de la Iglesia de San Juan de Dios en Ica. Con el fin de proteger nuestro patrimonio cultural, es necesario reparar y detener el daño sísmico en las construcciones históricas.



**Figura 1.1** Iglesia San Juan de Dios en Ica, dañada luego del terremoto del 15 de agosto del 2007

En diferentes partes del mundo se han realizado proyectos de investigación dirigidos a la restauración y adecuación sísmica de monumentos históricos de tierra basados en criterios de resistencia y estabilidad (Tolles et. al 2005). Uno de los sistemas de reparación usados en la restauración de monumentos es la inyección de fluidos, como acrílicos y resinas epóxicas en las grietas estructurales, para tratar de devolver al muro

de tierra sus propiedades iniciales. Sea cual fuera el tipo de intervención se debe tener en cuenta el principio de intervención mínima, uso de materiales compatibles y la no alteración del aspecto original contempladas en las cartas internacionales de conservación (ICOMOS 1964, 1979, 2003).

En la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) se ha estudiado la posibilidad de usar morteros líquidos (grouts) de barro en la reparación de fisuras en muros de adobe por medio de la inyección. Su estudio comprendió ensayos de tracción indirecta a emparedados de adobe para seleccionar las dosificaciones de grout que proporcionen buena adherencia entre el mortero y el adobe. Los grouts seleccionados fueron usados en la reparación de muretes de adobe que fueron reensayados a compresión diagonal para determinar la eficiencia de las dosificaciones estudiadas. La Figura 1.2 muestra el proceso de inyección de grout utilizado en la reparación de los muretes de adobe. Los grouts estudiados fueron de suelo tamizado por la malla ASTM #10 (tamaño máximo de partícula 2mm) con humedades desde 30% a 40% para reparar fisuras de 3 a 5 mm de ancho (Blondet et. al 2007).



**Figura 1.2** Reparación de muretes con inyección de grout de barro (Blondet et. al 2007)

Este trabajo presenta los resultados de un proyecto de investigación posterior realizado en la PUCP para estudiar la posibilidad de reparar fisuras finas menores a los 3 mm. Aunque, aún no hay un método eficiente para inyectar fisuras finas menores a los 3 mm, se ha avanzado con el estudio de los grouts que podrán ser usadas para sellar las fisuras. Para lograr grouts fluidos y capaces de penetrar fisuras finas fue necesario utilizar suelo con tamaño de partículas pequeñas y humedades altas. En comparación con el proyecto anterior, en este trabajo se utilizaron mallas ASTM más finas y humedades mayores. El suelo utilizado en la preparación del grout fue extraído del campus de la PUCP y tamizado por las mallas #30 y #48, con tamaño máximo de partícula igual a 0.60

mm y 0.32 mm respectivamente. Las humedades nominales utilizadas fueron 50%, 60% y 70%.

Dada la naturaleza de la arcilla de contraerse durante el proceso de secado del barro y generar fisuras que reducen la adherencia del mortero, se estudió la incorporación de aditivos para reducir la propagación de fisuras por contracción de secado. Los aditivos analizados fueron: microfibras de papel, goma de tuna, vaselina y clara de huevo. Con estos aditivos se buscaron 2 efectos. El primero fue el efecto de costura de las microfibras, similar al que produce la paja en el mortero de barro de la mampostería de adobe (Vargas et al. 1983). El segundo fue el retardo de la velocidad de secado. En algunos ensayos simples se observó que la disminución de la velocidad de secado reduce la fisuración debida a la contracción de la arcilla (Vargas et al. 1983). Para el segundo efecto se escogieron aditivos naturales, la idea de usar dichos aditivos surge de su uso en la construcción tradicional y en épocas pasadas. En la sierra, la goma de tuna es utilizada en los enlucidos de barro como impermeabilizante para controlar la erosión por la lluvia (Vargas et al. 1986). En el caso del huevo, este fue utilizado como aglomerante en morteros con cal (*calicanto*) para mejorar las propiedades mecánicas del mortero. Finalmente, los aceites naturales fueron usados para aportar cierta capacidad “hidrorrepelente” al mortero (García A. 2007).

Se realizaron ensayos de agrietamiento en films de barro para escoger los porcentajes adecuados de aditivos mediante la observación y comparación del desarrollo de fisuras. Luego, las dosificaciones con menor fisuración fueron ensayadas a tracción indirecta para determinar cuáles proporcionan una buena adherencia entre el bloque y mortero, y así comprobar la eficiencia del aditivo en mejorar la resistencia en la interfase mortero-adobe.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general es contribuir a proteger y conservar el patrimonio cultural construido en tierra en áreas sísmicas, mediante técnicas de reparación basada en la inyección de barros muy fluidos.

El objetivo específico es evaluar si la presencia de microfibras de papel, goma de tuna, clara de huevo y vaselina ayuda a disminuir la fisuración por contracción de secado. Además, se busca hallar las dosificaciones adecuadas en las diferentes mezclas de barro o grout.

### 1.3. Nomenclatura

La nomenclatura usada en la descripción de las mezclas de grout estudiadas fue la siguiente:

S : suelo.

SS : suelo solo o suelo sin aditivo.

M : número de malla o tamiz utilizada.

H : contenido de humedad del grout.

F : porcentaje de microfibras en el grout.

GT : goma de tuna añadida al grout.

CH : porcentaje de clara de huevo en el grout.

V : porcentaje de vaselina en el grout.

Ejemplos,

SSM30H50 : Suelo solo tamizado por la malla #30 con 50% de humedad.

SF1M30H60 : Suelo con 1% de microfibras de papel, tamizado por la malla #30 y con 60% de humedad.

SGTM48H70 : Suelo con goma de tuna, tamizado por la malla #48 y con 70% de humedad.

# CAPÍTULO 2

## Proceso de secado en morteros y grouts de barro

### 2.1. Introducción

La resistencia de la mampostería de adobe depende de la integración bloque-mortero que se desarrolla en las juntas. La integración depende de la capacidad de adherencia y resistencia del mortero. Para que exista una buena adherencia es necesario que el suelo utilizado para la elaboración del mortero contenga la suficiente cantidad de arcilla. Sin embargo, ante la pérdida de humedad durante el proceso de secado la arcilla se contrae. La contracción puede generar fisuras en el barro que reducen la resistencia o adherencia en la interfase mortero-unidad. A fin de conseguir que la mampostería de adobe sea resistente, debe controlarse el desarrollo de fisuras que se generan durante el proceso de secado del mortero.

### 2.2. Estructura y propiedades del suelo

El suelo, que es la materia prima para la elaboración del bloque de adobe y mortero de barro, está compuesto por tres fases: mineral, gaseosa y líquida. La fase mineral la conforman partículas de diferentes tamaños como grava, arena, limo y arcilla. Las fases restantes, conformadas por gases y líquidos, ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas.

De acuerdo al tamaño de las partículas del suelo las arcillas están definidas como las partículas menores a los 2  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, existen partículas dentro de ese rango de tamaño que no son minerales arcillosos. Por tanto, las partículas inferiores a los 2  $\mu\text{m}$  deben ser denominadas “fracción arcillosa” y no solo arcillas (Lambe y Whitman 1995). Las propiedades que diferencian y definen a la arcilla son la plasticidad, que se desarrolla al mezclarse con cierta cantidad de agua, y la cohesión o resistencia cohesiva.

La plasticidad es la capacidad que tiene el suelo de ser moldeado sin romperse en estado húmedo. Esta propiedad está controlada por la cantidad y calidad de arcilla presente en el suelo y se da dentro de una amplia gama de humedades.

La cohesión es la máxima resistencia del suelo a la tensión y es producida por las fuerzas de atracción que existe entre los granos en contacto. La cohesión depende del tipo de

mineral arcilloso, condiciones atmosféricas, contenido de agua, tensión superficial y la carga eléctrica superficial de la arcilla. La cohesión aumenta a medida que el suelo pierde humedad y se seca.

De acuerdo al contenido de humedad, el suelo se presenta en 4 estados de consistencia: sólido, semisólido, plástico y líquido. Cada estado tiene cierta resistencia a la deformación que aumenta a medida que el suelo pierde humedad hasta secarse o alcanzar la humedad del ambiente. En el estado plástico la fuerza necesaria para iniciar su movimiento es mínima. Ello se debe al alto contenido de humedad pues mientras mayor sea la cantidad de agua presente en el suelo, menor será la interacción entre las partículas que permita la transferencia de carga y el comportamiento del suelo se aproximará al de un líquido, sin resistencia alguna (Lambe y Whitman 1995).

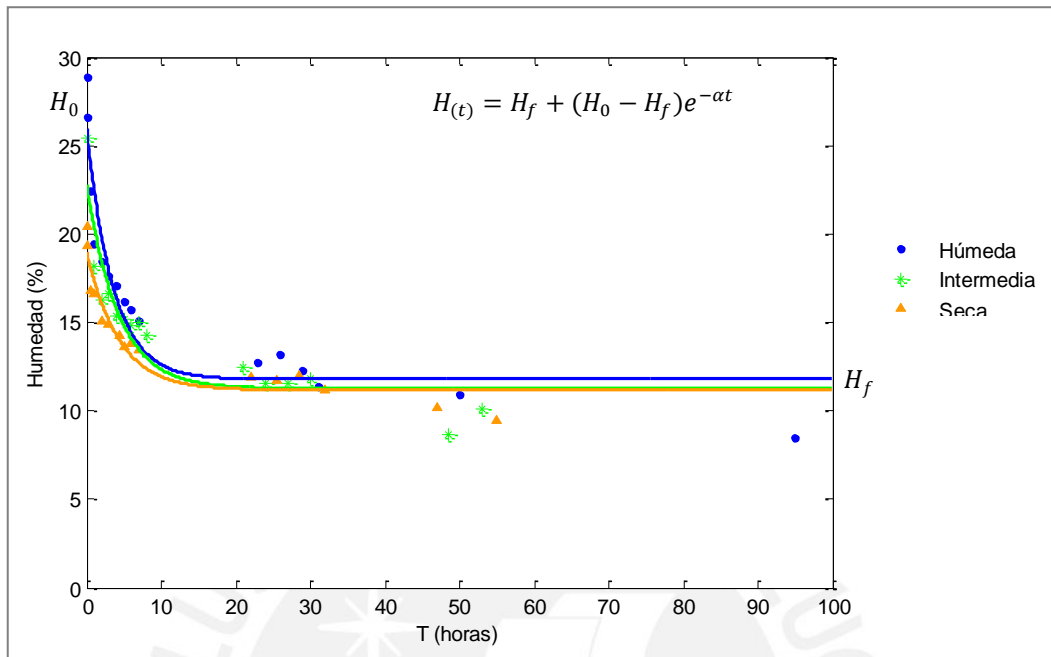
### **2.3. Contracción de la arcilla y formación de fisuras**

En un proyecto de investigación realizado en la PUCP se aprendió que la presencia de arcilla en el barro favorece al desarrollo de la resistencia en la mampostería de adobe porque adhiere el mortero con el bloque de adobe (Vargas et al. 1983). La propiedad cohesiva de la arcilla hace que actúe como el material aglomerante del mortero. Sin embargo, ante la pérdida de humedad la arcilla se contrae y genera fisuras en el barro, como consecuencia la resistencia de la mampostería disminuye.

Debido a que las fisuras se generan con la pérdida de humedad se estudió, en el proyecto mencionado anteriormente, el proceso de secado en el mortero de barro. Se prepararon emparedados de adobe formados por 2 bloques de adobe unidos con mortero y fueron abiertos a diferentes edades de secado. Se utilizó morteros con 3 humedades distintas de consistencias seca, intermedia y húmeda. El estudio consistió en medir la humedad, número y ancho de fisuras inmediatamente después de abrir el emparedado.

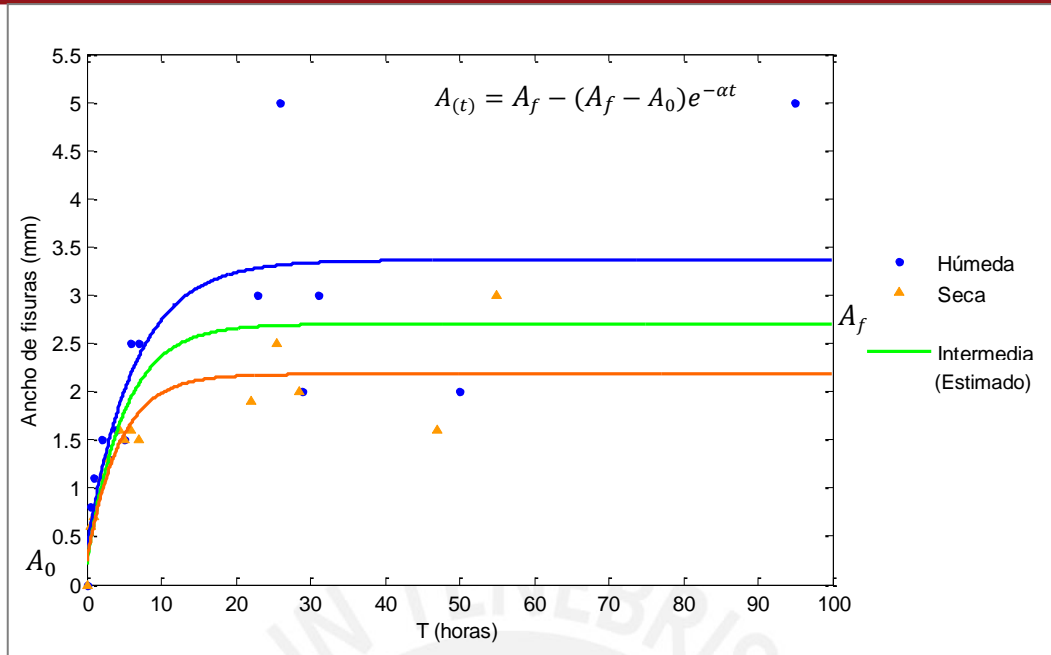
En el proceso de secado del mortero se diferenció dos etapas. La primera ocurre dentro de las 10 primeras horas de secado. En esta etapa la pérdida de humedad es muy rápida debido principalmente a que los bloques de adobe adyacentes absorben el agua del mortero. La segunda se distingue porque la pérdida de humedad es lenta, casi constante y es producida por evaporación. Cuando el mortero se seca la humedad se estabiliza y se vuelve constante. La Figura 2.1 muestra el cambio de humedad durante el secado del mortero. La curva de ajuste de datos fue creada con el programa Matlab por el método de mínimos cuadrados correspondiente a una tendencia exponencial. La ecuación mostrada en la Figura 2.1 corresponde a la forma de la línea de ajuste de la pérdida de humedad,

donde  $H_f$  es la humedad final,  $H_0$  es la humedad inicial,  $\alpha$  es un factor numérico que influye en la forma de la curva y  $t$  es el tiempo.



**Figura 2.1** Variación de la humedad en el proceso de secado en morteros de barro de diferentes consistencias iniciales (Vargas et al. 1983)

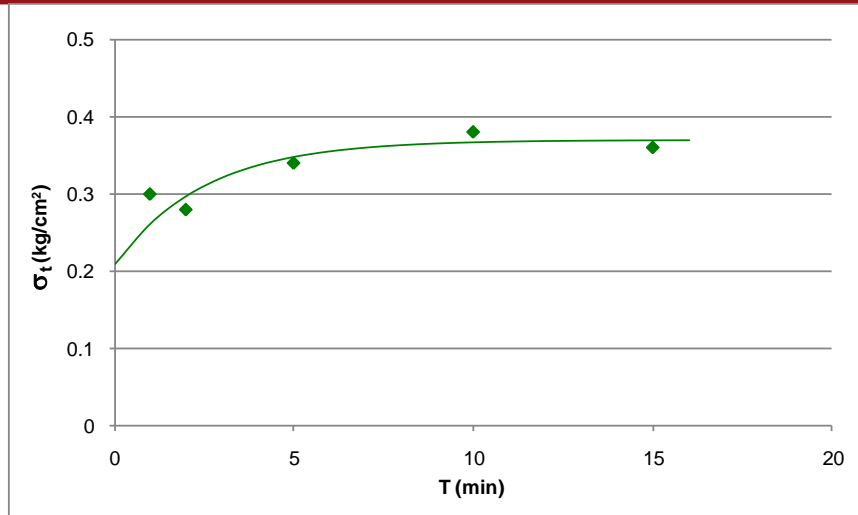
En la Figura 2.2 se observa que las fisuras se generan principalmente durante la primera etapa de secado, cuando la pérdida de humedad es rápida. Pasada las 10 horas, cuando el secado empieza a ser más lento, ya no se desarrollan más fisuras y el ancho permanece constante. Por otro lado, se aprendió que cuando el contenido de humedad en el mortero es mayor, también lo es la tendencia a desarrollar fisuras más anchas y en mayor cantidad. Al igual que en la Figura 2.1, las curvas de la Figura 2.2 fueron creadas con el método de mínimos cuadrados con el programa Matlab. La ecuación mostrada en la Figura 2.2 describe la forma de las curvas, donde  $A_f$  es el ancho final de fisura,  $A_0$  es el ancho inicial de fisura,  $\alpha$  es un factor numérico que influye en la forma de la curva y  $t$  es el tiempo.



**Figura 2.2** Formación de fisuras en el proceso de secado de morteros de barro de diferentes consistencias iniciales. Gráfico Ancho de fisuras vs. Tiempo de secado (Vargas et al. 1983)

También se estudió la forma de disminuir la tasa de transferencia de agua entre el mortero y los adobes con el propósito de disminuir la fisuración observada en la primera etapa del secado de mortero. Para ello, los bloques de adobe fueron remojados en agua durante diferentes tiempos, luego fueron utilizados para fabricar emparedados de adobe que serían ensayados a tracción indirecta para determinar el esfuerzo máximo de tracción en la interfase mortero-adobe.

En la Figura 2.3 se observa que con el remojo de los adobes se logró mejorar la integración mortero-adobe y aumentar la resistencia. La mejora se atribuye a que el remojo de las unidades reduce la absorción del agua del mortero observada en la primera etapa de secado y con ello disminuye la formación de fisuras. En otras palabras si la superficie de las unidades de adobe es humedecida antes del asentado, la velocidad de secado del mortero se reduce. Como consecuencia, se reduce la formación de fisuras en el mortero y la resistencia aumenta significativamente.



**Figura 2.3** Efecto del tiempo de remojo de los bloques de adobe en la resistencia a la tensión en la interfase mortero-adobe. La curva sigue un ajuste exponencial por el método de mínimos cuadrados (Vargas et al. 1983)

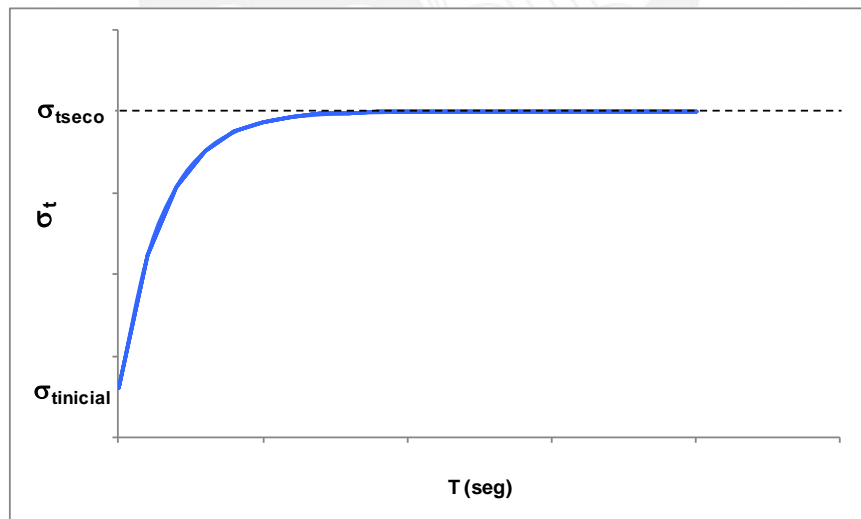
Con los ensayos y observaciones realizados se aprendió que la formación de fisuras durante el proceso de secado del barro se genera debido a 4 factores principales.

- *Contracción volumétrica de la arcilla.* El grado de contracción depende de la cantidad y calidad de arcilla en el suelo. También depende del equilibrio existente entre la arcilla y los granos del esqueleto mineral que no se contraen, como la arena.
- *Restricción al encogimiento.* Este factor depende de las condiciones de borde a las que está sujeta la mezcla de barro. Por ejemplo, en el caso del mortero de un muro las restricciones son producidas por el peso y la fricción que generan los bloques de adobe adyacentes al mortero.
- *Uniformidad de secado.* Este factor depende del espesor de la masa de barro. En masas de gran espesor la pérdida de agua tiene un efecto gravitacional, hay mayores pérdidas en la parte superior que en la inferior. Ello ocasiona que el desarrollo de fisuras sea mayor en la parte superior. Lo contrario ocurre en masas de espesores finos donde la pérdida de agua tiende a ser uniforme. Mientras más grueso sea el espesor de la masa menos uniforme será el secado.
- *Velocidad de secado.* Depende de las condiciones climáticas como temperatura, humedad y viento. También depende del área expuesta a la evaporación. En el caso del mortero el porcentaje de absorción de las unidades de adobe adyacentes también

influye en la velocidad de secado. Mientras más rápido se seque el mortero mayor será el desarrollo de fisuras.

Los factores mencionados influyen durante el desarrollo de la resistencia del barro desde su estado plástico hasta su estado sólido. Cuando el barro se encuentra en estado plástico presenta una resistencia pequeña a la deformación, llamada “resistencia inicial”. La resistencia inicial depende de la interacción entre partículas adyacentes, cantidad de agua, las tensiones superficiales así como de la cantidad y calidad de arcilla. A medida que el barro se seca la resistencia a la tracción aumenta hasta llegar al estado sólido. Entonces, la resistencia es máxima y se le denomina “resistencia máxima seca”, que depende principalmente de la cantidad y calidad de arcilla, así como de la cohesión.

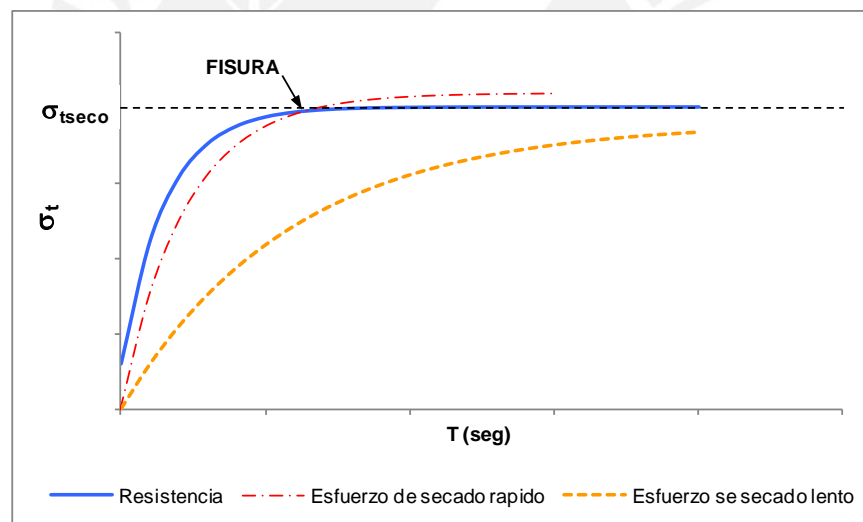
El desarrollo de la resistencia está representado en la Figura 2.4 por una curva asintótica. La forma exponencial de la curva se determinó con un estudio de la variación de la resistencia de la mampostería de adobe con el tiempo mediante el ensayo de tracción indirecta (Vargas et al. 1983). Se inicia en el tiempo de secado cero cuando el barro se encuentra en estado plástico y termina cuando el barro alcanza la resistencia máxima seca.



**Figura 2.4** Desarrollo de la resistencia a la tracción del barro durante el proceso de secado

Durante el proceso de secado existen esfuerzos internos que producen la fisuración del barro. Dichos esfuerzos son generados debido al encogimiento restringido. Cuando el encogimiento del barro es limitado por las condiciones de borde, como los adobes encima y debajo del mortero, se originan tracciones en ciertas áreas que el barro no es capaz de resistir dando lugar a la formación de fisuras.

El ingeniero Julio Vargas esbozó una teoría para intentar explicar el comportamiento del barro y el momento en que la fisura se desarrolla. Su idea está reflejada en la Figura 2.5, donde la línea continua representa el desarrollo de la resistencia a tracción del mortero de barro en el tiempo, y las líneas discontinuas representan los esfuerzos internos por encogimiento restringido en morteros con distintas velocidades de secado. En el tiempo de secado cero no existen esfuerzos internos, aparecen cuando el barro empieza a secarse y la arcilla se contrae. Si la velocidad de secado es rápida (línea roja) los esfuerzos por el encogimiento restringido se incrementan rápidamente llegando a superar la resistencia del mortero, lo que ocasiona el desarrollo de la fisura. Sin embargo, si la velocidad de secado fuera reducida (línea amarilla) los esfuerzos internos también serían reducidos. De esta forma se permitiría que la resistencia del mortero se desarrolle y alcance valores más altos que los esfuerzos por encogimiento restringido. Al mantener los esfuerzos internos por debajo del valor de la resistencia se evita la formación de fisuras.



**Figura 2.5** Efecto de las sollicitaciones externas en el proceso de secado del barro y la formación de fisuras

Para que la reparación de muros de adobe mediante el método de inyección de *grout* sea eficiente, es necesario utilizar grouts con suficiente cantidad de arcilla. Esta última confiere la cohesión que hace resistente al grout. Sin embargo, es necesario controlar la formación de fisuras producto de la contracción de la arcilla. Aditivos como la goma de tuna, vaselina y clara de huevo han sido estudiados en este proyecto con la intención de reducir la velocidad de secado del grout. Los resultados y observaciones son presentados más adelante.

## CAPÍTULO 3

### Ensayos de agrietamiento en films

#### 3.1. Introducción

El ensayo de agrietamiento en films consiste en observar y medir el número y ancho de fisuras desarrolladas durante el secado en capas delgadas de barro o films, como los mostrados en la Figura 3.1. Se utiliza para comparar la fisuración en mezclas de barro con variaciones como el tamaño máximo de partículas del suelo, humedad, tiempo de secado, etc. Los films se fabrican colocando mortero entre dos trozos de celofán y vidrio a manera de un emparedado. Para cada tipo de mezcla se fabrica un grupo de cuatro films. Luego de 1 día de secado se retira el vidrio y el papel celofán superior a dos films y a los dos films restantes luego de 7 días.

Este ensayo fue ideado por un grupo de científicos y nació con la necesidad de crear capas delgadas y planas de barro fluido (*grout*) cuyo agrietamiento fuera visible. Por tal motivo se decidió utilizar vidrios cuya transparencia permitiera ver la coloración del suelo, asociada al contenido de humedad, y las fisuras producidas por contracción de secado. Por otro lado, se buscó comprobar la disminución de fisuras mediante la ralentización de la velocidad de secado. Finalmente, este ensayo ayudó a desarrollar y aclarar conceptos relacionados a la fisuración del grout.

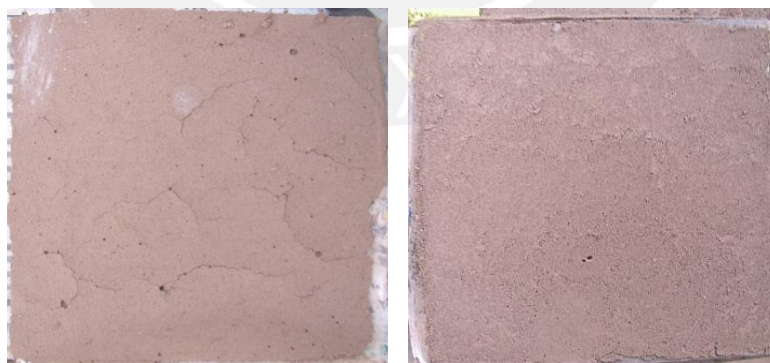


Figura 3.1 Films o capas delgadas de barro.

Este ensayo fue aplicado por primera vez en el proyecto DAI E-015 “Reparación de grietas en construcciones históricas de tierra en aéreas sísmicas: parte II”, llevado a cabo recientemente en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). El propósito fue tener una idea de que si la presencia y porcentaje de aditivo estudiado en una

dosificación de grout era capaz de reducir el agrietamiento en comparación con las mezclas de grout sin aditivo. Las dosificaciones con menor fisuración fueron seleccionadas para ser analizadas con el ensayo de tracción indirecta y determinar su resistencia a los esfuerzos de tracción en la interfase mortero-adobe.

Como consideración importante en este ensayo es necesario tener en cuenta la condición climática en la que se fabrican los films, ya que de ello depende el secado de la mezcla de barro. De modo que si el ensayo de diferentes mezclas se hiciera en diferentes estaciones del año, los resultados dejarían de ser comparables.

### 3.2. Fabricación de films

#### Materiales

- Agua.
- Suelo PUCP tamizado por las mallas ASTM #30 y #48

#### Equipo

##### Para la fabricación del film

- 2 vidrios para cada film o muestra. Las dimensiones de los vidrios utilizados fueron de 150x150x5 mm.
- 2 trozos de papel celofán para cada film o muestra. Se cortan con dimensiones ligeramente más grandes que el tamaño del vidrio (160x160x0.5 mm).

##### Para la medición

- Calibrador vernier o pie de rey. Utilizado para determinar el espesor del film.
- Tarjeta medidora de fisuras. Utilizado para medir el ancho de la fisura.
- "Fisurómetro". Utilizado para medir el número de fisuras.

#### Procedimiento

- Preparación del grout (Figura 3.2). Se pesa la cantidad necesaria de suelo PUCP tamizado para 4 films. Se mide el volumen de agua requerida para obtener la humedad nominal. Se recuerda que la humedad es la relación del peso del agua entre el peso seco del suelo. En las mezclas con aditivo, este último es disuelto previamente en el agua de la mezcla. Luego, se vierte el agua a un depósito con el suelo, se revuelve con una espátula hasta obtener una mezcla homogénea de grout. En un recipiente se vierte una cantidad representativa de grout para realizar el ensayo de contenido de humedad descrito en la norma NTP 339.127.



a) Tamizado del Suelo PUCP



b) Medición de agua



c) Mezcla homogénea de grout



d) Muestra para ensayo de humedad

**Figura 3.2** Proceso de preparación del grout de barro.

- Colocación del mortero (Figura 3.3). Sobre una superficie plana y nivelada se coloca el vidrio y sobre este el papel celofán. Luego, se vierte el grout y con una espátula se esparce la mezcla por toda el área del vidrio procurando dejar un espesor uniforme.



a) Colocación del grout



b) Esparcimiento uniforme del grout

**Figura 3.3.** Colocación y esparcimiento del mortero sobre la superficie de vidrio

- Cubierta del film (Figura 3.4). Se coloca el papel celofán superior sobre la mezcla esparcida. Se debe tener cuidado en no dejar burbujas de aire atrapadas entre la mezcla y el celofán. Luego, se coloca el vidrio superior y se presiona con las manos hasta que las partículas de suelo lo permitan y así obtener capas muy delgadas de barro. Para asegurar la horizontalidad y espesor uniforme del film, se utiliza el nivel de mano. Con el vernier se mide el espesor total de la muestra (vidrio, celofán y grout). Luego por diferencia entre el espesor total, el espesor de los vidrios y celofán, se

calcula el espesor del film de barro. Posteriormente se deja secar los films bajo sombra.



a) Colocación de celofán superior



b) Colocación de vidrio superior



c) Verificación de la horizontalidad



d) Secado de films bajo sombra

**Figura 3.4** Proceso de Fabricación de films. Cubierta de los films.

- Medición de fisuras (Figura 3.5). Luego de que los films hayan cumplido su tiempo de secado, se les retira el vidrio y el celofán superior. Pasada un par de horas, se procede a la medición de fisuras. Las fisuras consideradas en el conteo son aquellas que atraviesan dos ejes perpendiculares entre sí sujetos a un marco de madera de 0.10x0.10 m (fisurómetro). El ancho de la fisura más representativa se mide con una tarjeta medidora de fisuras.



a) Conteo del número de fisuras con el fisurómetro



b) Medición del ancho de fisuras con la tarjeta medidora de fisuras

**Figura 3.5** Medición de fisuras y obtención de datos.

- Reporte de datos. Finalmente, como datos del ensayo se reporta lo siguiente:
  - La humedad inicial del grout, para compararla con la humedad nominal y saber si se alcanzó lo estimado.
  - Espesor del film, para evaluar alguna relación con la fisuración.
  - Número y ancho de fisuras, para comparar el efecto del aditivo en la fisuración del film respecto a los films de suelo solo.
  - Estación del año en que se realizó el ensayo, para establecer de acuerdo a esta condición climática los films que son comparables.
  
- Selección de mezclas. Estudios desarrollados por la PUCP revelaron que mientras menor sea el espesor del mortero que une dos bloques de adobe, mayor será su resistencia a tracción indirecta. Tal condición se debe a que en los morteros con menor espesor se desarrollan fisuras más finas. De manera que la mayor resistencia de tracción del mortero está asociada al menor ancho de las fisuras (Blondet et al. 2007). Por esta razón la selección de las dosificaciones se hizo basándose en la capacidad del aditivo en disminuir el ancho de las fisuras. El número de las fisuras quedó como referencia.

### 3.3. Mezclas de grout estudiadas

De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo PUCP está identificado como un suelo CL, un material con alto porcentaje de finos de baja plasticidad. Este material fue tamizado por dos mallas ASTM diferentes: la #30 para eliminar partículas mayores a 0.6 mm, y #48 para eliminar partículas mayores a 0.32 mm. Se fabricaron mezclas de barro con y sin aditivo. Se estudiaron grouts de suelo solo, suelo con microfibras de papel en proporciones de 1% y 2%, suelo con goma de tuna al 100%, suelo con clara de huevo (2%, 5%, 8%, 10% 15% y 20%) y suelo con vaselina (2% y 5%).

### 3.4. Resultados de grouts de suelo solo

En la Tabla 3.1 se muestran los promedios de los resultados de cada mezcla hecha con suelo solo. La fabricación de los films de todas las mezclas estudiadas se realizó en primavera, entre los meses de noviembre y diciembre. En esos meses la temperatura media fue 18 °C y la humedad relativa promedio fue 84%. Los valores presentados en la tabla son el punto de comparación para evaluar la eficiencia de los aditivos en reducir la fisuración del grout.

**Tabla 3.1** Microfisuración en films de mezclas de suelo solo.

Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Tiempo de secado bajo vidrio (días)	Espesor prom. de Film (mm)	N° prom. de Fisuras	Ancho prom. de Fisura (mm)
SSM30H50	57	1	0.80	2.5	0.10
		7	0.60	0.0	0.00
SSM30H60	64	1	0.70	4.5	0.10
		7	0.60	1.0	0.05
SSM30H70	74	1	0.80	2.5	0.10
		7	0.85	1.5	0.10
SSM48H50	54	1	0.50	1.0	0.05
		7	0.45	0.0	0.00
SSM48H60	63	1	0.45	0.5	0.05
		7	0.35	0.0	0.00
SSM48H70	77	1	0.35	0.5	0.05
		7	0.45	0.0	0.00

SS : suelo solo.

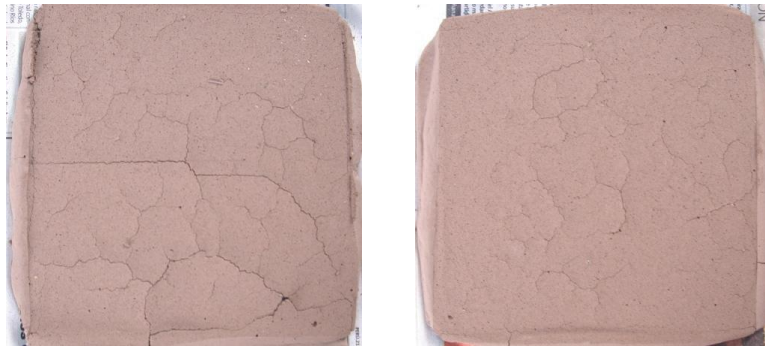
M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

### 3.5. Observaciones

- De la Tabla 3.1 se deriva que el espesor promedio de todos los films preparados con suelo tamizado por la malla #30 es 0.72 mm, mientras que del suelo tamizado por la malla #48 es 0.42 mm. Estos valores se aproximan al tamaño máximo de partícula de cada suelo que corresponde a 0.60mm y 0.32 mm respectivamente. Con ello, los espesores de film conseguidos son congruentes con el procedimiento seguido en la fabricación de los films al aplicar presión con las manos hasta que las partículas del suelo lo permitieran y obtener un espesor mínimo de barro.
- Se confirma que la velocidad de secado es una variable importante en el proceso de fisuración por contracción de secado. Cuando se destaparon los films luego de 1 día, el barro aun estaba húmedo y como estuvo expuesto al viento, la pérdida de agua fue muy rápida por lo que se fisuraron más que los films destapados a los 7 días (Figura 3.6). Los últimos, al tener la protección del celofán y vidrio tuvieron controlada la

velocidad de secado por lo que se fisuraron poco o nada. Mientras menor sea la velocidad de secado menor será la fisuración por contracción de secado



a) Films destapados luego de 24 horas de secado bajo vidrio



b) Films destapados luego de 7 días de secado bajo vidrio

**Figura 3.6** Films de suelo tamizado PUCP. El secado bajo vidrio durante 7 días controla la velocidad de secado como consecuencia el desarrollo de fisuras es reducido.

- En la tabla 3.1 se observa que en los films de suelo solo tamizado por la malla #30, cuando la velocidad de secado es controlada (7 días de secado), el ancho de fisuras es proporcional al aumento de la humedad. Esto conlleva a pensar que la resistencia disminuye mientras más agua tenga el grout. En los films de suelo más fino (malla #48) no se observa ninguna tendencia, el ancho de fisura no cambia con el aumento de la humedad.

# CAPÍTULO 4

## Ensayos de tracción indirecta

### 4.1. Introducción

En la primera década de investigación en adobe realizada en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) (1970-1980) varios muros de adobe fueron ensayados y sometidos a diferentes solicitaciones. Los ensayos demostraron que en la mayoría de los casos las fisuras se desarrollan en las juntas de mortero. Se concluyó que las juntas son las zonas críticas y que la adherencia del mortero a los bloques de adobe determina la resistencia de la mampostería (Vargas et al. 2005). El ensayo de tracción indirecta (ETI), desarrollado originalmente para concreto, fue adaptado para medir la resistencia en la interfase mortero-adobe de un emparedado y con ello determinar la resistencia mecánica de la mampostería de adobe. A pesar de que los resultados obtenidos con este ensayo tienen bastante dispersión, se ha demostrado que existe una correlación significativa con ensayos más sofisticados como el de compresión diagonal. La Figura 4.1 muestra la ejecución del ETI en un emparedado de adobe.

Iwaki y Morales presentaron un protocolo de ensayo de tracción indirecta para la mampostería de adobe de aplicación sencilla y económica (Iwaki y Morales 2007). Fue en base a su protocolo que se ejecutaron los ensayos presentados en este trabajo.



**Figura 4.1** Ensayo de tracción indirecta. Dispositivo diseñado en la PUCP (Iwaki y Morales 2007).

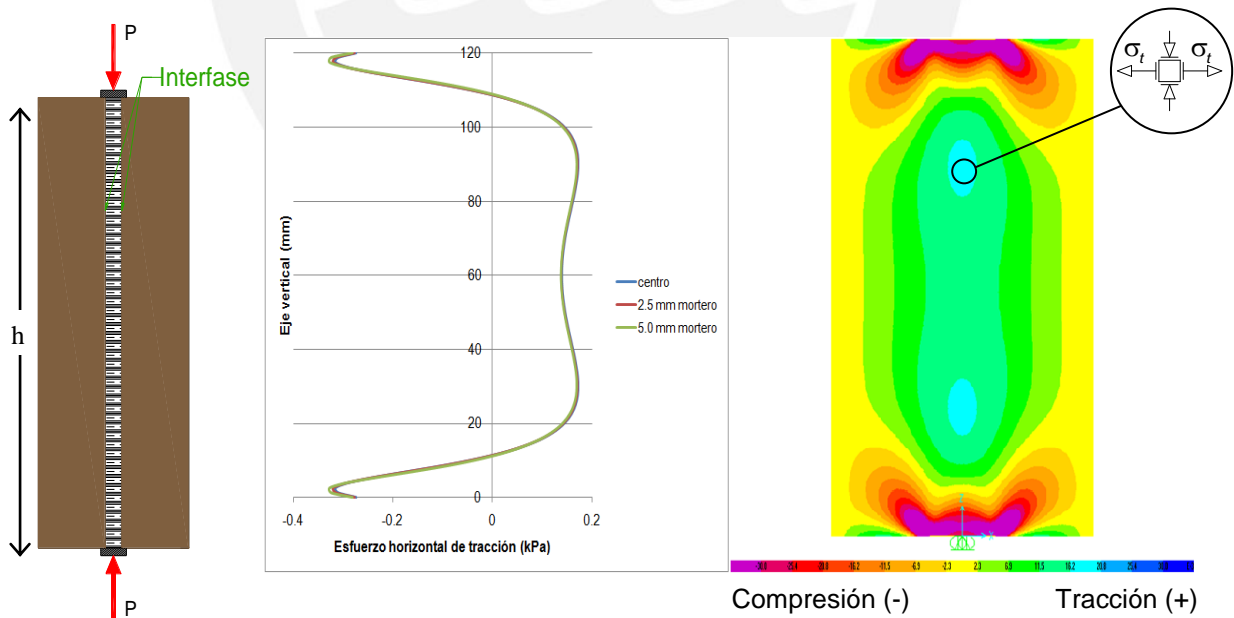
**4.2. Alcance**

El ensayo de tracción indirecta consiste en aplicar una carga de compresión a un emparedado compuesto por dos bloques de adobe unidos con mortero. La compresión, que es llevada hasta la rotura del espécimen, es aplicada a lo largo y sobre el mortero, lo que genera esfuerzos internos de tracción en la zona bajo la línea de carga y en la interfase mortero-adobe. El esfuerzo máximo de tracción en la interfase representa la adherencia existente entre el mortero y el adobe, y se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \alpha \frac{2P_{max}}{\pi A} \tag{1}$$

- Donde:  $\sigma_t$  Esfuerzo máximo de tracción en la interfase mortero-adobe (N/mm<sup>2</sup>).
- $\alpha$  Coeficiente de forma, para calcular esfuerzo de tracción en la interfase.
- $P_{max}$  Carga de rotura (N).
- $A$  Área de la interfase mortero-unidad (mm<sup>2</sup>).  $A=\ell.h$ , donde  $h$  es la altura y  $\ell$  la longitud del emparedado.

La Figura 4.2 muestra la compresión de un emparedado y la distribución de esfuerzos de tracción que se desarrollan en la interfase mortero-adobe.



**Figura 4.2** Esquema de la distribución de esfuerzos internos de tracción en un emparedado de adobe. Fuente: Iwaki C.

El diseño, la construcción y la implementación del equipo mecánico para el ETI en emparedados de adobe se encuentra en Iwaki y Morales (2007).

El ETI fue utilizado para comparar las resistencias obtenidas en cada tipo de grout y evaluar la capacidad de los aditivos en mejorar la resistencia a tracción del mortero de suelo solo tamizado, con el fin de clasificar las dosificaciones óptimas que podrían ser usadas como selladores en la reparación de muros de tierra por inyección.

La dimensión de los adobes utilizados en la fabricación de emparedados fue 240 mm de longitud, 120 mm de altura y 40 mm de espesor. Los adobes fueron fabricados con el suelo extraído del campus PUCP. Debido a que se pretende inyectar fisuras finas menor a los 3 mm, se estudió espesores de mortero pequeños. El espesor de mortero que se obtuvo estuvo entre 1 mm y 2.8 mm. Para cada tipo de mezcla se fabricaron cuatro emparedados y se dejaron secar durante 21 días antes de ser ensayados.

### 4.3. Fabricación de emparedados

#### Materiales

- Agua
- Suelo PUCP tamizado por las mallas #30 y #48
- Unidades de adobe de 240x120x40 mm.

#### Equipo

- Plancha metálica. Utilizado para mejorar la superficie del adobe en contacto con el grout.
- Escobilla. Utilizado para la limpieza de las unidades de adobe.
- Badilejo. Utilizado para la aplicación del grout.
- Nivel de mano. Utilizado para asegurar la horizontalidad y verticalidad del emparedado.
- Topes de plástico de 1 mm de espesor. Utilizado para establecer el espesor del mortero.

#### Procedimiento

- Selección, limpieza y humedecimiento de unidades (Figura 4.3). Para un emparedado se seleccionan dos unidades que no presenten defectos de fabricación como alabeo o agrietamiento. La superficie que estará en contacto con el mortero se mejora y alisa con la plancha metálica para garantizar uniformidad en el espesor del mortero. Luego, se limpian los adobes con la escobilla para eliminar las partículas sueltas y se humedecen con agua las caras del adobe que estarán en contacto con el mortero.



a) Alisado de superficie      b) Limpieza de superficie      c) Humedecimiento de superficie

**Figura 4.3** Mejora, limpieza y humedecimiento de la superficie del adobe que recibirá al grout.

- Colocación del mortero (Figura 4.4). Sobre la cara humedecida del adobe se vierte la cantidad suficiente de grout y se esparce. Luego, se colocan los topes de plástico a cada lado del adobe para obtener el espesor de mortero deseado.



a) Colocación del grout      b) Colocación de topes de junta

**Figura 4.4** Colocación del mortero en la fabricación del emparedado.

- Cubierta de emparedado (Figura 4.5). Inmediatamente después de verter el grout se coloca el segundo adobe con la cara humedecida hacia el grout. Se ejerce presión sobre el emparedado hasta alcanzar el espesor de los topes. Luego, con el nivel se regula la horizontalidad del emparedado al igual que el aplomo. Con el badilejo se enrasan las caras del emparedado y se tapan los huecos dejados por los topes.



a) Obtención del espesor del grout      b) Regulación del aplomo      c) Enrasado del emparedado

**Figura 4.5** Cubierta y acabado del emparedado.

- Identificación de emparedados y determinación de humedad inicial del grout (Figura 4.6). Se separa una muestra representativa de grout para realizar el ensayo de contenido de humedad descrita en la norma técnica peruana. Terminada la elaboración del emparedado este se coloca bajo sombra para que seque durante 21 días. Cada emparedado se identifica con un código.



a) Secado de emparedados

b) Muestra para ensayo de humedad

**Figura 4.6** Identificación de emparedados de adobe y muestra para determinación del contenido de humedad.

#### 4.4. Ejecución del ensayo

##### Materiales

###### Para la fabricación del capping

- Yeso de construcción
- Agua
- Reglas de madera y triplex
- Ganchos metálicos

##### Equipo

###### Para la ejecución del ensayo

- Equipo de ETI. Diseñado por el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI-PUCP).
- Cronómetro. Ayuda a controlar la aplicación constante de la carga de compresión.
- Nivel. Utilizado para centrar el emparedado con los ejes del equipo.

###### Para la medición

- Calibrador vernier o pie de rey. Utilizado para medir el espesor del mortero de grout.
- Tarjeta medidora de fisura. Utilizado para medir el ancho de la fisura.
- Fisurómetro. Utilizado para medir el número de fisuras.

### Procedimiento

- Fabricación del capping (Figura 4.7). El capping es importante para distribuir la carga de forma homogénea. Para elaborarlo se echa el emparedado sobre uno de sus costados y se sujetan dos reglas de madera a cada lado con dos ganchos metálicos. Ambas reglas se posicionan a una altura relativa sobre la superficie del emparedado y se nivelan horizontalmente. La diferencia de altura entre las reglas y el emparedado determina la altura del capping. Luego, se colocan dos reglas de triplex a cada lado de la junta de mortero para determinar el espesor del capping. Una vez posicionadas las reglas se prepara la mezcla de yeso con agua y se vierte sobre la junta del emparedado. Con una plancha metálica se enrasa y quita el excedente de yeso. Finalmente se retiran las reglas de madera y se deja secar. El proceso se repite para el otro costado del emparedado. Para mayor detalle revisar la referencia de Iwaki y Morales 2007.



**Figura 4.7** Fabricación del capping de yeso en los emparedados de adobe.

- Fijación del emparedado en el equipo (Figura 4.8). Se coloca el emparedado sobre el apoyo del equipo y se alinea el eje de la junta de mortero con el eje de las varillas ubicadas en el apoyo y en el aplicador de carga. Luego, para fijar el emparedado al anillo de carga se aplica la carga de compresión lentamente hasta asegurar su estabilidad. Durante la fijación de la carga se usa el nivel para asegurar la alineación del espécimen y evitar volteos. En esta etapa el número de divisiones que indica el dial de deformación se registra y se establece como la lectura inicial. Seguidamente, a cada lado del emparedado se colocan marcos de acero para evitar que las unidades del emparedado se caigan y rompan después de producida la falla.



a) Alineación con el eje del equipo      b) Carga inicial de fijación

**Figura 4.8** Fijación del emparedado al equipo de ensayo.

- Aplicación de carga. La carga se aplica de forma continua a razón de 0.2 mm de deformación por minuto. Para ello se controla el avance del dial de deformación con el cronómetro. Al producirse la falla se registra la deformación final en número de divisiones del dial, llamada lectura final. La Figura 4.9 muestra un emparedado ensayado a tracción indirecta, este se abre por la interfase mortero-adobe.



a) Rotura del espécimen

b) Emparedado ensayado

**Figura 4.9** Falla del emparedado luego del ETI.

- Medición. Se cuenta el número de fisuras que atraviesan los dos ejes perpendiculares que conforman el fisurómetro. También se registra el ancho de las cuatro fisuras más

gruesas. Con el vernier se mide el espesor del mortero en sus cuatro lados y se calcula el promedio.

- Reporte de datos. Se reportan los siguientes datos:
  - Código y edad del emparedado.
  - Largo, alto y espesor del emparedado para calcular el área de la interfase ( $A=l/h$ ) y la esbeltez ( $\lambda=h/b$ ) del emparedado.
  - Humedad inicial del grout, para compararla con la humedad nominal y saber si se alcanzó lo estimado.
  - Espesor del mortero, para evaluar su relación con la fisuración.
  - Coeficiente de forma  $\alpha$ .
  - Lectura inicial y final del dial de deformación para determinar la carga de rotura.
  - Número y ancho de fisuras, para comparar el efecto del aditivo en la fisuración y resistencia del grout respecto a los emparedados de suelo solo.

### Cálculos

La carga máxima o de rotura se obtiene con la tabla de calibración del equipo de ensayo, para ello es necesaria la diferencia de la lectura inicial y final del dial de deformación. Luego, con la esbeltez del emparedado y el espesor promedio del mortero se determina el valor del coeficiente de forma ( $\alpha$ ). Este último se utiliza para determinar el esfuerzo de tracción horizontal en la interfase mortero-unidad y se define con un análisis de elementos finitos (Iwaki y Morales 2007). La esbeltez de los emparedados fue 1.5. De acuerdo al espesor de los morteros, el coeficiente de forma varió entre 0.777 y 0.778.

Finalmente se hace uso de la expresión 1 para calcular la resistencia a la tracción del emparedado de adobe en la interfase.

$$\sigma_t = \alpha \frac{2P_{max}}{\pi A} \quad (1)$$

El área real promedio de la interfase de los emparedados se obtuvo con la medición de las dimensiones de 10 unidades de adobe, que fue 293 cm<sup>2</sup>. Este valor es 2% mayor que el área nominal.

#### 4.5. Mezclas de grout estudiadas

Las dosificaciones de grouts ensayadas a tracción indirecta fueron las que se preseleccionaron con el ensayo de agrietamiento en films. El detalle de las dosificaciones estudiadas y sus resultados se muestran tabulados en los capítulos siguientes.

#### 4.6. Resultados de grouts de suelo solo

La Tabla 4.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos de las mezclas hechas con suelo solo. A partir de estos valores se evaluará la eficiencia de los aditivos.

Los promedios de las resistencias han sido calculados considerando un intervalo de confianza comprendido entre 1.3 veces la desviación estándar por arriba y abajo del promedio ( $\bar{x} + 1.3\sigma, \bar{x} - 1.3\sigma$ ). Es decir, la probabilidad de que el valor real de resistencia este dentro de ese rango es de 80%. Los valores fuera del intervalo son considerados valores atípicos, por lo que no han sido tomados en cuenta en la evaluación de los resultados.

**Tabla 4.1** Resistencia a tracción promedio de grouts de suelo solo.

Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. Tracción Prom. (kPa)	Coeficiente de variación (%)	Fisuración		Espesor prom de mortero (mm)
				N° prom. Fisuras	Ancho prom (mm)	
SSM30H50	48	44.7	12.7	7.5	0.13	1.50
SSM30H60	56	16.0	28.5	9.8	0.26	1.95
SSM30H70	66	16.7	41.3	30.0	0.10	1.27
SSM48H50	50	18.3	11.3	25.3	0.33	2.22
SSM48H60	59	17.8	18.7	20.8	0.38	1.95
SSM48H70	77	14.2	20.7	32.8	0.70	1.46

SS : suelo solo.

M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

En la Tabla 4.1 se observa que las humedades iniciales de los grouts difieren de los valores nominales. Esta diferencia puede deberse a que la muestra de grout para el ensayo de contenido de humedad haya tenido una relación agua/sólido diferente en relación a toda la mezcla por efectos del asentamiento de las partículas de suelo. Sin embargo, la diferencia es mínima y los rangos de humedades previstos siguen marcados.

Además, se distingue que existen diferencias entre el espesor de mortero de los emparedados de cada tipo de mezcla, donde la mayor diferencia corresponde a 67% entre las mezclas SSM30H70 y SSM48H50. Sin embargo, esta variabilidad en el espesor

de mortero no impide que los resultados sean comparables. En el estudio de Iwaki y Morales se determinó que en emparedados con la misma esbeltez, mientras mayor es el espesor de mortero menor es el esfuerzo máximo de tracción en la interfase (coeficiente de forma disminuye). En este caso donde los emparedados tienen 1.5 de esbeltez, el análisis de elementos finitos realizado para calcular los coeficientes de forma, indica que cuando el espesor de mortero es menor a 5 mm el coeficiente de forma tiene una variación casi nula, por lo que el esfuerzo máximo de tracción en la interfase es prácticamente independiente del espesor del mortero.

Los resultados de la variación del factor de forma para diferentes espesores de mortero de emparedados con 1.5 de esbeltez, se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Factor de forma ( $\alpha$ ) para emparedados con 1.5 de esbeltez

Espesor de Mortero	$\alpha$
centro	0.779
2.5 mm	0.777
5.0 mm	0.768

#### 4.7. Observaciones

El suelo está compuesto por un esqueleto estructural constituido por una fracción de arena, limo y otras partículas mayores y por el plasma (fracción arcillosa) que existe entre ellas. Asimismo, está establecido por un mecanismo de transmisión de fuerzas, como un esqueleto en conjunto, que se activa ante una carga y cuyo funcionamiento se parece al efecto arco. Al eliminar partículas de arena con el tamizado, el esqueleto estructural se debilita y con ello la resistencia a tracción se ve afectada (Terzaghi y Peck 1969). Esto se refleja en la Tabla 4.1, donde al obtener grout más finos y diluidos la resistencia a tracción disminuye. Es así que los grouts de suelo tamizado por la malla #48 no tienen un esqueleto bien definido y en consecuencia tienden a resistir menos a esfuerzos de tracción que los grouts tamizados por la malla #30.

Podría considerarse que la resistencia a tracción obtenida en los emparedados con SSM30H50 es errónea debido a que es bastante alta en comparación con los demás emparedados con el mismo suelo. Sin embargo, a manera de confirmar este resultado se ejecuto nuevamente el ETI a un nuevo juego de emparedados con la misma mezcla. El resultado de los nuevos especímenes fue muy similar al que se había obtenido primero. De manera que la magnitud de dicha resistencia se atribuye a que el suelo tamizado por

la malla #30 aún contiene partículas de arena fina y el porcentaje de humedad aún no disminuye de manera importante la resistencia.

Se ha considerado que un valor tolerable de la resistencia a tracción indirecta de un emparedado con mortero de suelo PUCP de 15mm de espesor es 13.1 kPa. Este valor ha sido recopilado de la investigación realizada por Vargas para suelo PUCP sin tamizar (Vargas et al. 1983). Si se compara dicho valor con las resistencias de los grouts de suelo solo mostradas en la Tabla 4.1, se puede decir que a pesar de la disminución de las resistencias, estas son mayores al límite y los grouts son aptos para ser usados como selladores en la reparación de fisuras.

El intervalo de confianza fue establecido debido a que algunos de los coeficientes de variación iniciales, que consideraba todos los valores de cada mezcla, eran muy altos (entre 25% y 42%). Con la eliminación de algunos valores se mejoró la precisión del valor de la resistencia. A pesar que los resultados aún mantienen una dispersión alta, no dejan de ser una aproximación válida de la resistencia de la mampostería de adobe. Los coeficientes de variación más altos corresponden a los 2 grouts más húmedos de suelo tamizado por la malla #30.

#### **4.8. Correlación entre los ensayos de agrietamiento en films y tracción indirecta**

Se pretende validar el ensayo de agrietamiento en films para ello se comparó los resultados de ambos ensayos. Si existiera alguna correlación, el ensayo de agrietamiento en films sería útil para seleccionar en base a la observación de fisuras las mezclas que podrían desarrollar resistencias aceptables.

Se ha mencionado que la reducción del espesor del mortero tiende a mejorar la resistencia a tracción en la interfase del emparedado, debido a que las fisuras se hacen más finas. Es decir, que el ancho de las fisuras desarrolladas en el mortero está asociado a la resistencia a tracción en la interfase mortero-adobe.

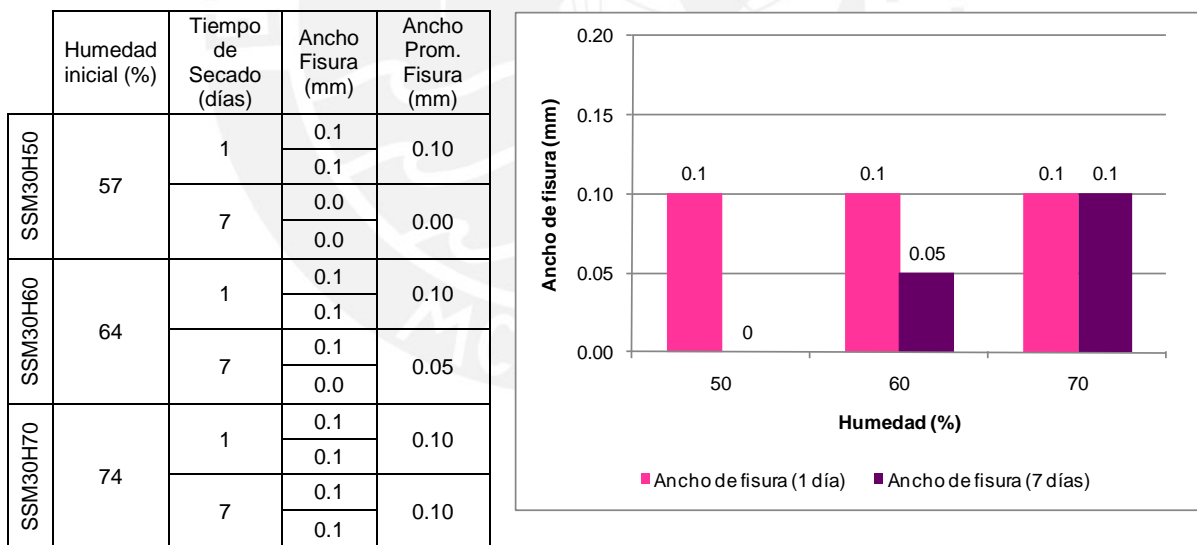
Con el fin de encontrar una correlación satisfactoria entre ambos ensayos y teniendo en cuenta la influencia del ancho de las fisuras en la resistencia, se comparó el ancho máximo de fisura medido en el ensayo de agrietamiento en films con la resistencia a tracción correspondiente al mismo tipo de mezcla.

A continuación se describe las comparaciones hechas para las mezclas preparadas con suelo solo.

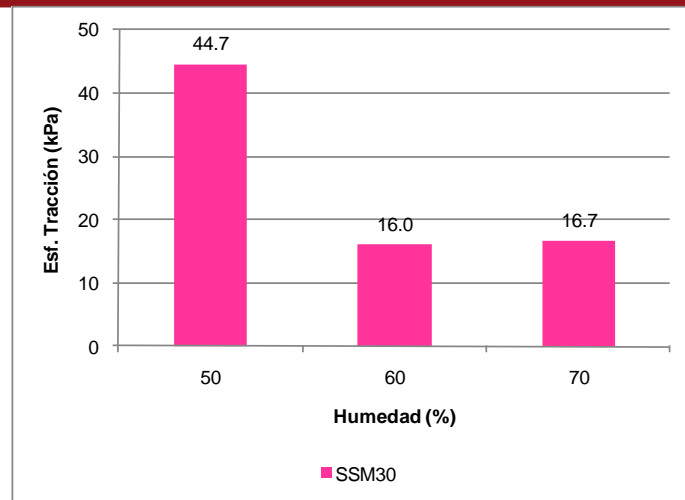
o Suelo solo malla #30

En la Figura 4.10 se observa que cuando el secado es rápido, films destapados después de 1 día, el ancho de las fisuras es 0.1 mm independientemente de la humedad. Cuando el secado es lento, films destapados a los 7 días, el ancho de fisura aumenta conforme la mezcla se hace más húmeda. Basado en el agrietamiento exhibido en las muestras destapadas a los 7 días, era de esperar que la resistencia del grout de suelo solo tamizado por la malla #30 disminuya con el aumento de la humedad. En la Figura 4.11 se observa que efectivamente la resistencia para este tipo de mezcla disminuye con el aumento de 50% a 60% de humedad, luego entre las humedades de 60% y 70% el esfuerzo prácticamente se mantiene.

Se considera entonces que sí existe relación entre los resultados de ambos ensayos en el caso de los grouts de suelo tamizado por la malla #30. Por tanto, la observación de agrietamiento en films para este tipo de grout es útil para escoger dosificaciones de grout por el menor ancho de fisura ya que este fenómeno está asociado con una mayor resistencia.



**Figura 4.10** Ancho de fisuras en films de suelo solo tamizado por la malla #30.



**Figura 4.11** Esfuerzos de tracción horizontal en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #30.

o Suelo solo malla #48

En la Figura 4.12 se observa que los films fabricados con grouts de suelo solo tamizado por la malla #48 desarrollaron fisuras cuyo ancho no aumentó ni disminuyó con el aumento de la humedad de la mezcla. Los films con secado rápido, destapados luego de 1 día, tuvieron un ancho promedio igual a 0.05 mm, mientras que los films con secado lento, destapados a los 7 días, no desarrollaron fisura alguna. El secado lento y uniforme que ocurre en los films de suelo fino genera que las fisuras sean más finas e imperceptibles. Debido a que no se observa ninguna tendencia del ancho de las fisuras en grouts con este suelo tamizado, es difícil asegurar una relación con la resistencia a tracción del grout. Podría esperarse que la resistencia alcance valores altos debido a la finura o falta de fisuras en la mezcla. Sin embargo, como se observa en la Figura 4.13, la resistencia va disminuyendo con el aumento de la humedad. Además, por tratarse de un suelo con menor cantidad de arena y un esqueleto estructural más débil, la resistencia es menor que la obtenida con el suelo tamizado por la malla #30, por ende, el ancho de fisuras en los films de SSM48 debería ser mayor que en los de SSM30. Sin embargo, sucede lo contrario y los films de SSM48 con secado lento, no se fisuran.

En consecuencia, la observación en films no es útil con mezclas de suelo tamizado por la malla #48 pues no hay una relación inversa entre el ancho de las fisuras en los films y la resistencia a tracción en la interfase mortero-adobe. Tampoco hay consistencia con la resistencia y ancho de fisuras en films registradas en los grouts de suelo con esqueleto estructural mejor formado que es el tamizado por la malla #30.

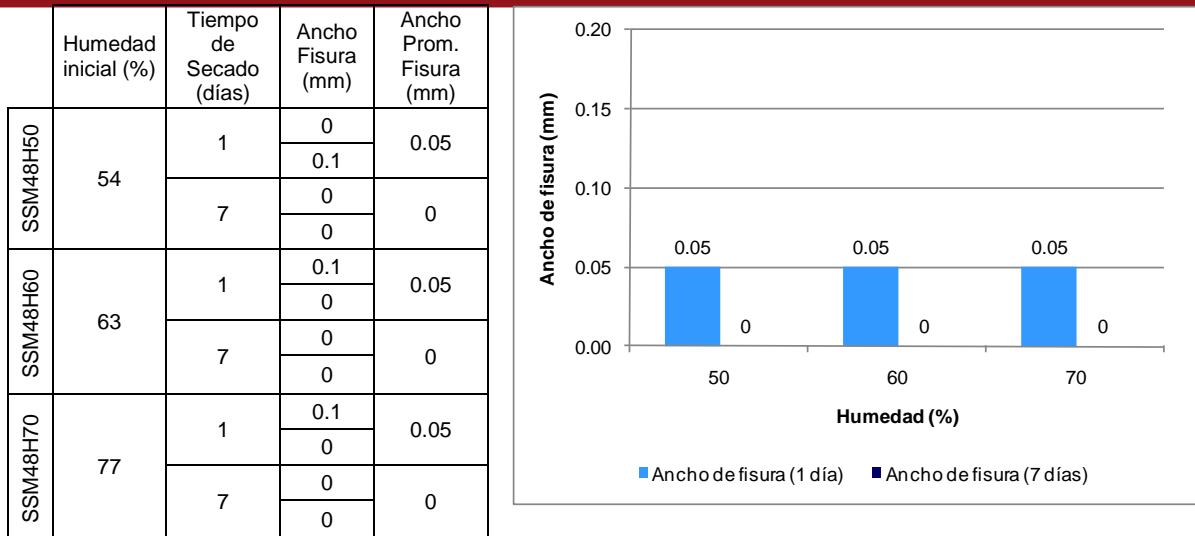


Figura 4.12 Ancho de fisuras en films de suelo solo tamizado por la malla #48.

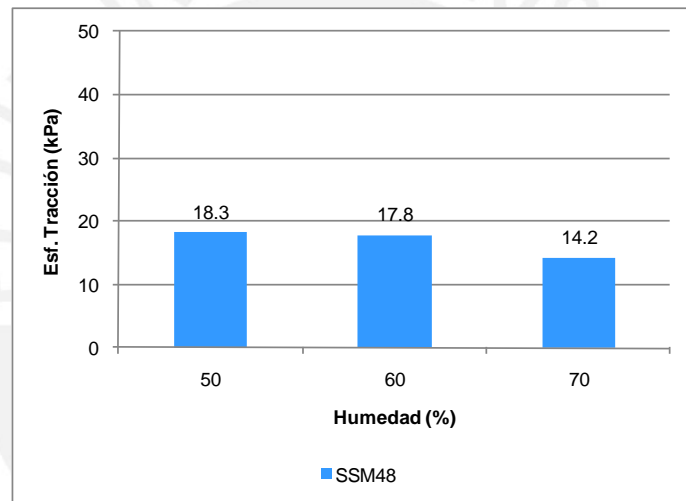


Figura 4.13 Esfuerzos de tracción horizontal en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #48.

#### 4.8.1. Conclusión

Existe correlación entre los anchos de fisura medidos en el ensayo de agrietamiento en films y la resistencia obtenida en el ETI en grouts de suelo solo tamizado por la malla #30. Por tanto, para ese tipo de suelo es útil realizar el ensayo de agrietamiento en films para seleccionar las dosificaciones de grouts con el menor ancho de fisura con el fin de determinar luego, con el ETI, si la adherencia del grout es adecuada. Lo contrario ocurre con el suelo tamizado por la malla #48 pues no se ha encontrado correlación entre ambos ensayos. Es así que para estudiar la goma de tuna, huevo y vaselina con el ensayo de agrietamiento en films se preparó grouts con suelo tamizado por la malla #30. En el caso de las microfibras de papel se utilizó suelo tamizado con ambas mallas debido a que en el momento que se fabricaron los films, esta comparación aún no se había analizado.

## CAPÍTULO 5

### Efecto de la adición de microfibras de papel

Anteriormente se ha estudiado la paja como aditivo en el mortero de la mampostería de adobe, y se observó que la paja tiene un efecto de “costura” en el barro que controla la microfisuración por contracción de secado lo que mejora la integración entre los bloques y el mortero (Vargas et al. 1983). En este trabajo se pretende lograr el mismo efecto en los grouts de barro, mediante la adición de microfibras obtenidas del papel periódico reciclado.

#### 5.1. Fabricación del aditivo

Las microfibras fueron obtenidas del papel periódico a partir de la técnica para fabricar papel maché. La técnica consiste en descomponer el papel mediante remojo para luego licuarlo y obtener una pulpa, tal como se observa en la Figura 5.1.

Primero, se rasga el papel en tiras de aproximadamente 20 mm de espesor y estas en cuadrados pequeños. Los trozos de papel se colocan en un depósito, se vierte agua hasta cubrirlos y se deja en remojo durante 2 días. Luego, el papel remojado se licúa hasta obtener una masa cremosa. Al cortar el papel con la mano la textura que queda en el borde del papel rasgado hace que la absorción del agua por capilaridad sea más eficiente que si el papel fuese cortado con tijeras.



**Figura 5.1** Obtención de pulpa de papel. Remojo en agua y licuado del papel.

Por último, como se observa en la Figura 5.2, la masa cremosa que se obtiene después del licuado se cuela con una malla fina cualquiera para eliminar el exceso de agua y así obtener solo las microfibras. Para evitar que la masa de microfibras se seque y endurezca, ésta se conserva dentro de una bolsa plástica sellada hasta que sea utilizada.



a) Masa cremosa de papel licuado

b) Colado de la masa de papel

**Figura 5.2** Eliminación del exceso de agua de la masa de papel licuado.

Para determinar el porcentaje del aditivo en el grout, se decidió seguir un procedimiento similar al ensayo de contenido de humedad, para ello se disolvió un volumen de microfibras en el agua a utilizar en la mezcla de grout. Luego, se pesó una muestra del preparado de agua con microfibras para determinar el peso húmedo de la muestra y se colocó en un horno para que seque. Después de 24 horas de secado se retiró la muestra y se pesó para determinar su peso seco. La diferencia del peso húmedo y el peso seco dio como resultado el peso del agua. Luego se dividió el peso seco de las microfibras entre el peso del agua para determinar el porcentaje de aditivo.

En base a la experiencia se determinó que el volumen necesario para obtener 1% de microfibras respecto al peso del agua son 5 porciones de microfibras medidas con la espátula (Figura 5.3a) en 1 litro de agua.



a) Porción de papel colado

b) Agua con 1% de microfibras

**Figura 5.3** Obtención de agua con 1% de microfibras de papel.

## 5.2. Ensayo de agrietamiento en films

Las proporciones de microfibras de papel estudiadas en el ensayo de agrietamiento en films fueron de 1% y 2% respecto al peso del agua.

**Resultados**

La Tabla 5.1 presenta los valores promedios de espesor de film, número y ancho de fisura de las mezclas de suelo con y sin microfibras. A partir de esta tabla se elaboraron gráficos comparativos para identificar las dosificaciones con microfibras que logren disminuir la fisuración por contracción de secado.

**Tabla 5.1** Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con microfibras de papel.

Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Tiempo de secado bajo vidrio (días)	Espesor prom. de Film (mm)	Nº prom. de Fisuras	Ancho prom. de Fisura (mm)
Microfibras de papel	0	M30H50	57	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.60	0.0	0.00
		M30H60	64	1	0.70	4.5	0.10
				7	0.60	1.0	0.05
		M30H70	74	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.85	1.5	0.10
		M48H50	54	1	0.50	1.0	0.05
				7	0.45	0.0	0.00
		M48H60	63	1	0.45	0.5	0.05
				7	0.35	0.0	0.00
		M48H70	77	1	0.35	0.5	0.05
				7	0.45	0.0	0.00
	1	M30H50	52	1	0.70	0.0	0.00
				7	0.65	0.0	0.00
		M30H60	62	1	0.85	0.0	0.00
				7	0.70	0.0	0.00
		M30H70	71	1	0.85	0.0	0.00
				7	0.85	0.0	0.00
		M48H50	52	1	0.65	0.0	0.00
				7	0.70	0.0	0.00
		M48H60	65	1	0.50	0.0	0.00
				7	0.45	0.0	0.00
		M48H70	75	1	0.50	0.0	0.00
				7	0.55	0.0	0.00
2	M30H50	50	1	1.00	0.0	0.00	
			7	0.65	0.0	0.00	
	M30H60	61	1	1.20	1.5	0.10	
			7	1.10	0.0	0.00	
	M30H70	77	1	1.05	0.0	0.00	
			7	1.00	0.0	0.00	
	M48H50	55	1	0.75	2.0	0.10	
			7	0.80	0.0	0.00	
	M48H60	67	1	0.60	0.0	0.00	
			7	0.75	0.0	0.00	
	M48H70	76	1	0.75	0.0	0.00	
			7	0.75	0.0	0.00	

M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.

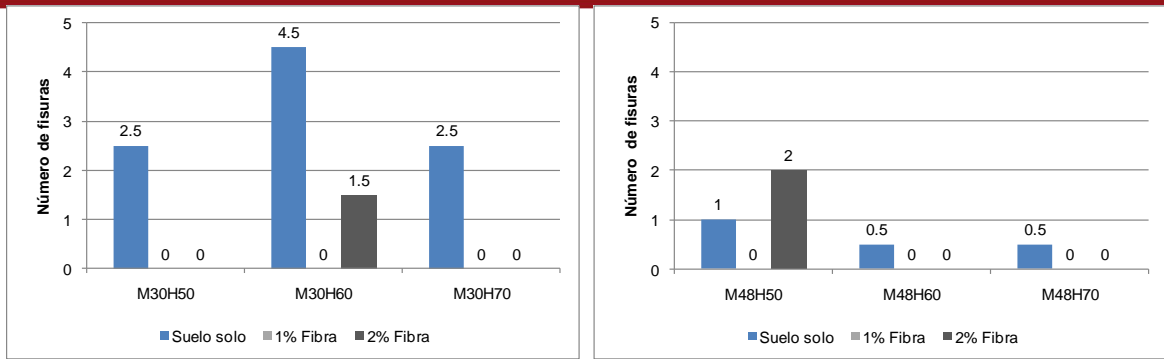
Se observa que el espacio ocupado por las microfibras en el grout es importante ya que genera un aumento en el espesor de los films respecto a los films de suelo solo. El espesor de los films de SF1M30 aumenta en 1% y los de SF2M30 en 39% respecto al espesor promedio de los films de SSM30. En los films de suelo más fino, el espesor aumenta en 33% para SF1M48 y 74% para SF2M48 respecto al espesor promedio de los films de SSM48. Esto afecta de manera significativa la fluidez de la mezcla tal como se observa en la Figura 5.5. También se observa que en general las humedades iniciales obtenidas no distan mucho de las nominales.

Además, se observa en la Tabla 5.1 que en el caso de los films que secaron 7 días bajo vidrio, los de suelo solo tamizado por la malla #30 fueron los únicos que se fisuraron. En estas mezclas (7 días) la adición de 1% y 2% de microfibras redujo totalmente la formación de fisuras en ambas condiciones de secado. Con la adición de 2% en los films de SM30, solo el de 60% de humedad se fisuró cuando fue destapado luego de 1 día de secado. De manera que para mejorar la acción de las microfibras en reducir la formación de fisuras, es necesario que el grout seque lentamente.

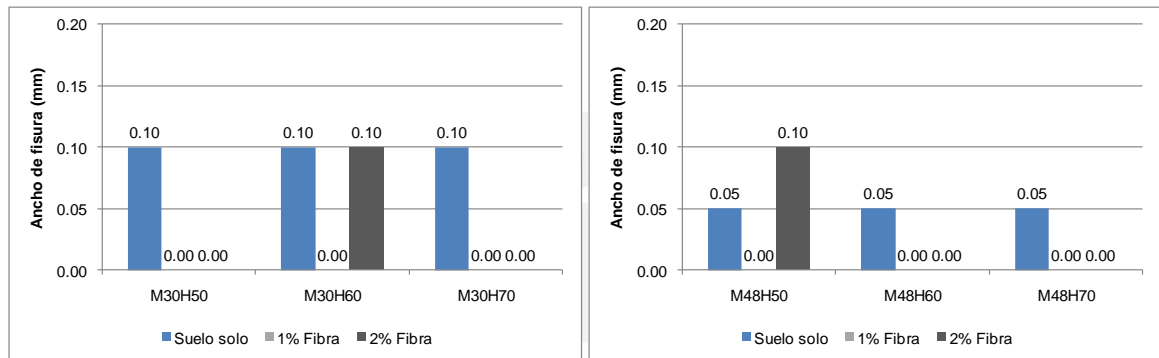
Para facilitar la interpretación de los gráficos elaborados en este capítulo, se siguió un patrón de colores que identifica los grouts estudiados. Los grouts de suelo solo están identificados con la escala de azules y los grouts con microfibras con la escala de grises.

En la Figura 5.4 se han graficado los resultados de los films secados bajo vidrio durante 1 día. En ella se distingue que con 1% de microfibras se evitó la formación de fisuras en todas las mezclas. Solo 2 grouts con 2% de microfibras se fisuraron, estos corresponden a los films preparados con SM30H60 y SM48H50. En el primer caso (SF2M30H60) el número de fisuras es menor y el ancho de fisura es igual en comparación con la mezcla de suelo solo con la misma humedad. Sin embargo, en el segundo caso (SF2M48H50) el número y ancho de fisuras desarrolladas es el doble que en la mezcla de suelo solo con la misma humedad. En base a lo expuesto se confirma que las microfibras generan un efecto costura que frena el desarrollo de fisuras por contracción de secado, aunque, un exceso de microfibras podría causar el efecto contrario a la disminución de la fisuración.

También se observa que en los films de suelo solo tamizado por la malla #48 el número y ancho de fisura son menores en comparación con los films de suelo tamizado por la malla #30. Sin embargo, ese efecto de la granulometría no se distingue en los films de suelo con microfibras ya que estos últimos no se fisuraron.



a) Número de fisura promedio en grouts de suelo tamizado por las mallas #30 y #48.



b) Ancho de fisura promedio en grouts de suelo tamizado por las mallas #30 y #48.

**Figura 5.4** Comparación de resultados del agrietamiento en films de grouts de suelo solo y con 1% y 2% de microfibras. Los resultados son de las muestras destapadas luego de 1 día.

### 5.2.1. Observaciones

- En la Figura 5.5 se observa que la presencia de microfibras hace más pastosa la mezcla de grout, la vuelve menos fluida en comparación con la mezcla de suelo solo. Como se espera reparar fisuras finas con barro muy fluido, se decidió trabajar con 1% y 2% de microfibras y no estudiar porcentajes más altos de este aditivo. Además, las microfibras en 1% y 2% respecto al peso del agua ya evitan el desarrollo de fisuras en la mayoría de grouts.



a) Suelo solo



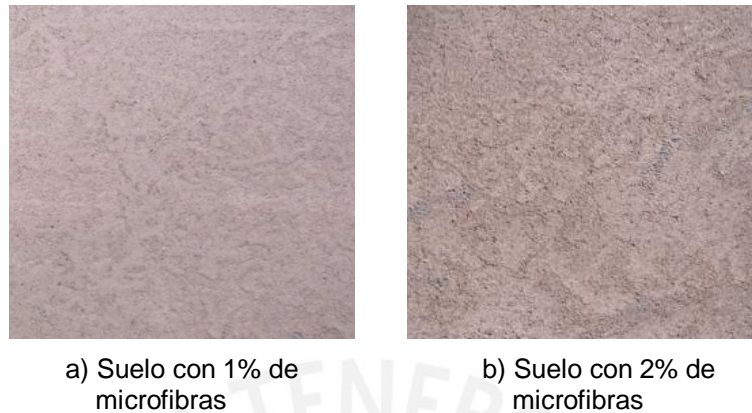
b) Suelo con 1% de microfibras



c) Suelo con 2% de microfibras

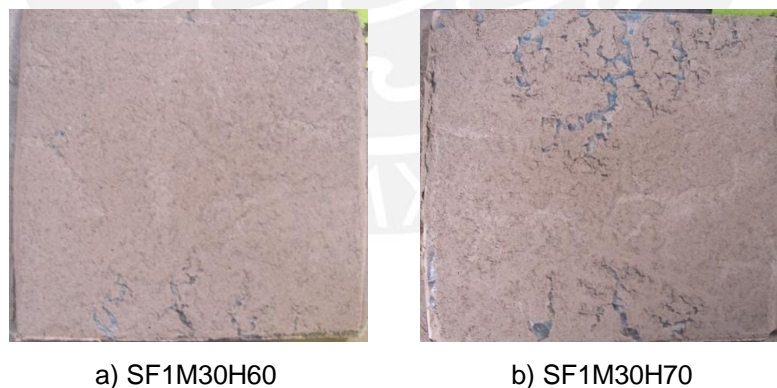
**Figura 5.5** Cambio de fluidez en los grouts por la presencia de microfibras de papel. Grouts hechos con suelo tamizado por la malla #48 con 50% de humedad nominal.

- En la Figura 5.6 se observa que las microfibras crean una superficie porosa con algunos surcos, similar a la piedra pómez, lo que no se observa en los films de suelo solo. Esta textura de la superficie de los films dificultó la identificación de las fisuras.



**Figura 5.6** Superficie porosa en films de suelo con microfibras. Los films corresponden a grouts de suelo tamizado por la malla #30 con 70% de humedad nominal destapados luego de 24 horas de secado bajo vidrio.

- Durante la fabricación de los films con grouts de 60% y 70% de humedad nominal, se observó la formación de surcos generados por la salida del agua del grout al momento de cubrir los films y ejercer presión con el vidrio superior. Los surcos y espacios vacíos se observan en la Figura 5.7. Los vacíos en el film generados por el escurrimiento del agua también dificultó la identificación de fisuras.



**Figura 5.7** Surcos formados por el escurrimiento de agua en superficie de films de suelo con microfibras. Films destapados luego de 7 días de secado bajo vidrio.

- Se identificó la presencia de microfibras que sobresalían del borde del film. Reconociéndose el efecto de costura de la microfibra al unir dos bordes de mortero separados por una fisura.

### 5.2.2. Conclusiones

La presencia de microfibras en los grouts controla eficientemente la fisuración por contracción de secado. Sin embargo, un exceso del aditivo hace más pastosa la mezcla lo que disminuye la fluidez que se requiere para penetrar una grieta por inyección. Además, el espacio que ocupa la microfibra se hace evidente en el espesor del film, el cual aumenta a medida que se agrega microfibras a la mezcla. Por tanto, parece ser suficiente la adición de 1% de microfibras en los grouts para reducir la fisuración y con ello lograr aumentar la adherencia del mortero en las juntas de barro sin perjudicar significativamente la fluidez.

### 5.3. Ensayo de tracción indirecta

Tras observar el impedimento del desarrollo de fisuras generado por las microfibras en los films de barro, se decidió evaluar la capacidad del menor porcentaje de aditivo en mejorar la adherencia del grout de suelo tamizado por las mallas #30 y #48. Posteriormente, en vista de los resultados satisfactorios en los grouts preparados con el suelo más fino, se estudió la adición de 2% de microfibras solo en los grouts de suelo tamizado por la malla #48. Con este ensayo se midió la eficiencia del aditivo.

#### 5.3.1. Resultados

La Tabla 5.2 presenta la comparación de los valores promedio de resistencia que se obtuvieron en los grouts de suelo tamizado por la malla #30 sin aditivo y con 1% de microfibras con su respectivo coeficiente de variación. Como se explicó en el capítulo anterior, se ha tomado en cuenta un intervalo de confianza determinado por el promedio y 1.3 veces la desviación estándar de cada muestra. En la tabla también se indica el promedio del número y ancho de fisuras medidas en el mortero.

**Tabla 5.2** Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo solo y suelo con 1% de microfibras tamizado por la malla #30

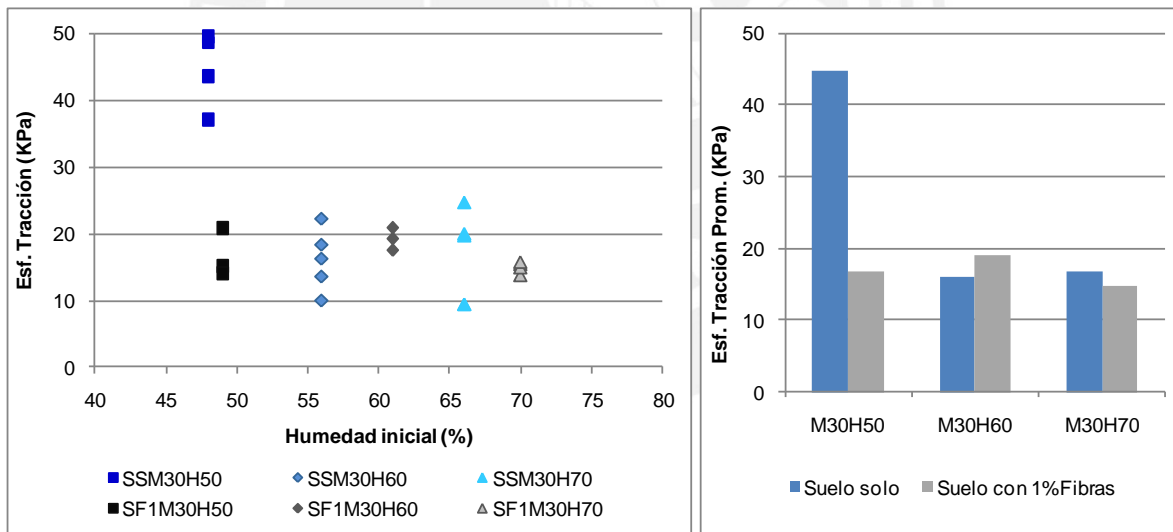
Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. Tracción Prom.	Coeficiente de variación (%)	Fisuración		Espesor de mortero (mm)
				kPa		N° prom. Fisuras	Ancho prom (mm)	
Microfibras de papel	0	M30H50	48	44.7	12.7	7.5	0.13	1.50
		M30H60	56	16.0	28.5	9.8	0.26	1.95
		M30H70	66	16.7	41.3	30.0	0.10	1.27
	1	M30H50	49	16.7	21.5	5.0	0.24	1.62
		M30H60	61	19.1	8.9	9.7	0.36	1.6
		M30H70	70	14.9	5.9	10.0	0.88	1.51

*M: número de malla con que se tamizó el suelo.*

*H: humedad nominal del grout.*

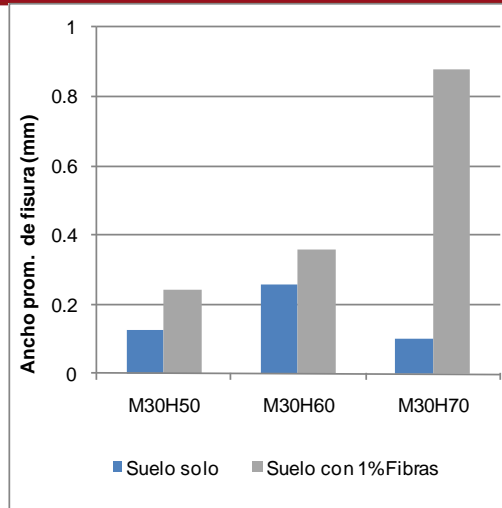
En Tabla 5.2 se distingue que los coeficientes de variación pertenecientes a las mezclas con 1% de microfibras mantienen valores bajos en comparación con las mezclas de suelo solo. Estos últimos tienen una mayor dispersión pero siguen siendo valores comparativos válidos. Los valores bajos indican que los resultados obtenidos son algo más precisos.

En la Figura 5.8 están graficadas las resistencias a tracción en la interfase mortero-adobe obtenidas de grouts de suelo tamizado por la malla #30, donde las mayores resistencias corresponden a los grouts de suelo solo. Se evidencia que la adición de microfibras a grouts de suelo con partículas de arena media no mejora la resistencia a esfuerzos de tracción, por el contrario la reduce. En el grout menos diluido la reducción de la resistencia promedio es de 63%, mientras que en el grout más húmedo la reducción es solo de 11%. Solo en el grout con humedad intermedia las microfibras aumentan la resistencia promedio en 19% respecto al suelo solo, sin embargo, esta mejora no es muy importante. Por consiguiente, en grouts con partículas de suelo medianas las microfibras parecen estorbar en la formación del esqueleto estructural del suelo lo que genera la reducción de la resistencia seca.



**Figura 5.8** Esfuerzos de tracción en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #30 (SSM30) y suelo tamizado por la malla #30 con 1% de microfibras (SF1M30).

La disminución de la resistencia en grouts de suelo tamizado por la malla #30 con 1% de microfibras respecto a grouts de suelo solo, es consistente con el ancho de fisuras medido en las muestras. En la Figura 5.9 se distingue que las fisuras son más anchas en los grouts SF1M30 que en los grouts del mismo suelo sin aditivo. Como ya se ha mencionado el ancho de la fisura desarrollada en el barro es inversamente proporcional a la resistencia en la interfase mortero-adobe.



**Figura 5.9** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo y suelo con 1 % de microfibras tamizado por la malla #30.

Por otro lado, los resultados del ancho de fisura en el mortero de los emparedados con SF1M30 son contradictorios con lo obtenido en el ensayo de agrietamiento en films. Debido a que el ancho de fisura en films con microfibras era nulo se esperaba que este aditivo mejorara la resistencia. Sin embargo, la presencia del aditivo en los emparedados hizo que se desarrollaran fisuras más gruesas y en consecuencia la resistencia disminuyera. Con estos resultados se concluye que el ensayo de agrietamiento en films no resultó ser útil.

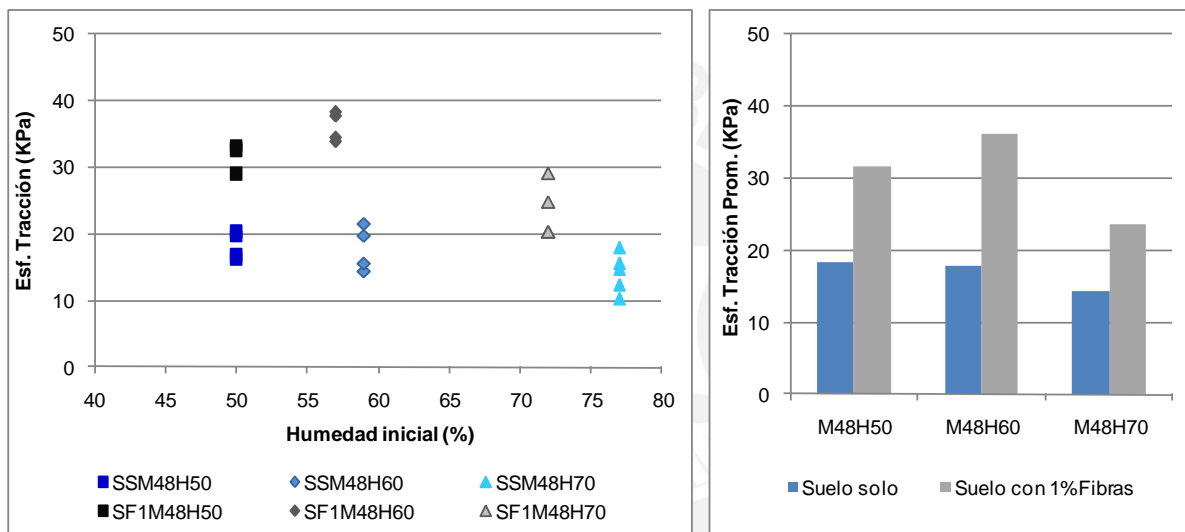
La Tabla 5.3 muestra la comparación de los valores promedio de resistencia que se obtuvieron en los grouts de suelo tamizado por la malla #48 sin aditivo, con 1% y 2% de microfibras.

**Tabla 5.3** Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo solo y suelo con 1% y 2% de microfibras tamizado por la malla #48.

Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. Tracción Prom.	Coeficiente de variación (%)	Fisuración		Espesor de mortero (mm)
				kPa		N° prom. Fisuras	Ancho prom (mm)	
Microfibras de papel	0	M48H50	50	18.3	11.3	25.3	0.33	2.22
		M48H60	59	17.8	18.7	20.8	0.38	1.95
		M48H70	77	14.2	20.7	32.8	0.70	1.46
	1	M48H50	50	31.7	7.0	14.7	0.15	2.12
		M48H60	57	36.1	6.2	15.3	0.46	1.90
		M48H70	72	23.6	17.9	6.5	0.19	1.74
	2	M48H50	48	24.4	18.2	7.0	0.26	1.85
		M48H60	58	18.8	42.9	10.0	0.24	2.17
		M48H70	67	29.6	1.3	17.3	0.34	2.08

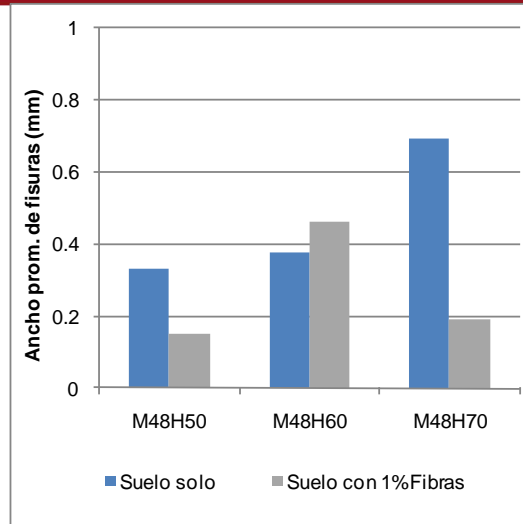
M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.

La presencia de microfibras en los grouts de suelo tamizado por la malla #48 mejora notablemente la resistencia a esfuerzos de tracción del suelo solo, tal como se observa en la Figura 5.10. En las mezclas con 50% de humedad nominal, las microfibras (1%) aumentan la resistencia promedio en 73% respecto al grout de suelo solo, mientras que en las mezclas con 60% y 70% de humedad nominal la resistencia promedio aumenta en 102% y 66% respectivamente. Se considera que ese aumento es producto de la consolidación del esqueleto estructural del suelo fino. La eliminación de las partículas de arena por tamizado deja espacios vacíos que la microfibra completa, lo que fortalece la estructura del suelo y en consecuencia mejora la resistencia seca.



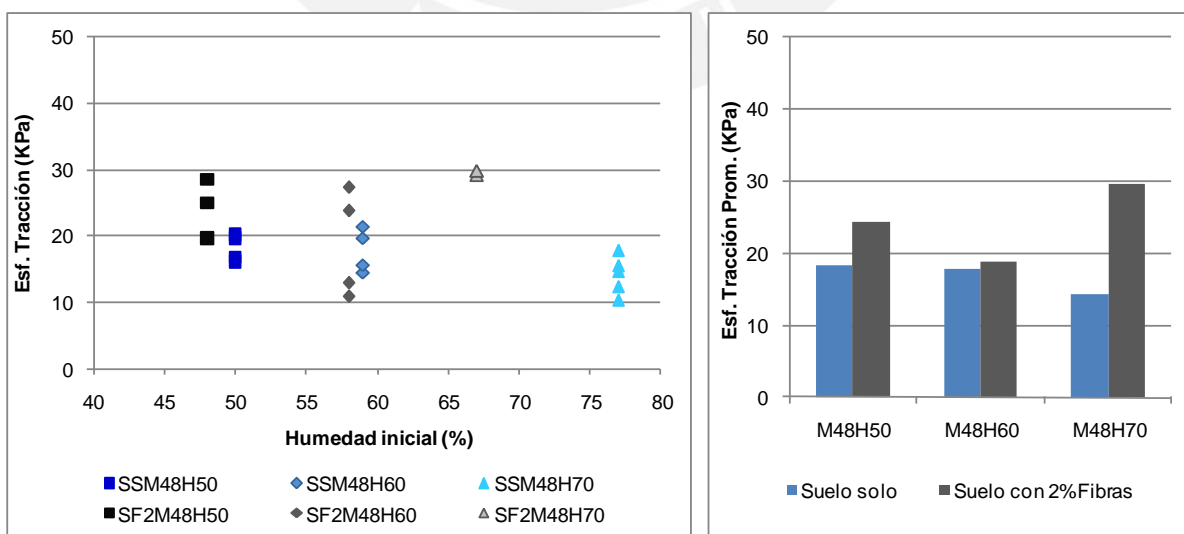
**Figura 5.10** Esfuerzos de tracción en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #48 (SSM48) y suelo tamizado por la malla #48 con 1% de microfibras (SF1M48).

En este suelo más fino se observa consistencia entre las resistencias y los anchos de fisuras medidos en el mortero. En la Figura 5.11 se distingue que los anchos de fisura medidos en los emparedados de suelo tamizado por la malla #48 con 1% de microfibras (SF1M48), son menores que los desarrollados en los emparedados del mismo suelo sin aditivo.



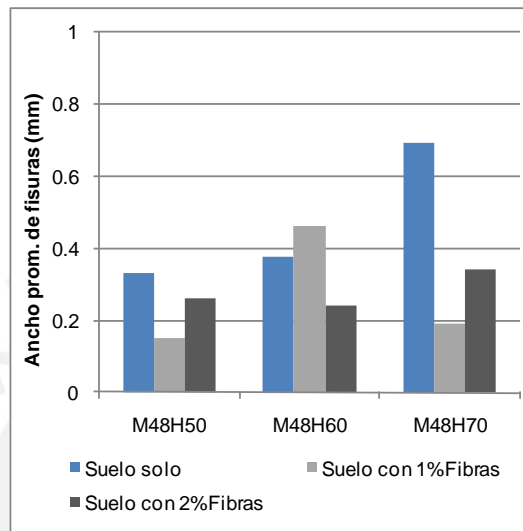
**Figura 5.11** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo y suelo con 1% de microfibras tamizado por la malla #48.

La Figura 5.12 muestra los resultados del ensayo de tracción indirecta de los grouts de suelo tamizado por la malla #48 con 2% de microfibras (SF2M48). Se observa que esta cantidad de aditivo también aumenta la resistencia a esfuerzos de tracción del suelo solo. El aumento de las resistencias promedio es de 34%, 5% y 108% en las mezclas con 50%, 60% y 70% de humedad nominal respectivamente. Este aumento llega a ser considerable y significativo en el grout más húmedo, mas no en los grout con humedades por debajo del 60%. A pesar que el 2% de microfibra logra aumentar la resistencia del suelo solo en las 2 mezclas menos húmeda, el aumento no es significativo. Además, la mezcla se hace más pastosa mientras mayor sea la cantidad de aditivo en el grout.



**Figura 5.12** Esfuerzos de tracción en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #48 (SSM48) y suelo tamizado por la malla #48 con 2% de microfibras (SF2M48).

En la Figura 5.13 se observa que los anchos de fisura medidos en los emparedados de SF2M48, son consistentes con las resistencias obtenidas. Es decir, las fisuras son más finas en los grouts con 2% de microfibras que en los grouts de suelo solo. Sin embargo, al comparar los anchos de fisuras de los grouts con 1% y 2% de microfibras se observa que a pesar que el porcentaje más alto de aditivo aumenta el ancho de fisura en el grout más húmedo, su resistencia no es menor sino mayor.

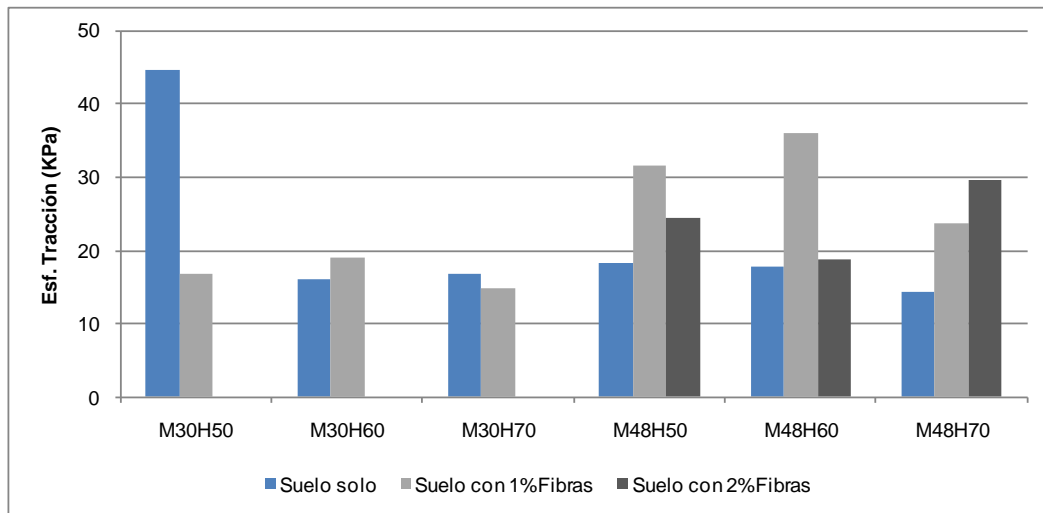


**Figura 5.13** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo, suelo con 1% y 2% de microfibras tamizado por la malla #48.

El estudio de 2% de microfibras se hizo solo en grouts de suelo tamizado por la malla #48 debido a que luego de realizar los primeros ensayos de tracción indirecta a emparedados con 1% de microfibras, se observó que el aditivo mejoraba únicamente la resistencia del suelo solo tamizado por la malla #48 (SSM48) y no al suelo solo tamizado por la malla #30 (SSM30).

La Figura 5.14 resume la comparación de los esfuerzos a tracción de los morteros con suelo tamizado por la malla #30 y #48 con y sin aditivo. Se observa que la adición de microfibras es útil en grouts de suelo fino pues mejora la formación del esqueleto estructural. Los ensayos revelaron que es posible duplicar la resistencia del mortero de SSM48 con la incorporación de 1% de microfibras en grouts con humedades entre el 50% y 60%. Además, en los grouts más diluidos con humedades cercanas al 70% la adición de 2% de microfibras mejora aún más la resistencia proporcionada con 1% del aditivo. En otras palabras la adición de 1% de microfibras es suficiente en grouts de suelo tamizado por la malla #48 con humedades hasta el 60%, para humedades mayores la adición de 2% de microfibras resulta ser más beneficioso en términos de resistencia.

Por otra parte, el uso de microfibras como aditivo en grouts de suelo tamizado por la malla #30 no es efectivo, pues tiene un efecto negativo en la resistencia del grout.



**Figura 5.14** Comparación de los esfuerzos promedio de tracción en emparedados con mortero de suelo solo y suelo con 1% y 2% de microfibras con distintas humedades.

### 5.3.2. Observaciones

La textura porosa y con surcos observada en los films de suelo con microfibras también fue observada en los morteros de los emparedados. Sin embargo, este cambio de la superficie no parece afectar de ningún modo a la resistencia o adherencia del grout.

### 5.3.3. Conclusiones

La adición de microfibras no es beneficiosa en grouts de suelo tamizado por la malla #30 ya que el esqueleto estructural está mejor constituido y la presencia de estas parece estorbar, en consecuencia la resistencia disminuye.

Por el contrario, en grouts de suelo tamizado por la malla #48 la adición de microfibras de papel mejora notablemente la resistencia. Su uso en grouts de suelo fino resulta ser efectiva en reducir el desarrollo de fisuras por contracción de secado. La proporción más eficiente resultó ser 1% respecto al peso del agua. Solo cuando los grout deban superar el 70% de humedad es posible utilizar 2% de microfibras para incrementar el valor de la resistencia a esfuerzos de tracción. La mejora de la resistencia se debe a que las microfibras consolidan y fortalecen el esqueleto estructural del suelo tamizado por la malla #30.

En el ensayo de agrietamiento en films se observó que las microfibras evitaron el desarrollo de fisuras en los grouts con suelo tamizado por ambas mallas, con ello se esperaba que la resistencia seca del grout mejorara con el uso de este aditivo. En el ensayo de tracción indirecta se confirmó que el mejoramiento de la resistencia se daba en los grouts de suelo más fino, pero no en los grouts de suelo tamizado por la malla #30. Además, la fisuración en los emparedados no fue nula como en los films. Por lo que los resultados del ensayo de agrietamiento en films y lo que se esperaba de las resistencias de ambos tipos grouts, solo fue certera con el suelo tamizado por la malla #48. Por tanto, la realización del ensayo de agrietamiento en films no es útil para tener una idea preliminar de la mejora de la resistencia a tracción que se puede esperar de un grout.



## CAPÍTULO 6

### Efecto de la adición de goma de tuna

El mucílago de la hoja de tuna es usado en la construcción tradicional de adobe como estabilizante en los enlucidos de barro de los muros, para disminuir la erosión provocada por las lluvias; es decir, cumple con una función impermeabilizante (Vargas et al. 1986). En este proyecto se intenta usar el mucílago o goma de tuna para ralentizar la velocidad de secado de los grouts de barro y, con ello, controlar la fisuración por contracción de secado. En consecuencia se mejoraría la resistencia del grout sin aditivo en la interfase mortero-adobe.

#### 6.1. Fabricación del aditivo

El extracto de las hojas de tuna fue preparado de acuerdo a lo descrito en un estudio realizado por Vargas y otros (1986). Las hojas de tuna fueron recolectadas del campus de la PUCP y limpiadas con una cuchilla para eliminar las espinas. Luego se cortaron las hojas en tiras de aproximadamente 30 mm de espesor y se pusieron a remojar en agua, como se observa en la Figura 6.1. La cantidad de agua medida en peso debía ser igual al de las hojas de tuna, sin embargo, se añadió un poco más de agua hasta cubrir las hojas.

El tiempo de remojo óptimo según el estudio de Vargas es entre 14 y 25 días, tiempo en el cual la pulpa se disuelve y las cáscaras quedan como material remanente. En esta investigación el tiempo de remojo fue de 17 días. Luego de este tiempo, el preparado fue tamizado con una malla metálica para eliminar las cáscaras y cualquier material sólido. Finalmente se obtuvo un líquido viscoso de consistencia gomosa, color verde y con fuerte olor a materia orgánica.



a) Hojas de tuna cortadas en tiras



b) Hojas de tuna remojadas en agua

**Figura 6.1** Remojo de las hojas de tuna para la obtención de la goma.

No se sabe con exactitud la composición de la goma de tuna, sin embargo, tras poner una muestra en el horno se determinó que el 99% de la sustancia es líquido. Con esta observación se decidió utilizar todo el extracto o goma de tuna como el líquido del grout, sin añadir agua. Es decir, que la cantidad de agua necesaria para conseguir la humedad nominal de la mezcla era en su totalidad la goma de tuna.

El porcentaje de aditivo definido como el 100% es respecto al agua requerida para alcanzar la humedad nominal del grout. Por ejemplo, si requiero obtener 60% de humedad para 1kg de suelo seco, se necesitará 600ml de goma de tuna.

## 6.2. Ensayo de agrietamiento en films

En el capítulo 4 se explicó que existe una relación entre el ancho de fisuras medido en los films y la resistencia medida con el ensayo de tracción indirecta en grouts de suelo solo tamizado por la malla #30. Con este suelo es posible utilizar el ensayo de agrietamiento en films para escoger dosificaciones de grout con aditivo que podrían mejorar la resistencia del suelo solo. Por consiguiente, se decidió estudiar la goma de tuna en films fabricados con suelo tamizado por la malla #30.

### 6.2.1. Resultados

La Tabla 6.1 muestra el efecto que tuvo la goma de tuna en la fisuración de los films de barro respecto a los grouts de suelo solo. Contiene el espesor medido del film, el número y ancho representativo de fisuras desarrolladas en los films.

**Tabla 6.1** Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con goma de tuna.

Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Tiempo de secado bajo vidrio (días)	Espesor prom. de Film (mm)	N° prom de Fisuras	Ancho prom. de Fisura (mm)
Goma de tuna	0	M30H50	57	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.60	0.0	0.00
		M30H60	64	1	0.70	4.5	0.10
				7	0.60	1.0	0.05
		M30H70	74	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.85	1.5	0.10
	100	M30H50	52	1	0.70	11.0	0.10
				7	0.60	0.0	0.00
		M30H60	66	1	0.70	4.0	0.10
				7	0.70	0.0	0.00
		M30H70	76	1	0.70	2.5	0.10
				7	0.70	0.0	0.00

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

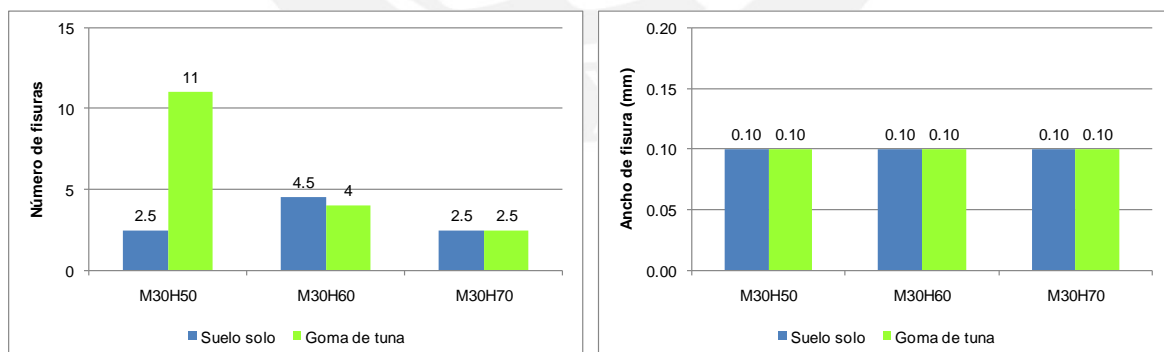
H: humedad nominal del grout.

Se distingue que el aditivo reduce la fisuración a cero cuando la velocidad de secado es controlado, es decir, cuando el secado es 7 días bajo vidrio. En cambio, cuando los films son destapados luego de 1 día de secado bajo vidrio el aditivo parece no tener efecto porque el ancho y número de fisuras son similares a los de los films de suelo solo. También se observa que las humedades iniciales alcanzadas con goma de tuna son muy similares a las humedades iniciales de los grouts de suelo solo. Estas a su vez son cercanas a las humedades nominales establecidas.

Para facilitar la interpretación de los gráficos elaborados en este capítulo, se siguió un patrón de colores que identifica a los grouts de suelo solo con la escala de azules y a los grouts con goma de tuna con la escala de verdes.

En la Figura 6.2 se han graficado los resultados de los films secados bajo vidrio durante 1 día. En ella se observa que el número de fisuras en las mezclas con goma de tuna es similar a las mezclas de suelo solo, excepto en la mezcla menos húmeda. La mezcla con goma de tuna con 50% de humedad nominal tiene cuatro veces más fisuras que la mezcla de suelo solo con la misma humedad, pero tiene el mismo ancho de fisura.

En general, la goma de tuna no aumenta el ancho de las fisuras en comparación con el grout de suelo solo, pero tampoco lo disminuye. Entonces, se evidencia que cuando la velocidad de secado no es controlada la goma de tuna no tiene efecto aparente en la fisuración del film.



**Figura 6.2** Comparación de resultados del agrietamiento en films de grouts de suelo solo y suelo con goma de tuna. Los resultados son de las muestras destapadas luego de 1 día. Izquierda: Número de fisura promedio. Derecha: Ancho de fisuras promedio.

Por otro lado, el espesor de los films no fue afectado como en el caso de las microfibras de papel. La adición de la goma de tuna no aumenta el espesor de los films, sino los mantiene. La diferencia entre el espesor promedio de todos los films de SSM30 (0.72

mm) y el de SBTM30 (0.68 mm) es solo de 5%. A simple vista la consistencia tampoco varió con la presencia de este aditivo.

### 6.2.2. Observaciones

- Los films fabricados con grouts de 60% y 70% de humedad nominal y secado durante 1 día bajo vidrio mostraron una superficie brillante y húmeda al momento de ser destapados. El brillo sugirió la presencia de agua o restos de goma de tuna en el film, lo que parecía indicar que la velocidad de secado iba a ser lenta. Sin embargo, la fisuración no disminuyó, fue igual que en los films de suelo solo. Solo se observó disminución en el desarrollo de fisuras en los films secados durante 7 días bajo vidrio.
- No se ha observado aparición de hongos ni cambios de coloración en la superficie de los films luego de un par de meses.

### 6.2.3. Conclusiones

No es del todo claro el efecto que tiene la goma de tuna en la fisuración del barro ya que no reduce el ancho de las fisuras en los films destapados luego de 1 día de secado, pero tampoco lo aumenta. En cambio, se ha visto que sí disminuye el ancho de las fisuras en los films destapados a los 7 días. Por tanto, el aditivo podría ser útil en mejorar la adherencia del grout siempre que se controle la velocidad de secado.

## 6.3. Ensayo de tracción indirecta

Debido a que la goma de tuna no empeoró la fisuración de los films respecto a los films de suelo solo, no se descartó aún el uso de este aditivo y se decidió verificar su efecto en la resistencia del grout a los esfuerzos de tracción con el ensayo de tracción indirecta. Además, se decidió que sería importante evaluar no solo los grouts con suelo tamizado por la malla #30 sino también con el tamizado por la malla #48.

Con el ensayo de tracción indirecta se espera aclarar la influencia de este aditivo en el comportamiento del grout y su capacidad de mejorar la resistencia del suelo solo.

### 6.3.1. Resultados

La Tabla 6.2 muestra el resumen de las resistencias promedio obtenidas en los grouts con goma de tuna y su comparación con las de suelo solo.

**Tabla 6.2** Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo solo y suelo con goma de tuna tamizado por las mallas #30 y #48

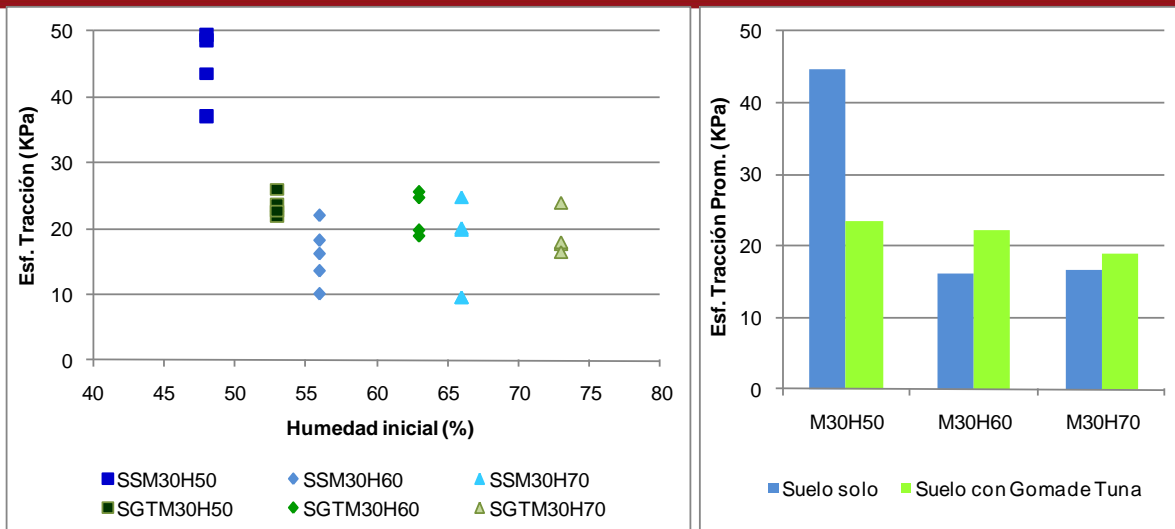
Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. Tracción Prom.	Coeficiente de variación (%)	Fisuración		Espesor de mortero (mm)
				kPa		N° prom. Fisuras	Ancho prom (mm)	
Goma de tuna	0	M30H50	48	44.7	12.7	7.5	0.13	1.50
		M30H60	56	16.0	28.5	9.8	0.26	1.95
		M30H70	66	16.7	41.3	30.0	0.10	1.27
		M48H50	50	18.3	11.3	25.3	0.33	2.22
		M48H60	59	17.8	18.7	20.8	0.38	1.95
		M48H70	77	14.2	20.7	32.8	0.70	1.46
	100	M30H50	53	23.49	7.5	29.8	0.40	2.30
		M30H60	63	22.24	15.4	34.3	0.69	1.75
		M30H70	73	19.01	11.4	19.8	0.33	2.02
		M48H50	52	21.51	30.3	34.0	0.58	1.76
		M48H60	62	18.57	14.0	37.8	0.45	2.15
		M48H70	73	21.95	17.3	31.0	0.79	2.33

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

H: humedad nominal del grout.

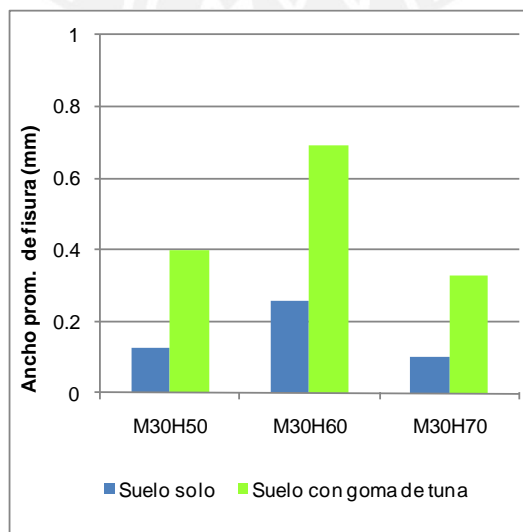
Se reconoce que la mayoría de coeficientes de variación señalados en la Tabla 6.2 son relativamente altos. Sin embargo, es de esperarse obtener dispersiones altas con este ensayo, pero a pesar de ello los resultados brindan una estimación satisfactoria de la resistencia en las juntas de barro. Las dispersiones más altas corresponden a los grouts SSM30H60, SSM30H70 y SGTM48H50. Casi todos los grouts con goma de tuna tienen menor coeficiente de variación que los grouts de suelo solo, ello quiere decir que los grouts con aditivo tienen resultados más precisos para estimar la resistencia.

Las resistencias a los esfuerzos de tracción de los grouts de suelo tamizado por la malla #30 son mostradas en la Figura 6.3. Se observa que en el grout menos húmedo el aditivo reduce la resistencia promedio en 47%, mientras que en los grouts con 60% y 70% de humedad la resistencia promedio se incrementa en 39% y 14% en relación a los grouts de suelo solo, respectivamente. Entonces, para este tipo de suelos la goma de tuna es relativamente favorable cuando se utiliza humedades superiores al 60%.



**Figura 6.3** Esfuerzos de tracción en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #30 (SSM30) y suelo tamizado por la malla #30 con goma de tuna (SBTM30).

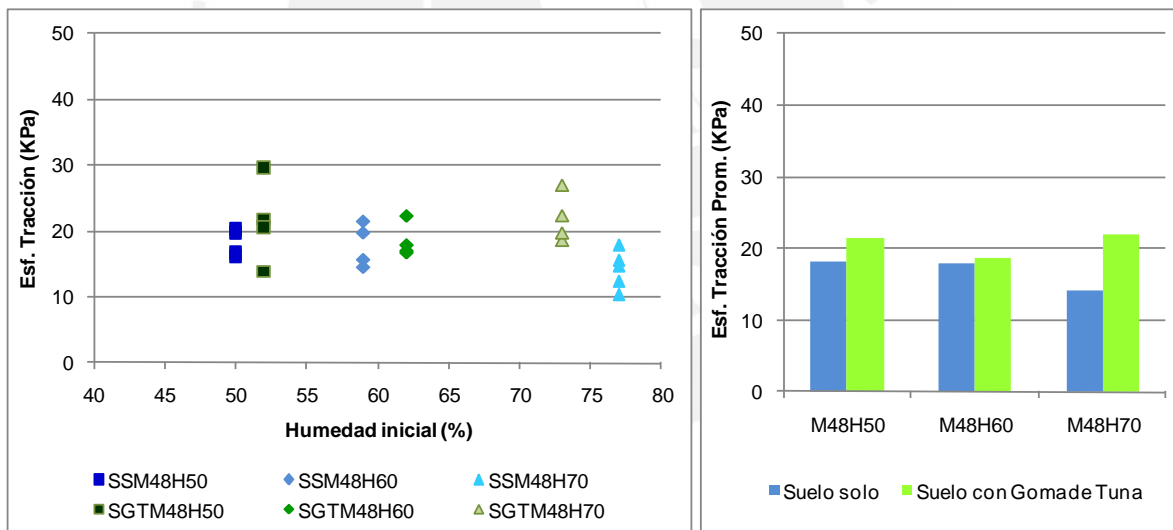
También se observa que a medida que la humedad aumenta la resistencia del grout con y sin aditivo disminuye. Esto es coherente con el concepto de que a mayor humedad mayor es el ancho de las fisuras, por tanto la resistencia tiende a disminuir. Sin embargo, en la Figura 6.4 se observa que las fisuras no se hacen más anchas mientras más húmedo es el grout. De acuerdo a las mediciones hechas a los emparedados, las fisuras son más anchas en los grouts con aditivo que en los de suelo solo. Con este aditivo no se está dando la relación inversa entre el ancho de fisura y la resistencia del grout; pues a pesar que la goma de tuna aumenta el ancho de las fisuras también aumenta ligeramente la resistencia lo cual es contradictorio.



**Figura 6.4** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo y suelo con goma de tuna tamizado por la malla #30.

En los films se observó que la goma de tuna no aumentó el ancho de las fisuras respecto a los films de suelo solo destapados luego de 1 día de secado. Luego, en los films destapados a los 7 días, la goma de tuna redujo la fisuración respecto a los films de suelo solo. Sin embargo, en los emparedados sucedió lo contrario, la goma de tuna aumentó el ancho de fisura. A pesar de ello, la resistencia del suelo solo mejoró pero hubo contradicción en la reducción del ancho de grieta que se esperaba obtener. Por tanto, el ensayo de agrietamiento en films no fue del todo certero.

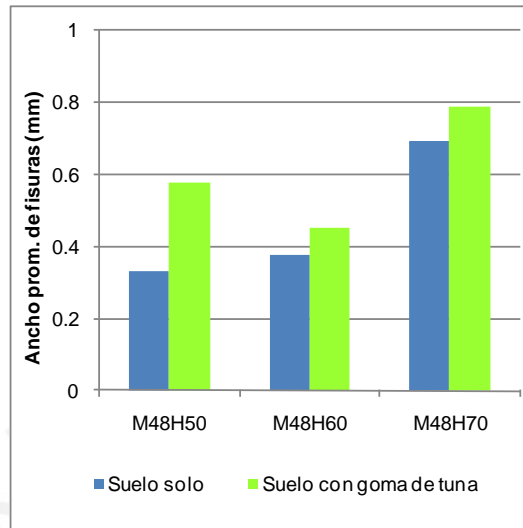
En el caso de los grouts de suelo tamizado por la malla #48 se observó que las resistencias de los morteros de suelo sin aditivo aumentaron en 18%, 4% y 54% en los grouts con humedades nominales de 50%, 60% y 70%, respectivamente. Las resistencias de cada grout son mostradas en la Figura 6.5. Se distingue que la utilización de goma de tuna en los grouts de suelo fino mejora significativamente la resistencia del grout sin aditivo cuando se utiliza la humedad más alta. Entonces, la mejora se atribuye a cantidades elevadas del aditivo en el grout pues mientras mayor sea la humedad mayor será la cantidad de goma de tuna en el grout.



**Figura 6.5** Esfuerzos de tracción en emparedados con mortero de suelo solo tamizado por la malla #48 (SSM48) y suelo tamizado por la malla #48 con goma de tuna (SGTM48).

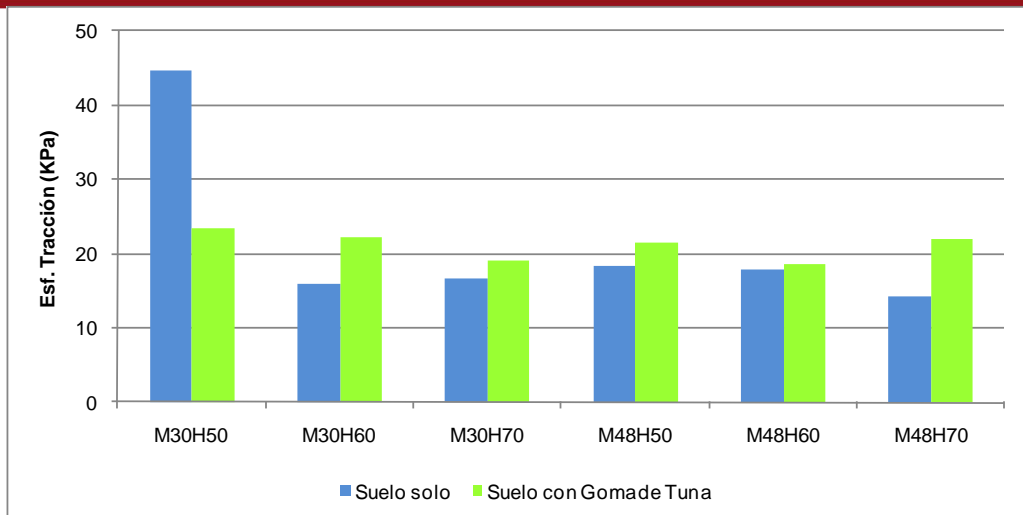
En la Figura 6.6 se comparan los anchos de fisuras de los morteros de suelo solo y suelo con goma de tuna tamizado por la malla #48, se observa que no ocurre la relación inversa entre el ancho de fisura y resistencia del mortero. Es decir, que a pesar que la goma de tuna aumenta la resistencia del grout de suelo sin aditivo, el ancho de la fisura no disminuye sino aumenta. Es posible, entonces, que la goma de tuna no influya en la ralentización de la velocidad de secado del grout, sino que las propiedades del aditivo

afecten de manera diferente a la resistencia seca. Por tanto, es necesario investigar los componentes de la goma de tuna para comprender y definir su efecto en la resistencia seca del grout.



**Figura 6.6** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo y suelo con goma de tuna tamizado por la malla #48.

La Figura 6.7 resume la comparación de los esfuerzos a tracción de los morteros con suelo tamizado por las mallas #30 y #48 con y sin aditivo. Se ve que la incorporación de goma de tuna genera buenos resultados en el grout de suelo tamizado por la malla #30 con una humedad cercana al 60% (39% de incremento de resistencia), y en el grout de suelo tamizado por la malla #48 con una humedad cercana al 70% (54% de incremento de resistencia). Sin embargo, en los suelos tamizados por la malla #30 no se puede establecer un contenido óptimo del aditivo respecto al peso seco del suelo (% humedad), pues no se observa una tendencia clara de la resistencia con el aumento de humedad. Por otra parte, en los suelos tamizados por la malla #48 se reconoce que el aditivo es más eficiente con la humedad más alta.



**Figura 6.7** Comparación de los esfuerzos promedio de tracción en emparedados con mortero de suelo solo y suelo con goma de tuna con distintas humedades.

### 6.3.2. Observaciones

No hubo aparición de hongos ni cambio en la coloración del barro, solo se detectó el olor característico de materia orgánica durante la fabricación de los emparedados.

### 6.3.3. Conclusiones

En la mayoría de las mezclas, la goma de tuna no mejora significativamente la resistencia del grout de barro en la interfase mortero-adobe. En los grouts de suelo tamizado por la malla #30 la goma de tuna incrementa la resistencia promedio en 39% cuando la humedad está alrededor del 60%. Sin embargo, esta no se puede definir como humedad óptima pues la mejora no es significativa y no justifica el trabajo de obtención del aditivo. Por tanto, la goma de tuna no es eficiente para mejorar la adherencia del grout de suelo tamizado por la malla #30.

En los grouts de suelo tamizado por la malla #48 sí se comprueba que la goma de tuna mejora significativa la adherencia del grout con humedades cercanas al 70%. De modo que mientras mayor sea el contenido de goma de tuna en la mezcla, mayor será el aporte a la resistencia seca del grout. Sin embargo, será conveniente realizar ensayos de tracción indirecta a emparedados con el mismo suelo y humedades mayores al 70% para determinar el rango de humedades óptimo.

A pesar de que la goma de tuna es eficiente en grouts de suelo tamizado por la malla #48 y 70% de humedad, no es claro si la mejora es atribuible al retardo de la velocidad de secado del grout. Esto último es cuestionable debido a que el aumento del ancho de las

fisuras en el mortero con aditivo de los emparedados es contradictorio con la mejora de la resistencia. Por tanto, es necesario estudiar los componentes de la goma de tuna para esclarecer el efecto de este aditivo en el grout y la razón del incremento de la resistencia a los esfuerzos de tracción del mortero.

El ensayo de agrietamiento en films no tuvo resultados claros respecto al mejoramiento de la resistencia a tracción que se podría esperar con la adición de la goma de tuna. Si bien la resistencia mejoró con la presencia del aditivo, no fue un acierto del ensayo de agrietamiento en films, por lo que este no es útil para establecer una idea preliminar sobre el efecto del aditivo en la resistencia.



# CAPÍTULO 7

## Efecto de la adición de clara de huevo

Antiguamente, la clara de huevo ha sido utilizada como aditivo en morteros cuyo principal componente fue la cal. A la albúmina, proteína presente en la clara, se le atribuyó la propiedad de ser consolidante o aglomerante en el mortero. Además, ha sido usada como aglutinante en pinturas al temple (García A. 2007). Por ejemplo, en nuestro país se usó el huevo de aves guaneras para fabricar el calicanto usado en la construcción de la fortaleza del Real Felipe en el Callao. Debido al uso que se dio a este aditivo para mejorar las propiedades mecánicas del mortero, se estudió en este proyecto la factibilidad de mejorar la adherencia del grout de barro mediante la ralentización de la velocidad de secado con la adición de la clara de huevo.

### 7.1. Fabricación del aditivo

En este trabajo se utilizó huevo de gallina. Primero, se perforó cuidadosamente los dos extremos del huevo para facilitar la extracción de la clara y se vertió en un depósito limpio. Luego, en una probeta de vidrio se midió la cantidad de clara a usar y por separado la cantidad de agua necesaria para obtener la humedad nominal del grout. Por último, se disolvió la clara en el agua teniendo cuidado de no batir para evitar la formación de espuma y burbujas en la mezcla de barro. El líquido resultante fue utilizado en la elaboración del grout.

Los porcentajes de clara utilizados en las diferentes dosificaciones de grout han sido determinados por relación al volumen de agua usada en la mezcla. Por ejemplo, para el grout SCH2M30H50 se pesó 400 gr de suelo seco, se midió 200 ml de agua para obtener 50% de humedad y se midió 4 ml de clara de huevo que representa el 2% respecto al volumen de agua en la mezcla.

### 7.2. Ensayo de agrietamiento en films

La clara de huevo fue estudiada en films de suelo tamizado por la malla #30. Debido al tiempo, cantidad de mezclas y de vidrios disponibles se decidió utilizar solo la humedad nominal de 50%.

### 7.2.1. Resultados

La Tabla 7.1 muestra los resultados del ensayo de observación en films de grouts de suelo solo y con clara de huevo.

**Tabla 7.1** Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con clara de huevo

Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Tiempo de secado bajo vidrio (días)	Espesor prom. de Film (mm)	N° prom de Fisuras	Ancho prom. de Fisura (mm)
Clara de huevo	0	M30H50	57	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.60	0.0	0.00
	2	M30H50	53	1	0.70	9.5	0.10
				7	0.65	0.0	0.00
	5	M30H50	53	1	0.60	14.0	0.10
				7	0.65	0.0	0.00
	8	M30H50	62	1	0.65	12.5	0.10
				7	0.60	1.0	0.05
	10	M30H50	55	1	0.60	15.0	0.15
				7	0.65	8.0	0.10
	15	M30H50	56	1	0.65	12.0	0.10
				7	0.60	6.5	0.10
	20	M30H50	61	1	0.70	12.5	0.10
				7	0.60	Destruído	Destruído

*M: número de malla con que se tamizó el suelo.*

*H: humedad nominal del grout.*

De acuerdo a los resultados de los films destapados a los 7 días mostrados en la Tabla 7.1, se distingue que pequeñas cantidades de clara de huevo (2% y 5%) no parece afectar la contracción por secado, ya que el número de fisuras es cero, igual que en los films de suelo solo. Sin embargo, la adición de clara de huevo mayor al 5% sí afecta de manera negativa pues aumenta el número de fisuras aunque el ancho de fisura no supera los 0.10 mm. Entonces, con esta primera comparación se percibe que es mejor utilizar porcentajes pequeños de este aditivo.

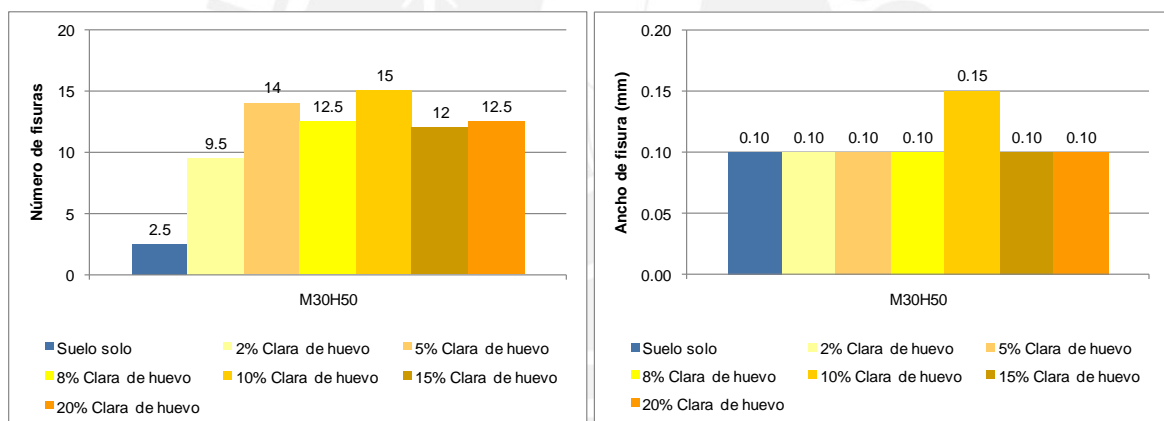
Al observar los resultados de los films destapados luego de 1 día, se reconoce que el número de fisuras es mayor que en los films destapados a los 7 días y que el ancho de las fisuras de todos los films es igual a 0.10 mm. Es claro que dicha diferencia se debe a las condiciones de secado de los films.

También se observa que la mayoría de los porcentajes de humedad inicial son cercanos a la humedad nominal, aunque, con el aumento de la cantidad de clara de huevo en el grout se distingue un ligero aumento de la humedad. Con 20% de clara de huevo la

humedad inicial salió del rango alcanzando 61%. Esto se debe a que la clara tiene agua dentro de su composición (IEH 2010) por lo que porcentajes elevados de este aditivo incrementa la cantidad total de agua en la mezcla y modifica la humedad estimada.

Al igual que en los capítulos anteriores, se utilizó en los gráficos un patrón de colores para facilitar su interpretación. Los grouts de suelo solo se identificaron con la escala de azules y los grouts con clara de huevo con la escala de amarillos.

Los resultados de los films secados bajo vidrio durante 24 horas se muestran en la Figura 7.1. Se observa que todas las dosificaciones con clara de huevo aumentan en cuatro veces o más el número de fisuras en comparación con los films de suelo solo. Sin embargo, el ancho de fisura es similar al desarrollado en los films de suelo solo. Entonces, la capacidad aglutinante de la clara no ha sido efectiva en disminuir la formación de fisuras por contracción de secado en los grouts de suelo tamizado por la malla #30.



**Figura 7.1** Comparación de resultados de agrietamiento en films de grouts de suelo solo y suelo con clara de huevo. Los resultados son de las muestras destapadas luego de 1 día de secado. Izquierda: Número de fisura promedio. Derecha: Ancho de fisuras promedio.

A pesar de lo que se ha obtenido en los films secados bajo vidrio durante 1 día, se consideró los resultados de los films con mayor tiempo de secado. De modo que antes de descartar la clara de huevo como aditivo se decidió evaluar su influencia en la adherencia del grout con el ensayo de tracción indirecta. Se escogió analizar 5% de clara de huevo en el grout, ya que es la mayor cantidad de aditivo que no desarrolla fisuras en los films destapados a los 7 días. Los grouts fueron fabricados con suelo tamizado por ambas mallas (#30 y #48) y 50% de humedad nominal.

### 7.2.2. Observaciones

- La presencia de la clara de huevo en la mezcla no generó cambios en la consistencia de la mezcla en comparación con la mezcla de suelo solo. Solo hubo un cambio de olor y sensación de pegajosidad en las manos luego de amasar el barro. Esto último evidencia la capacidad cohesiva que se le atribuyó en el pasado a la clara de huevo.
- Los films destapados luego de 7 días de secado bajo vidrio y fabricados con el mayor porcentaje de aditivo (20%) se destruyeron. En la Figura 7.2 se observa que el suelo quedó adherido al papel celofán y al retirarlo el film se quebró. Esto revela la adhesión y al mismo tiempo el debilitamiento en el film de barro que confiere el alto contenido de clara en el grout.



**Figura 7.2** Film de suelo tamizado por la malla #30, 20% de clara de huevo y 50% de humedad nominal. Muestra destruida al ser destapada luego de 7 días de secado.

### 7.2.3. Conclusiones

Luego de observar y comparar el agrietamiento en films de suelo con clara de huevo se aprendió que porcentajes altos del aditivo parecen debilitar al suelo, pues además de elevar el número de fisuras facilita el rompimiento del film seco. Sin embargo, la adición de clara de huevo no aumenta el ancho de las fisuras. Parece ser que la capacidad aglutinante de la clara no es efectiva con partículas de arcilla como lo fue con partículas de cal (calicanto) según su uso en el pasado.

Además, cuando se mejoran las condiciones de secado y se usa pequeñas cantidades de clara de huevo, los films no se fisuran al igual que los films de suelo solo. Por tanto, la utilización de este aditivo en pequeñas proporciones podría mejorar la adherencia del grout de suelo solo.

### 7.3. Ensayo de tracción indirecta

Cuando se usó cantidades pequeñas de clara de huevo, la fisuración de los films no empeoró. Es por eso que se decidió evaluar con el ensayo de tracción indirecta la adición de 5% de clara de huevo al grout. Este porcentaje se escogió debido a que fue la mayor cantidad de clara que no generó fisuras en los films destapados a los 7 días. Se utilizó grouts de suelo tamizado por las mallas #30 y #48 y con 50% de humedad nominal.

#### 7.3.1. Resultados

La Tabla 7.2 muestra los resultados obtenidos en los emparedados preparados con grouts de suelo solo y con 5% de clara de huevo.

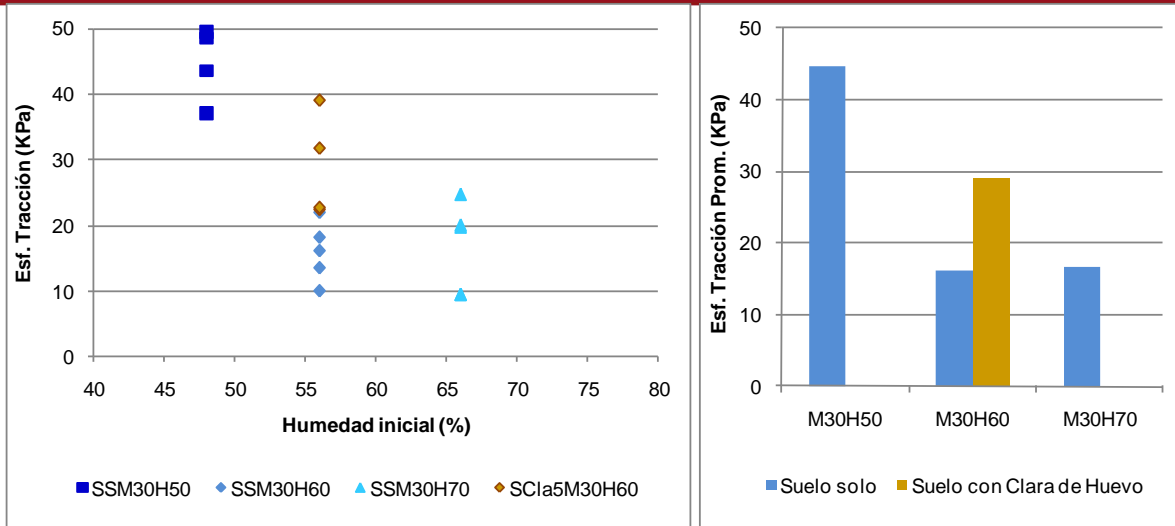
**Tabla 7.2** Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo solo y suelo con 5% de clara de huevo tamizado por las mallas #30 y #48.

Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. Tracción Prom.	Coeficiente de variación (%)	Fisuración		Espesor de mortero (mm)
				kPa		N° prom. Fisuras	Ancho prom (mm)	
Clara de huevo	0	M30H50	48	44.7	12.7	7.5	0.13	1.50
		M30H60	56	16.0	28.5	9.8	0.26	1.95
		M48H50	50	18.3	11.3	25.3	0.33	2.22
		M48H60	59	17.8	18.7	20.8	0.38	1.95
	5	M30H50	56	29.0	27.7	22.5	0.58	2.10
		M48H50	55	21.7	30.6	29.3	0.47	1.90

*M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.*

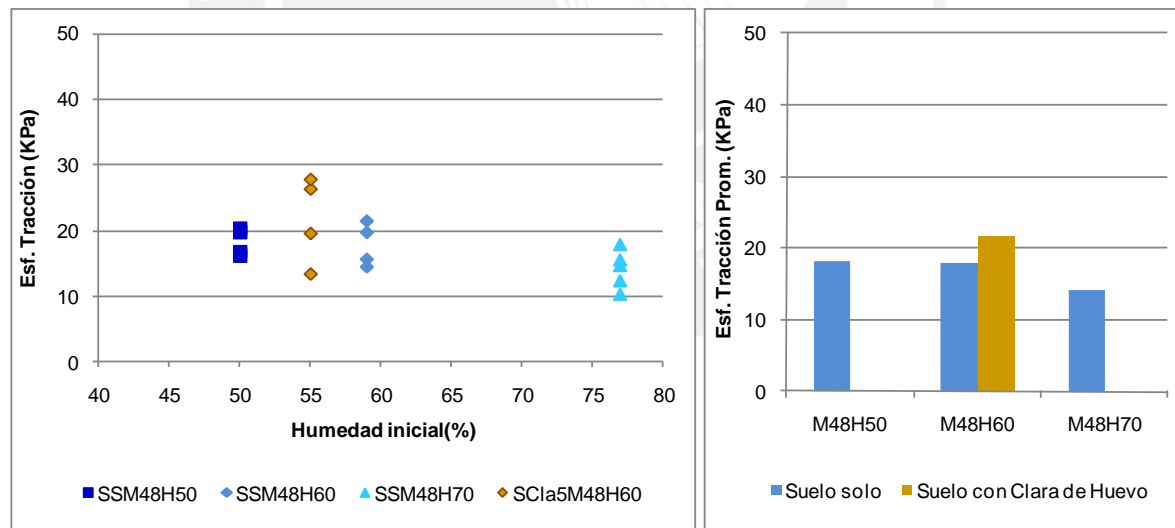
Se observa que la humedad inicial de los grouts con aditivo se asemeja más a la humedad inicial de los grouts de suelo sin aditivo con 60% de humedad nominal. Por tanto, se consideró que la humedad de nominal de los grouts con clara de huevo fuera 60% y ya no 50% como se había previsto en un inicio. En consecuencia, la comparación de las resistencias se hizo con los grouts de suelo solo con 60% de humedad nominal.

En la Figura 7.3, se observa que la adición de la clara de huevo logra incrementar la resistencia seca del grout de suelo sin aditivo con 60% de humedad nominal. De acuerdo a los promedios de esfuerzo máximo, el incremento es 80%. Parece ser que las características cohesivas de la albumina de la clara consolidan el esqueleto estructural del suelo envolviendo sus partículas e incrementando su resistencia.



**Figura 7.3** Esfuerzos de tracción en emparedados de suelo solo tamizado por la malla #30 (SSM30) y suelo tamizado por la malla #30 con 5% de clara de huevo (SCla5M30).

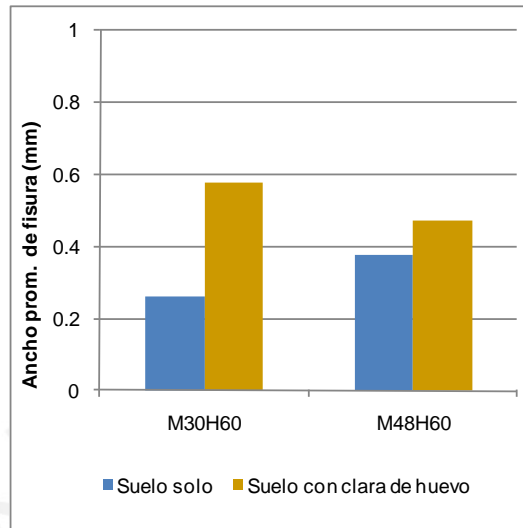
En la Figura 7.4, se aprecia que el aumento de la resistencia conseguida con la adición de clara de huevo a grouts de suelo tamizado por la malla #48 con 60% de humedad nominal no es significativo, es solo 21%. En grouts de suelo fino el aporte aglomerante del huevo no es suficiente para mejorar la resistencia seca del grout de suelo solo.



**Figura 7.4** Esfuerzos de tracción en emparedados de suelo solo tamizado por la malla #48 (SSM48) y suelo tamizado por la malla #48 con 5% de clara de huevo (SCla5M48).

El incremento de resistencia visto en ambos grouts no es coherente con el ancho de fisura medido en el mortero de los emparedados. En la Figura 7.5 se observa que la clara de huevo en el grout más grueso (Malla #30) aumenta el ancho de fisura al doble en comparación con el grout de suelo solo. Con la adición de este aditivo no se está

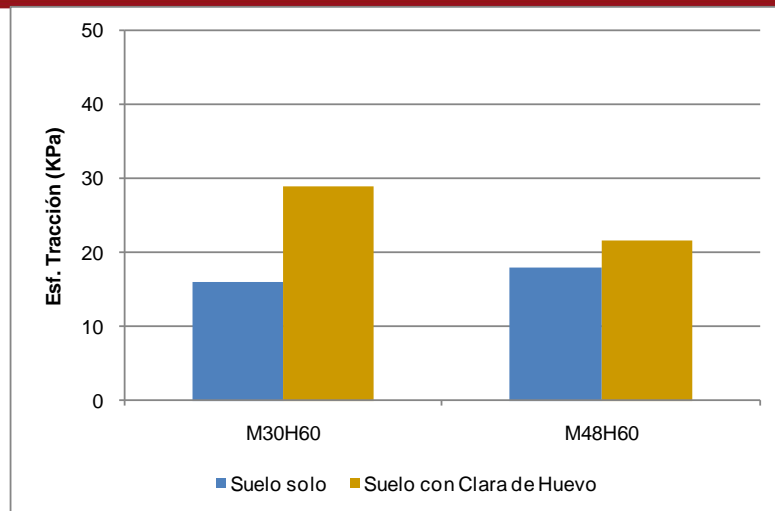
cumpliendo la relación inversa entre resistencia y ancho de fisura en el mortero del emparedado. Por tanto, no es claro si la mejora de la resistencia se deba a la ralentización de la velocidad de secado del grout.



**Figura 7.5** Ancho promedio de fisuras en emparedados de suelo solo y suelo con clara de huevo tamizado por las mallas #30 y #48.

En los films se observó que la clara de huevo no empeoró la fisuración de los films de suelo solo, la mantuvo en cero. Sin embargo, en los emparedados se observó que, por el contrario, la clara de huevo aumentó el ancho y el número de fisuras. A pesar de ello, la resistencia del suelo solo mejoró pero hubo contradicción en la reducción del ancho de fisura que se esperaba obtener. Por tanto, el ensayo de agrietamiento en films no fue del todo certero.

De acuerdo al Instituto de Estudios del Huevo de España, la clara permite unir diferentes componentes gracias a su capacidad de formar geles que engloban cualquier sustancia añadida (IEH 2010). Entonces, es su capacidad aglutinante la que consolida el esqueleto estructural del suelo haciéndolo más resistente como en el caso del grout de suelo tamizado por la malla #30. Cuando la estructura del suelo es debilitada por el tamizado, la acción consolidante de la clara no tiene mayor efecto, por eso el incremento de la resistencia a tracción del mortero es pequeño en el grout de suelo tamizado por la malla #48. Pese a que los resultados de grout de suelo tamizado con malla #30 con clara de huevo parecen prometedores, los directores del proyecto de investigación decidieron parar el estudio de este aditivo y dejarlo para una siguiente etapa de investigación. La Figura 7.6 resume la comparación de los esfuerzos a tracción de los morteros con suelo solo tamizado por las mallas #30 y #48 y suelo con clara de huevo.



**Figura 7.6** Comparación de los esfuerzos promedio de tracción en emparedados con mortero de suelo solo y suelo con 5% de clara de huevo con 60% de humedad nominal.

La clara de huevo tiene la propiedad de ser anticristalizante, lo que es aprovechado en la repostería porque evita la cristalización del azúcar (IEH 2010). Posiblemente la clara también pueda evitar la cristalización de las sales presentes en el suelo. De ser cierto, sería provechosa la utilización de este aditivo para poder aplicar el método de inyección de barro líquido en la reparación de muros de tierra que tengan problemas de sales. Es decir, que al inyectar agua y barro con clara de huevo dentro de una fisura, las sales del muro no se activarían y se evitaría problemas de deterioro.

### 7.3.2. Conclusiones

Se aprendió que la adición de la clara de huevo es eficiente en grouts de suelo tamizado por la malla #30, mientras que en los grouts de suelo tamizado por la malla #48 el efecto de la clara no es significativo. Sin embargo, la ralentización de la velocidad de secado no ha sido la razón de la mejora de la resistencia seca, ya que el ancho de fisura resultó ser mayor con la adición de clara de huevo. Por tanto, se necesita seguir investigando y determinar el efecto de este aditivo en la resistencia seca del grout.

Bajo el fundamento de la capacidad aglutinante de la clara de huevo se afirma que el aumento de la resistencia se debe a la consolidación del esqueleto estructural del suelo. Sin embargo, es necesario ampliar el rango de humedades de los grouts y realizar el ensayo de tracción indirecta en emparedados para confirmar el incremento de la adherencia del grout con la adición de clara de huevo.

En el ensayo de agrietamiento en films, la adición de clara de huevo disminuyó el ancho de fisura respecto al film de suelo solo secado durante 7 días, por lo que se esperaba que este aditivo pudiera mejorar la resistencia seca del grout. En el ensayo de tracción indirecta se observó que efectivamente la clara de huevo aumentó la resistencia del grout, sin embargo, también aumentó el ancho de fisura en el mortero del emparedado. Esta contradicción hace pensar que el ensayo de agrietamiento en films no fue del todo certero para predecir el efecto y eficiencia del aditivo.



# CAPÍTULO 8

## Efecto de la adición de vaselina

Históricamente el hombre ha ido desarrollando y mejorando las propiedades de los morteros con la adición de aditivos naturales. Se tiene conocimiento que las ceras, cebo animal y aceites naturales, entre otros, eran usados para aportar cierta capacidad “hidrorrepelente” al mortero (García A. 2007). En este trabajo se ha estudiado el uso de la vaselina líquida USP para disminuir la velocidad de secado en los grouts de barro. Esta vaselina es un aceite mineral que tiene propiedades lubricantes y de plasticidad, y es usado en la industria farmacéutica.

### 8.1. Fabricación del aditivo

La cantidad de vaselina a utilizar fue medida respecto al volumen de agua. Primero, se midió el volumen de agua necesario dependiendo de la humedad nominal que se quiere alcanzar. Luego, con el porcentaje de aditivo a usar se determinó la cantidad de vaselina necesaria y se midió en una probeta de vidrio. Finalmente, ambos líquidos fueron vertidos en un recipiente para mezclarlos. El líquido resultante fue utilizado en la elaboración del grout.

### 8.2. Ensayo de agrietamiento en films

Para observar la fisuración de grouts con este aditivo se utilizó suelo tamizado por la malla #30 y 50% de humedad nominal. Por experiencia con el uso de los aditivos anteriores, se decidió utilizar porcentajes pequeños de vaselina. Por tal motivo, se consideró utilizar 2% y 5% de vaselina respecto al volumen de agua agregado al grout.

#### 8.2.1. Resultados

La Tabla 8.1 presenta los resultados obtenidos en la observación del proceso de fisuración de los films de barro con vaselina, comparados con los obtenidos en films de suelo solo.

**Tabla 8.1** Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con vaselina.

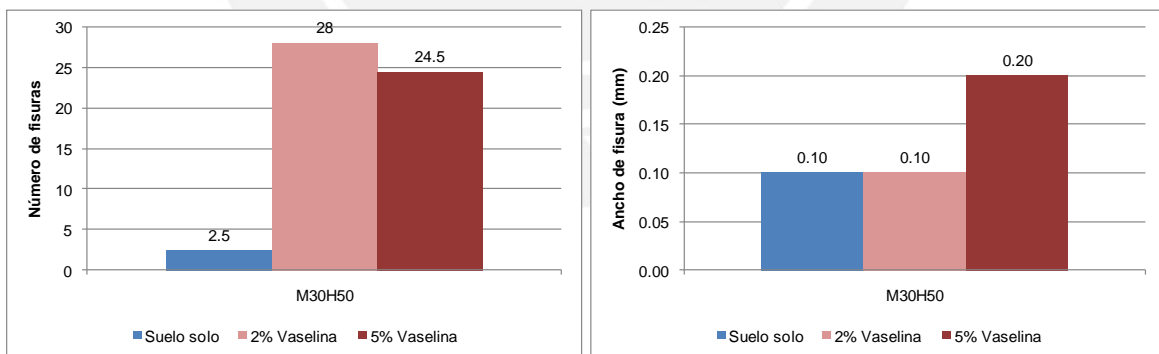
Aditivo	Cantidad de Aditivo (%)	Mezcla	Contenido de Humedad inicial (%)	Tiempo de secado bajo vidrio	Espesor prom. de Film (mm)	N° prom de Fisuras	Ancho prom. de Fisura (mm)
Vaselina	0	M30H50	57	1	0.80	2.5	0.10
				7	0.60	0.0	0.00
	2	M30H50	53	1	0.60	28.0	0.10
				7	0.65	11.5	0.10
	5	M30H50	49	1	0.65	24.5	0.20
				7	0.65	12.5	0.45

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

H: humedad nominal del grout.

Se distingue claramente que la adición de vaselina en el grout aumenta tanto el ancho como el número de fisuras en los films, independientemente de las condiciones de secado. Cuando el secado es de 7 días bajo vidrio, el ancho promedio de la fisura en los films con 5% de vaselina es cuatro veces mayor que en los films de suelo solo.

La Figura 8.4 muestra los resultados obtenidos en los films secados durante 1 día bajo vidrio, se observa que hay un aumento considerable del número de fisuras en comparación con los films de suelo solo. El ancho de fisura en la mezcla con 2% de vaselina es igual que en la mezcla de suelo solo. Sin embargo, el ancho de fisura en el film con 5% de vaselina duplica el ancho de la fisura desarrollado en el film de suelo solo.



**Figura 8.4** Comparación de resultados de agrietamiento en films de grouts de suelo solo y suelo con 2% y 5% de vaselina. Los resultados son de las muestras destapadas luego de 1 día de secado. Izquierda: Número de fisura promedio. Derecha: Ancho de fisuras promedio.

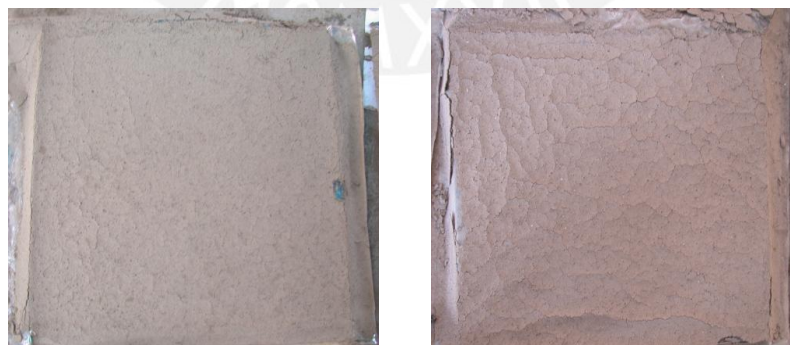
Por tanto, de acuerdo a lo expresado anteriormente, la adición de vaselina no mejora las condiciones de secado del barro. Dado el incremento del ancho de fisuras exhibido en los films no es posible afirmar que la vaselina ayuda a disminuir la velocidad de secado

### 8.2.2. Observaciones

- En el grout con 2% de vaselina se observó manchas de grasa en la superficie del agua. Mientras que en el grout con 5% de aditivo se observó una ligera separación entre la vaselina y el agua de la mezcla; es decir, parte de la vaselina quedó en la superficie.
- Se percibió que mientras el grout estuvo en reposo entre los vidrios, la vaselina segregó de la mezcla y fue a la superficie. Ello se vio al momento de destapar los films secados bajo vidrio durante 1 día, en los que el celofán superior quedó fuertemente adherido al film lo que hizo difícil su retiro. De modo que para destapar por completo el film fue necesario voltearlo y retirar el celofán inferior donde el grout no se adhirió, dejando la cara inferior expuesta al ambiente.
- Los films con el mayor porcentaje de vaselina en el grout (5%) presentaron manchas oscuras que se hicieron menos notorias al secarse la muestra (Figura 8.6).

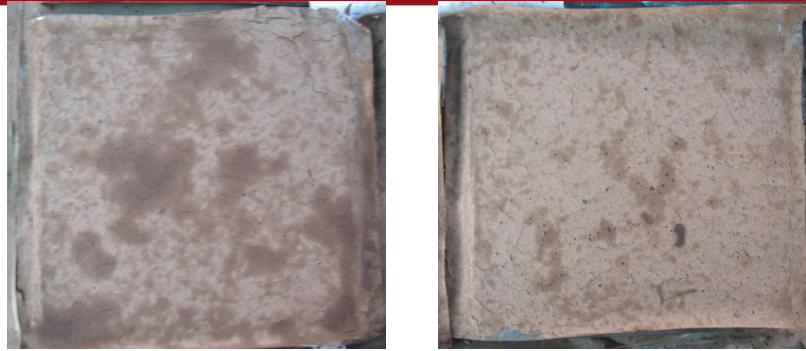


a) Films de suelo solo



b) Films de suelo con 2% de vaselina

**Figura 8.5** Films de suelo tamizado por la malla #30 con 50% de humedad nominal. Muestras destapadas luego de 1 día de secado bajo vidrio.



a) Films de suelo con 5% de vaselina (muestras húmedas)



a) Films de suelo con 5% de vaselina (muestras secas)

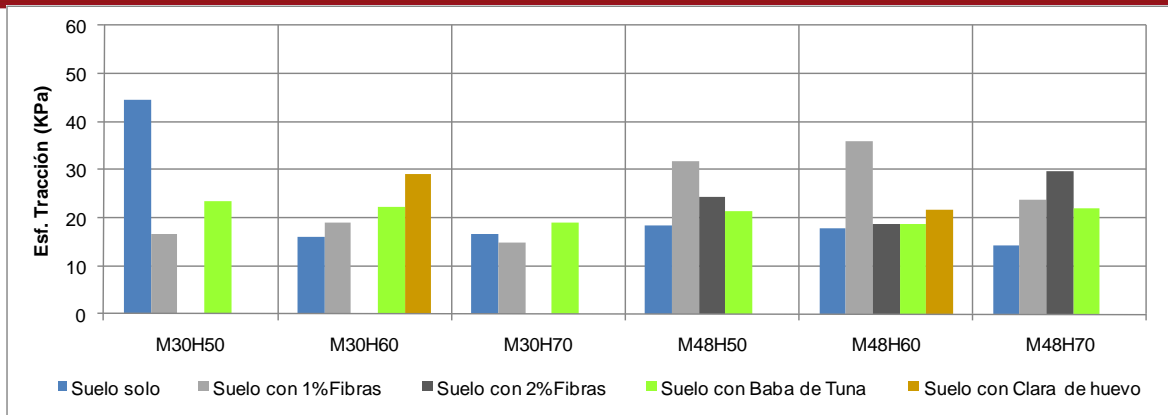
**Figura 8.6** Films de suelo tamizado por la malla #30 con 50% de humedad nominal. Muestras destapadas luego de 1 día de secado bajo vidrio.

### 8.2.3. Conclusiones

No es conveniente usar la vaselina como aditivo, pues en vez de minimizar el número y ancho de fisuras en comparación con los films de suelo solo, las aumenta. Por tanto, no es capaz de ralentizar la velocidad de secado del grout. Debido a la naturaleza aceitosa de la vaselina, ésta evita que las mezclas sean totalmente homogéneas pues a medida que la mezcla está en reposo parte de la vaselina se va hacia la superficie. Además, una cantidad excesiva de este aditivo deja manchas en las mezclas de grout secas. Por tal motivo la vaselina fue descartada como aditivo para ser usada en grouts para la reparación de muros históricos de adobe.

### 8.3. Resultados generales de los aditivos estudiados

La Figura 8.7 muestra la comparación realizada a los esfuerzos de tracción en la interfase mortero-adobe que se obtuvieron con los diferentes grouts estudiados, con el fin de resaltar el aditivo más eficiente en mejorar la resistencia seca del suelo solo.



**Figura 8.7** Comparación de los esfuerzo promedio de tracción en emparedados de adobe con morteros de suelo tamizado por las mallas #30 y #48.

Se observa que en los grouts de suelo tamizado por la malla #30, el aditivo que logró la mayor mejora en la resistencia del mortero fue la clara de huevo. El resultado inicial de este aditivo es prometedor, por lo que resulta de gran importancia continuar con el estudio de su influencia en la resistencia de morteros con mayores humedades.

En el caso de los grouts de suelo tamizado por la malla #48, el aditivo con mayor eficiencia en aumentar la resistencia seca del grout fueron las microfibras de papel en 1% respecto al contenido de agua en la mezcla. En este suelo fino, resultó ser importante completar los espacios vacíos que deja la eliminación de partículas de arena debido al tamizado.

# CAPÍTULO 9

## Conclusiones y recomendaciones

### 9.1. Conclusiones

La reparación de las fisuras de un muro de adobe mediante la inyección de grouts de barro es utilizado para devolverle al muro sus propiedades iniciales y disminuir la posibilidad de colapso frente a un sismo. Para reparar fisuras finas con espesores menores a los 3 mm se estudiaron grouts de suelo tamizado por las mallas #30 y #48 que contienen arena, cuyo tamaño máximo de partícula es 0.60 mm y 0.32 mm respectivamente.

Las conclusiones del estudio realizado han sido ordenadas de acuerdo al tipo de suelo utilizado en la fabricación del grout

#### Suelo tamizado por la malla #30

- El ensayo de agrietamiento en films con este suelo tuvo, en algunos casos, resultados contradictorios respecto al ancho de fisura en films, la resistencia a tracción indirecta y al ancho de fisuras en los morteros del emparedado. Por tanto, los resultados que se obtienen con el ensayo de agrietamiento en films no es confiable, ya que no es certero en dar una idea preliminar de la eficiencia del porcentaje de aditivo estudiado.
- El esqueleto estructural del suelo tamizado por la malla #30 aun contiene partículas de arena media que permite la formación del mecanismo de transmisión de fuerzas que le da la resistencia seca al grout. La adición de microfibras de papel parece estorbar en la formación del esqueleto estructural del suelo, lo que genera la reducción de la resistencia en la interfase mortero adobe. Además, no se desarrolla el efecto costura ya que en vez de disminuir el ancho de las fisuras, las aumenta. Para este suelo, la utilización de microfibras no es eficiente.
- El mucílago o goma de tuna mejoró ligeramente la resistencia del grout de suelo solo con 50% y 60% de humedad. Sin embargo, el aumento de resistencia no es considerable y no justifica el trabajo requerido para obtener el aditivo. Por tanto, su uso en suelos con arena media no es eficiente. Además, la relación entre el ancho de fisura medida en el mortero, con la resistencia no es coherente. A pesar que existe un

ligero aumento de la resistencia, la goma de tuna aumenta el ancho de fisuras en vez de reducirla.

- La clara de huevo, usada en 5% respecto al volumen de agua en la mezcla, ayuda a consolidar el esqueleto estructural del suelo gracias a su capacidad aglutinante. Debido a ello su adición en grouts de suelo tamizado por la malla #30 resulta ser útil para mejorar la resistencia seca del grout. Sin embargo, para confirmar la mejora es necesario realizar más ensayos de tracción indirecta en emparedados con grouts de suelo tamizado por la malla #30 que contengan clara de huevo con otros contenidos de humedad. Además, la clara de huevo aumenta el ancho de las fisuras en el mortero lo cual es contradictorio debido al aumento de resistencia. En consecuencia, la ralentización de la velocidad de secado no es lo que mejora la resistencia y es necesario seguir estudiando el uso de este aditivo.
- La vaselina no es útil para ralentizar la velocidad de secado de los grouts de barro pues aumenta el ancho de las fisuras desarrolladas por contracción de secado. Además, cuando el grout con este aditivo seca, aparecen manchas en el barro que altera la apariencia y originalidad del sitio y contradice lo estipulado en las cartas internacionales de conservación.

#### Suelo tamizado por la malla #48

- No se ha encontrado relación entre el agrietamiento observado en los films de suelo tamizado por la malla #48 y las resistencias obtenidas con el ensayo del tracción indirecta. Por tanto, el ensayo de agrietamiento en films con este suelo no aporta ninguna idea preliminar sobre la eficiencia que se esperaría obtener con cierto aditivo.
- La adición de microfibras en grouts con suelo tamizado por la malla #48 consolida y mejora la formación del esqueleto estructural del suelo. La eliminación de las partículas de arena con el tamizado por la malla #48 deja espacios vacíos en la estructura del suelo que la microfibra completa. Las microfibras en este suelo disminuyen el desarrollo de fisuras por contracción de secado debido al efecto costura que se genera al unir dos porciones de barro separados por una fisura. Por consiguiente, la resistencia aumenta considerablemente. El porcentaje de microfibras más eficiente medido respecto al peso del agua del grout fue 1%. Cuando se requiera utilizar grouts con humedades mayores al 70%, se puede utilizar 2% de microfibras, ya que aumenta aun más la resistencia proporcionada con 1%. Sin embargo, se debe

tener en cuenta que la presencia de este aditivo en el grout hace pastosa la mezcla y un exceso en su uso afectará la fluidez que se requiere para penetrar una fisura.

- La goma de tuna es efectiva en mejorar la resistencia del grout de suelo tamizado por la malla #48 siempre que se usen humedades cercanas al 70%. Sin embargo, no se puede afirmar que la mejora de la resistencia se deba al retardo de la velocidad de secado, debido a que el ancho de fisuras se incrementó con la adición de este aditivo. Por tanto, es necesario estudiar el contenido de la goma de tuna para determinar cuál es el efecto en el comportamiento del grout. Además, es conveniente realizar ensayos de tracción indirecta a grouts de suelo tamizado con goma de tuna con humedades mayores al 70% con el fin de establecer un rango de humedades óptimo.
- La clara de huevo no es efectiva en mejorar la resistencia seca de grouts de suelo tamizado por la malla #48. A pesar, que su adición aumenta ligeramente la resistencia seca del grout de suelo solo, el aporte aglomerante del huevo no es suficiente. Además, el aditivo aumenta el ancho de fisura.

## 9.2. Recomendaciones y líneas futuras de investigación

- El ensayo de tracción indirecta solo proporciona una estimación aproximada de la resistencia en la interfase mortero-unidad. Por lo que los grouts que tuvieron los resultados más importantes deben ser corroborados con ensayos más sofisticados como el de compresión diagonal para obtener resultados más representativos de la calidad y eficiencia de los aditivos estudiados.
- Sería conveniente examinar si la tinta del papel periódico utilizado para la obtención de microfibras genera algún daño a largo plazo al mortero de barro.
- La reparación de muros agrietados por el método de inyección con grout requiere lubricar las paredes de la fisura con agua. Este procedimiento podría dañar el muro de adobe si el suelo contiene sales. Sin embargo, la clara de huevo posee características anticristalizantes útiles en la repostería que evitan la cristalización del azúcar. Por lo tanto, sería interesante investigar si del mismo modo es capaz de evitar la cristalización de las sales presentes en el suelo y utilizar agua mezclada con clara para lubricar las paredes de las fisuras.
- Aun no se ha encontrado un método eficiente para inyectar grout de barro en fisuras finas cercanas a los 3 mm. De manera que resulta esencial investigar y mejorar el

proceso de inyección ya existente establecido por los investigadores de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



# ANEXO A

## RESULTADOS DE ENSAYOS

- A1. Ensayos de agrietamiento en films
- A2. Ensayos de Tracción indirecta



**Tabla A.1.1 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con microfibras de papel**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON 1% DE FIBRAS (SF1)				SUELO CON 2% DE FIBRAS (SF2)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	Nº de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	Nº de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	Nº de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	52	0.6	0	0	50	1.0	0	0.0
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.8	0	0		1.0	0	0.0
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.9	0	0		0.6	0	0.0
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.4	0	0		0.7	0	0.0
M30H60-1	1	64	0.6	6	0.1	62	0.7	0	0	61	1.1	1	0.1
M30H60-2			0.8	3	0.1		1.0	0	0		1.3	2	0.1
M30H60-3	7		0.6	2	0.1		0.8	0	0		1.1	0	0.0
M30H60-4			0.6	0	0.0		0.6	0	0		1.1	0	0.0
M30H70-1	1	74	0.8	1	0.1	71	0.9	0	0	77	1.0	0	0.0
M30H70-2			0.8	4	0.1		0.8	0	0		1.1	0	0.0
M30H70-3	7		0.9	2	0.1		0.8	0	0		0.9	0	0.0
M30H70-4			0.8	1	0.1		0.9	0	0		1.1	0	0.0
M48H50-1	1	54	0.5	0	0.0	52	0.6	0	0	55	0.8	2	0.1
M48H50-2			0.5	2	0.1		0.7	0	0		0.7	2	0.1
M48H50-3	7		0.4	0	0.0		0.7	0	0		0.8	0	0.0
M48H50-4			0.5	0	0.0		0.7	0	0		0.8	0	0.0
M48H60-1	1	63	0.5	1	0.1	65	0.7	0	0	67	0.5	0	0.0
M48H60-2			0.4	0	0.0		0.3	0	0		0.7	0	0.0
M48H60-3	7		0.3	0	0.0		0.4	0	0		0.8	0	0.0
M48H60-4			0.4	0	0.0		0.5	0	0		0.7	0	0.0
M48H70-1	1	77	0.4	1	0.1	75	0.5	0	0	76	0.8	0	0.0
M48H70-2			0.3	0	0.0		0.5	0	0		0.7	0	0.0
M48H70-3	7		0.4	0	0.0		0.5	0	0		0.7	0	0.0
M48H70-4			0.5	0	0.0		0.6	0	0		0.8	0	0.0

M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.1.2 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con goma de tuna**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON GOMA DE TUNA (SGT)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	52	0.7	7	0.1
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.7	15	0.1
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.5	0	0.0
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.7	0	0.0
M30H60-1	1	64	0.6	6	0.1	66	0.7	5	0.1
M30H60-2			0.8	3	0.1		0.7	3	0.1
M30H60-3	7		0.6	2	0.1		0.7	0	0.0
M30H60-4			0.6	0	0.0		0.7	0	0.0
M30H70-1	1	74	0.8	1	0.1	76	0.7	3	0.1
M30H70-2			0.8	4	0.1		0.7	2	0.1
M30H70-3	7		0.9	2	0.1		0.7	0	0.0
M30H70-4			0.8	1	0.1		0.7	0	0.0

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.1.3 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con clara de huevo**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON 2% DE CLARA DE HUEVO (SCH2)				SUELO CON 5% DE CLARA DE HUEVO (SCH5)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	53	0.7	13	0.1	53	0.6	14	0.1
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.7	6	0.1		0.6	14	0.1
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.6	0	0.0		0.6	0	0.0
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.7	0	0.0		0.7	0	0.0

M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.1.4 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con clara de huevo**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON 8% DE CLARA DE HUEVO (SCH8)				SUELO CON 10% DE CLARA DE HUEVO (SCH10)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	62	0.7	12	0.1	55	0.6	18	0.2
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.6	13	0.1		0.6	12	0.1
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.6	0	0.0		0.6	6	0.1
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.6	2	0.1		0.7	10	0.1

M: número de malla con que se tamizó el suelo.  
H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.1.5 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con clara de huevo**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON 15% DE CLARA DE HUEVO (SCH15)				SUELO CON 20% DE CLARA DE HUEVO (SCH20)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	56	0.6	10	0.1	61	0.7	10	0.1
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.7	14	0.1		0.7	15	0.1
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.6	8	0.1		0.6	Destruído	-
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.6	5	0.1		0.6	Destruído	-

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.1.6 Microfisuración en films de grouts de suelo solo y suelo con vaselina**

	Tiempo de secado bajo vidrio	SUELO SOLO (SS)				SUELO CON 2% DE VASELINA (SV2)				SUELO CON 5% DE VASELINA (SV5)			
		Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)	Contenido de Humedad inicial (%)	Espesor de Film (mm)	N° de Fisuras	Ancho de Fisura (mm)
M30H50-1	1	57	0.8	1	0.1	53	0.6	27	0.1	49	0.7	25	0.2
M30H50-2			0.8	4	0.1		0.6	29	0.1		0.6	24	0.2
M30H50-3	7		0.6	0	0.0		0.7	12	0.1		0.6	13	0.7
M30H50-4			0.6	0	0.0		0.6	11	0.1		0.7	12	0.2

M: número de malla con que se tamizó el suelo.

H: humedad nominal del grout.

**Tabla A.2.1 Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo solo tamizado por las mallas #30 y #48**

	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. de Tracción		Fisuración		Espesor de mortero
		kPa	kg/cm <sup>2</sup>	N° de Fisuras	Ancho de fisura (mm)	e (mm)
SSM30H50-1	48	48.6	0.49	3	0.10	1.28
SSM30H50-2		49.4	0.51	4	0.10	1.83
SSM30H50-3		43.6	0.44	12	0.18	1.43
SSM30H50-4		37.1	0.37	11	0.13	1.45
SSM30H50-5 *		17.4	0.18	20	0.18	1.80
SSM30H60-1	56	22.1	0.23	20	0.20	1.90
SSM30H60-2		16.2	0.16	8	0.38	1.83
SSM30H60-3		13.6	0.14	5	0.20	2.00
SSM30H60-4		10.1	0.10	6	0.30	2.05
SSM30H60-5		18.3	0.19	10	0.23	1.95
SSM30H70-1	66	19.7	0.20	30	0.10	1.05
SSM30H70-2		20.1	0.20	30	0.10	1.70
SSM30H70-3		9.5	0.09	30	0.10	1.10
SSM30H70-4		9.5	0.09	30	0.10	1.03
SSM30H70-5		24.7	0.25	30	0.10	1.45
SSM48H50-1	50	20.3	0.21	30	0.48	2.10
SSM48H50-2		16.8	0.17	31	0.38	2.18
SSM48H50-3 *		12.4	0.12	11	0.18	1.73
SSM48H50-4		16.2	0.16	12	0.18	2.25
SSM48H50-5		19.7	0.20	28	0.30	2.33
SSM48H60-1	59	14.5	0.15	23	0.35	1.65
SSM48H60-2		19.7	0.20	13	0.33	1.95
SSM48H60-3		15.6	0.16	21	0.60	2.45
SSM48H60-4 *		29.2	0.30	13	0.35	1.78
SSM48H60-5		21.5	0.22	26	0.23	1.75
SSM48H70-1	77	10.3	0.10	30	0.65	1.65
SSM48H70-2		12.4	0.12	30	0.50	1.08
SSM48H70-3		15.6	0.16	45	0.60	1.65
SSM48H70-4		18.0	0.18	34	0.28	1.58
SSM48H70-5		14.6	0.15	25	1.45	1.35

SS : suelo solo.

M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

\* Valor eliminado por estar fuera del intervalo de confianza establecido.

**Tabla A.2.2 Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo tamizado por las mallas #30 y #48 con 1% de microfibras**

	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. de Tracción		Fisuración		Espesor de mortero
		kPa	kg/cm <sup>2</sup>	N° de Fisuras	Ancho de fisura (mm)	e (mm)
SF1M30H50-1 *	49	32.1	0.33	3	0.10	1.6
SF1M30H50-2		15.2	0.15	2	0.10	1.7
SF1M30H50-3		20.8	0.21	8	0.15	1.6
SF1M30H50-4		14.2	0.14	5	0.48	1.6
SF1M30H60-1	61	17.4	0.18	4	0.35	1.5
SF1M30H60-2 *		7.0	0.07	16	0.38	1.5
SF1M30H60-3		19.1	0.19	12	0.35	1.6
SF1M30H60-4		20.8	0.21	13	0.38	1.7
SF1M30H70-1	70	13.7	0.14	11	0.43	1.6
SF1M30H70-2		15.3	0.16	10	0.80	1.4
SF1M30H70-3		14.8	0.15	9	1.50	1.6
SF1M30H70-4		15.7	0.16	10	0.80	1.5
SF1M48H50-1	50	33.3	0.34	13	0.13	2.0
SF1M48H50-2		32.7	0.33	9	0.10	2.0
SF1M48H50-3 *		44.7	0.46	4	0.10	2.0
SF1M48H50-4		29.2	0.30	22	0.23	2.4
SF1M48H60-1	57	37.7	0.38	16	0.45	2.3
SF1M48H60-2		33.9	0.34	17	0.48	1.9
SF1M48H60-3		38.3	0.39	12	0.50	1.8
SF1M48H60-4		34.4	0.35	16	0.43	1.7
SF1M48H70-1	72	24.8	0.25	3	0.10	1.7
SF1M48H70-2		20.3	0.21	8	0.18	1.5
SF1M48H70-3		20.3	0.21	7	0.25	1.9
SF1M48H70-4		29.1	0.30	8	0.23	1.8

S : suelo.

F : porcentaje de microfibra utilizada.

M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

\* Valor eliminado por estar fuera del intervalo de confianza establecido.

**Tabla A.2.3 Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con mortero de suelo tamizado por la malla #48 con 2% de microfibras**

	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. de Tracción		Fisuración		Espesor de mortero
		kPa	kg/cm <sup>2</sup>	Nº de Fisuras	Ancho de fisura (mm)	e (mm)
SF2M48H50-1	48	19.7	0.20	5	0.13	1.8
SF2M48H50-2		25.0	0.25	11	0.53	2.0
SF2M48H50-3		28.6	0.29	5	0.13	1.8
SF2M48H50-4 *		40.3	0.41	3	0.10	1.7
SF2M48H60-1	58	13.0	0.13	8	0.33	2.2
SF2M48H60-2		10.9	0.11	5	0.13	2.0
SF2M48H60-3		23.9	0.24	15	0.28	2.4
SF2M48H60-4		27.4	0.28	12	0.23	2.1
SF2M48H70-1	67	29.1	0.30	19	0.35	2.2
SF2M48H70-2		29.8	0.30	16	0.33	1.9
SF2M48H70-3		29.8	0.30	17	0.35	2.2
SF2M48H70-4 *		40.0	0.41	19	0.48	1.7

S : suelo.

F : porcentaje de microfibra utilizada.

M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

\* Valor eliminado por estar fuera del intervalo de confianza establecido.

**Tabla A.2.4 Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo tamizado por las mallas #30 y #48 con goma de tuna**

	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. de Tracción		Fisuración		Espesor de mortero
		kPa	kg/cm <sup>2</sup>	N° de Fisuras	Ancho de fisura (mm)	e (mm)
SGTM30H50-1	53	21.8	0.22	34	0.53	2.3
SGTM30H50-2		23.6	0.24	24	0.20	1.7
SGTM30H50-3		22.7	0.23	26	0.25	2.7
SGTM30H50-4		25.9	0.26	35	0.63	2.5
SGTM30H60-1	63	25.6	0.26	37	1.03	2.0
SGTM30H60-2		24.7	0.25	29	0.33	1.8
SGTM30H60-3		19.7	0.20	43	0.88	1.7
SGTM30H60-4		18.9	0.19	28	0.53	1.5
SGTM30H70-1	73	23.9	0.24	22	0.33	2.5
SGTM30H70-2		17.7	0.18	13	0.25	1.9
SGTM30H70-3		18.0	0.18	21	0.50	1.8
SGTM30H70-4		16.5	0.17	23	0.25	1.9
SGTM48H50-1	52	13.9	0.14	32	0.33	1.8
SGTM48H50-2		29.8	0.30	37	0.63	1.7
SGTM48H50-3		21.8	0.22	29	0.98	1.9
SGTM48H50-4		20.6	0.21	38	0.38	1.7
SGTM48H60-1	62	22.4	0.23	46	0.25	1.7
SGTM48H60-2		18.0	0.18	29	0.50	2.0
SGTM48H60-3		16.8	0.17	38	0.75	2.4
SGTM48H60-4		17.1	0.17	38	0.30	2.5
SGTM48H70-1	73	18.6	0.19	27	1.08	2.4
SGTM48H70-2		22.4	0.23	37	0.70	2.4
SGTM48H70-3		27.1	0.28	28	0.68	1.7
SGTM48H70-4		19.7	0.20	32	0.70	2.8

S : suelo.

GT: goma de tuna utilizada al 100%.

M : número de malla con que se tamizó el suelo.

H : humedad nominal del grout.

**Tabla A.2.5 Resultados del ensayo de tracción indirecta de emparedados con morteros de suelo tamizado por las mallas #30 y #48 con 5% de clara de huevo**

	Contenido de Humedad inicial (%)	Esf. de Tracción		Fisuración		Espesor de mortero e (mm)
		kPa	kg/cm <sup>2</sup>	N° de Fisuras	Ancho de fisura (mm)	
SCH5M30H50-1	56	31.8	0.32	29	0.58	2.0
SCH5M30H50-2		22.4	0.23	22	0.85	2.0
SCH5M30H50-3		22.7	0.23	24	0.70	2.3
SCH5M30H50-4		39.2	0.40	15	0.20	2.1
SCH5M48H50-1	55	13.3	0.14	30	0.35	1.8
SCH5M48H50-2		26.2	0.27	29	0.50	2.1
SCH5M48H50-3		27.7	0.28	30	0.33	1.9
SCH5M48H50-4		19.5	0.20	28	0.70	2.0

*S* : suelo.

*CH*: porcentaje de clara de huevo utilizada.

*M* : número de malla con que se tamizó el suelo.

*H* : humedad nominal del grout.

## Referencias y bibliografía

Blondet M, Villa García G y Brzev S. 2003. “Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor”. EERI/IAEE World Housing Encyclopedia. Earthquake Engineering Research Institute, EERI. California, USA.

Blondet M, Vargas J, Ginocchio F, Morales K e Iwaki C. 2007. “Estudio preliminar del uso de grouts de barro para reparar fisuras en muros históricos de adobe”. *NNMC and Adobe Association of the Southwest, El Rito, NM*. Lima, Perú.

García Casco, Antonio. “Tema 4: Morteros de Construcción y Restauración”. Material de enseñanza. Granada: Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Consulta: 2 de marzo de 2010.

<<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>>

Gelard D, Fontaine L, Maximilien S, Olagnon C, Laurent J, Houben H y Van Damme H 2007. “When physics revisit earth construction: recent advances in the understanding of the cohesion mechanisms of earthen materials”. En Venkatarama R y Monto M. *International Symposium on Earthen Structures*. Bangalore: Interline Publishing, pp.294 – 301.

ICOMOS (International Council of Monuments and Sites). 1964. “Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios (*Carta de Venecia – 1964*)”. II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos. Venecia, Italia.

ICOMOS. 1979. “Carta del ICOMOS Australia para Sitios de Significación Cultural (*Carta de Burra*)”. Burra, Australia.

ICOMOS. 2003. “Principios para el Análisis, Conservación y Restauración de las Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (*Carta de Zimbabwe*)”. XIV Asamblea General del Icomos. Victoria Falls, Zimbabwe.

Instituto de Estudios del huevo (IEH). “Propiedades del huevo”. Material de enseñanza. Madrid. Consulta: 2 de marzo de 2010.

<<http://www.institutohuevo.com/scripts/propiedades.asp>>

Iwaki C y Morales K. 2008. "El ensayo de tracción indirecta para medir la resistencia mecánica de la mampostería de adobe". Asamblea Nacional de Rectores. Lima, Perú.

Lambe W y Whitman R. 1995. "Mecánica de suelos". Editorial Limusa SA Grupo Noriega editores. Balderas, Mexico.

NTP 339.127:1998. "SUELOS. Métodos de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo". Norma técnica peruana.

Terzaghi K y Peck R. 1969. "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica". Editorial El Ateneo.

Tolles L, Kimbro E, y Ginell W. 2005. "Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización de estructuras históricas de adobe". Informe del programa científico del Getty Conservation Institute Scientific. Los Angeles, EEUU.

Vargas J, Bariola J, Blondet M, Mehta P, Villa García G y Ginocchio F. 1983. "Investigación científica innovativa: Edificaciones de adobe en áreas sísmicas". *Proyecto AID 936/5542*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Vargas J, Heredia E, Bariola J y Mehta P. 1986. "Preservación de las construcciones de adobe en áreas lluviosas". *Publicación DI-86-02*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Vargas J, Blondet M, Ginocchio F y Villa García G. 2005. "35 años de investigaciones en sismo adobe: La tierra armada". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.