



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL SILICATO DE ETILO COMO CONSOLIDANTE PARA REHABILITAR ALBAÑILERÍA EN EDIFICIOS PATRIMONIALES

MELISSA SOTO CASCANTE

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesores Supervisores:
PATRICIA MARTÍNEZ RAMÍREZ
MAURICIO LÓPEZ CASANOVA

Santiago de Chile, (Mayo, 2014)

© 2014, Melissa Soto Cascante



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL SILICATO DE ETILO COMO CONSOLIDANTE PARA REHABILITAR ALBAÑILERÍA EN EDIFICIOS PATRIMONIALES

MELISSA SOTO CASCANTE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PATRICIA MARTÍNEZ R.

MAURICIO LÓPEZ C.

ALONDRA CHAMORRO G.

MARCELA HURTADO S.

GLORIA ARANCIBIA H.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Mayo, 2014)

A mi mamá con amor

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer el apoyo incondicional de mi mamá, mi novio Marco, mi familia y mis amigos durante mi estadía en Chile. A mi madre chilena Editha y a los colaboradores del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción: Selma, Sandra, Pilar, Claudio, William les agradezco las atenciones que tuvieron conmigo y que me hayan hecho sentir como en casa.

A la Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCI), agradezco por el apoyo financiero para poder realizar mis estudios de postgrado, en especial a Margit Gere, quien siempre estuvo presente, especialmente en momentos difíciles.

A los profesores Patricia Martínez y Mauricio López quienes me guiaron durante la realización de este trabajo. Quisiera además destacar la colaboración del profesor Pablo Pastén del Departamento de Ingeniería Hidráulica y a Eduardo Ramírez del Laboratorio de Calidad de Agua, por su apoyo durante la realización de esta investigación. Quisiera agradecer junto a ellos al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) CONICYT/FONDAP/15110020 por su apoyo.

A la profesora Gloria Arancibia, quien me brindó ayuda con los análisis de caracterización de las muestras de estudio y aportó valiosos comentarios en mi investigación. Asimismo, un agradecimiento especial al profesor Diego Morata y a Mercedes Vázquez del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) proyecto FONDAP-CONICYT 15090013

del Departamento de Geología de la Universidad de Chile por la enorme colaboración que me dieron.

A la empresa Wacker Chemie por mostrar interés en mi trabajo y facilitarme el consolidante que utilicé a lo largo de esta investigación. Por parte de la empresa, agradezco mucho la atención brindada por Camila du Paula de Wacker Chemie en Brasil así como de Enrique López de Wacker Chemie en Chile. También, a la empresa Industrias Princesa Ltda, quienes muy amablemente me proporcionaron la arcilla y caolín que utilice en esta investigación, en especial a Elías Hazín.

A los técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción, quienes me ayudaron enormemente con mi trabajo experimental: Mauricio Guerra, Patricio Pinilla y Fernando Palma, quisiera darles las gracias.

Al grupo de investigación ETC: Claudia Stuckrath, José Carlos Remesar, Felipe Rivera, Iván Navarrete, Franco Zunino, Ricardo Serpell y Álvaro Paul por los comentarios y sugerencias brindados durante la realización de la investigación.

Finalmente, en mi corazón quedan Larissa Rubio, Magdalena Cortés, Omar Zegarra, Carlos López, Alelí Osorio, Roberto Luna, David Saldaña, Fernando Paniagua amigos que conocí mientras realizaba mis estudios en Chile.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xv
GLOSARIO.....	xvii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Albañilería de ladrillo: construcción y causas de su deterioro.....	1
1.2 Consolidación: técnica de rehabilitación de materiales cerámicos	4
1.2.1 Generalidades.....	5
1.2.2 Consolidantes organosilícicos.....	8
1.2.3 Métodos de aplicación del silicato de etilo.....	13
1.2.4 Resultados de consolidación utilizando silicato de etilo	15
a. Técnicas de caracterización de materiales y ensayos efectuados ..	16
b. Consolidación en el ladrillo	17
2 PROPUESTA DEL TRABAJO A REALIZAR	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 Definición del problema.....	23
2.3 Hipótesis experimental	24
2.4 Objetivos y alcances de la investigación.....	24
2.4.1 Objetivo principal	24
2.4.2 Objetivos específicos	25
2.4.3 Alcances.....	25
2.5 Metodología	26
2.6 Diseño experimental.....	29

2.6.1	Caracterización de arcillas y fabricación de especímenes en el laboratorio.....	29
2.6.2	Aplicación del consolidante: inmersión total y métodos de aplicación “in situ”.....	31
2.7	Estructura del documento.....	33
3.	INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA DEL SUSTRATO EN LA EFICIENCIA Y EFECTIVIDAD DE LA CONSOLIDACION CON SILICATO DE ETILO EN LADRILLOS.....	35
	Resumen.....	35
3.1	Introducción	36
3.2	Significancia de la investigación.....	38
3.3	Materiales y métodos	38
3.3.1	Preparación de especímenes calcinados.....	38
3.3.2	Aplicación del tratamiento.....	40
3.3.3	Técnicas experimentales	40
3.4	Resultados y discusión	44
3.4.1	Caracterización de materias primas y especímenes fabricados	44
3.4.2	Evaluación de la efectividad de las aplicaciones del consolidante	46
3.4.3	Interacción sustrato-consolidante (FTIR)	56
3.5	Conclusiones	59
	Referencias	61
4.	ESTUDIO DE LA RELACIÓN DOSIS-EFECTIVIDAD EN LA CONSOLIDACIÓN CON SILICATO DE ETILO EN EL LADRILLO.....	65
4.1	Introducción	66
4.2	Significancia de la investigación.....	69
4.3	Materiales y métodos	69
4.3.1	Preparación de especímenes calcinados.....	69
4.3.2	Aplicación del tratamiento.....	70
4.3.3	Técnicas experimentales	72
4.4	Resultados	75
4.4.1	Caracterización de materias primas	75
4.4.2	Caracterización de especímenes fabricados.....	75
4.4.3	Determinación de la efectividad del método de aplicación del consolidante	77

4.4.4	Evaluación de la efectividad de las aplicaciones del consolidante sobre las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo.....	82
4.5	Conclusiones	93
	Referencias	95
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	99
5.1	Conclusiones	99
5.2	Recomendaciones e investigaciones futuras	102
	BIBLIOGRAFIA.....	104
6.	ANEXOS	111
6.1	Clasificación de los consolidantes.....	111
6.2	Silicato de etilo utilizado y polimerización del sílice amorfo.....	115
6.3	Distribución de tamaño de partícula para materias primas	116
6.4	Límites de Atterberg, moldeo y calcinación de especímenes	118
6.5	Caracterización química y mineralógica de las arcillas y especímenes fabricados (XRF/XRD)	120
6.5.1	Caracterización química de arcillas y especímenes fabricados (XRF).....	120
6.5.2.	Caracterización mineralógica de las arcillas y especímenes fabricados (XRD).....	121
6.5.3.	Caracterización mineralógica de ladrillos de edificaciones históricas	123
6.6.	Métodos de aplicación, rendimiento y porcentaje remanente del consolidante.....	125
6.7.	Propiedades físicas obtenidas: inmersión total y brocha en todas las especímenes.....	128
6.8.	Propiedades mecánicas obtenidas: brocha todas las especímenes	134
6.9.	Cálculo de coordenadas de color.....	136
6.10.	Interacción sustrato-consolidante	137

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1. Factorial a estudiar para contenido de caolín en la mezcla y temperaturas de calcinación a utilizar.....	30
Tabla 2-2. Factorial de propiedades físicas y mecánicas a evaluar, según tiempo de inmersión.....	32
Tabla 2-3. Factorial de propiedades físicas y mecánicas a evaluar según método de aplicación in situ.....	33
Tabla 3-1. Nomenclatura según variables de estudio (contenido de caolín y temperatura de calcinación) de los especímenes fabricados	39
Tabla 3-2. Sales utilizadas para fijar la humedad relativa objetivo (Greenspan, 1977)..	43
Tabla 3-3. Propiedades de transporte de los especímenes antes y después de la consolidación.....	51
Tabla 4-1. Clasificación inicial del consumo del consolidante (propuesto por la autora)	70
Tabla 4-2. Evaluación del método de aplicación de mayor eficiencia.....	79
Tabla 4-3. Variación propiedades físicas pre y post consolidación para los métodos de aplicación utilizados.....	85
Tabla 4-4. Resultados de colorimetría para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A}	93
Tabla 6-1. Resultado de Límites de Atterberg para las especímenes.....	118
Tabla 6-2. Composición química de arcilla y caolín.....	120
Tabla 6-3. Composición química de ladrillos fabricados.....	120
Tabla 6-4. Evaluación del método de aplicación de mayor eficiencia en serie L10-900	125
Tabla 6-5. Desempeño de la impregnación del consolidante, brocha 1 ^{era} aplicación ..	125
Tabla 6-6. Desempeño de la re-impregnación del consolidante, brocha 2 ^{da} aplicación	125

Tabla 6-7. Porcentaje consolidante remanente para L10, a diferentes tiempos de inmersión total.....	127
Tabla 6-8. Porcentaje de consolidante remanente: inmersión total a 1 hora y saturación con brocha.	127
Tabla 6-9. Variación propiedades físicas pre y post consolidación, aplicación brocha	128
Tabla 6-10. Resultados de colorimetría para inmersión 1 hora.....	136
Tabla 6-11. Resultados de colorimetría para brocha 1 ^{era} aplicación	136
Tabla 6-12. Resultados de colorimetría para brocha 2 ^{da} aplicación.....	136

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1. Daño por cristalización de sales	3
Figura 1-2. Perfil de dureza de un sustrato alterado, consolidado con y sin éxito	7
Figura 1-3. Hidrólisis del silicato de etilo en presencia de agua (Sandrolini et al, 2012)	9
Figura 1-4. Condensación y gelación de los silanos (Sandrolini et al, 2012)	10
Figura 2-1. Materialidad de los Inmuebles de Conservación Histórica en Santiago	21
Figura 2-2. Diagrama de flujo del trabajo realizado	28
Figura 3-1. Difractogramas de los especímenes fabricados según a) temperatura de calcinación y b) contenido de caolín	46
Figura 3-2. Porcentajes de consolidante finalmente retenido para los especímenes. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar.....	47
Figura 3-3. Penetración superficial alcanzada por la bola de acero (6mm) para los especímenes antes y después de la consolidación. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar.....	48
Figura 3-4. Aumento de resistencia a compresión y flexión para los especímenes antes y después de la consolidación. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar.....	49
Figura 3-5. Coeficiente y tasa de absorción capilar para los especímenes antes y después de la consolidación	52
Figura 3-6. Distribución del tamaño de poros de los especímenes antes y después de la consolidación según a) temperatura de calcinación y b) contenido de caolín	53
Figura 3-7. Ubicación del límite máximo de variación de color para los especímenes consolidados	56
Figura 3-8. Ubicación de principales bandas de estudio y detección de las variaciones obtenidas para L10-800 y L10-1000 (casos más significativos).....	57
Figura 4-1. Difractograma de especímenes fabricados. El eje Y corresponde a Intensidad	76

Figura 4-2 . A) Izquierda: matriz con granos irregulares predominantemente, derecha: inicio de deformación de granos en matriz, B) Principales minerales detectados	77
Figura 4-3 . Absorción y retención del consolidante por inmersión en distintos plazos, para determinar el tiempo de inmersión más significativo	78
Figura 4-4. Detalle de consolidación para métodos estudiados	79
Figura 4-5 Consumo y profundidad logrados para L10-900, B _{1A} y B _{2A}	80
Figura 4-6 Sección transversal, medición de profundidad de penetración lograda para B _{1A} y B _{2A}	81
Figura 4-7. Absorción inicial y retención del consolidante para los métodos de aplicación estudiados	82
Figura 4-8. Re-distribución del tamaño de poro para I _{IH} a partir de la aplicación del consolidante en los especímenes	83
Figura 4-9. Re-distribución de porosidad total después de la consolidación	85
Figura 4-10. Absorción capilar para los especímenes	87
Figura 4-11. Penetración superficial por bola de acero (6mm) obtenida para los métodos de aplicación estudiados	89
Figura 4-12. Resistencia a flexión obtenida para los métodos de aplicación estudiados	90
Figura 4-13. Resistencia a compresión de especímenes, según los métodos de estudio	91
Figura 6-1. Tratamientos más utilizados en la consolidación (Fort, 2007)	111
Figura 6-2. Consolidante Wacker OH 100 derecha, sílice amorfo precipitado izquierda.	115
Figura 6-3. Consolidación lograda en ladrillo pulverizado con consolidante Wacker OH 100	115
Figura 6-4. Distribución de tamaño de partícula para la arcilla común	116
Figura 6-5. Distribución de tamaño de partícula para el caolín	117

Figura 6-6. Detalle de cuchara de Casagrande para determinación Límites de Atterberg	118
Figura 6-7. Propiedades de moldeo modificado de Bain y Highley (1966).....	119
Figura 6-8. Detalle de moldes utilizados y especímenes moldeadas	119
Figura 6-9. Difractogramas de arcilla común y caolín: fracción total y fracción bajo 2 μm	121
Figura 6-10. Difractogramas de los ladrillos fabricados.....	122
Figura 6-11. Minerales detectados por DRX en muestras de ladrillo de la Catedral de Santiago.....	123
Figura 6-12. Minerales detectados por DRX en muestras de ladrillo del Club Fernández Concha	124
Figura 6-13. Porcentajes de consolidante absorbido y remanente en especímenes de estudio	126
Figura 6-14. Absorción capilar para especímenes	130
Figura 6-15. Desorción de agua según el tipo de ladrillo para inmersión total.....	131
Figura 6-16. Disminución de porosidad en especímenes de estudio.....	132
Figura 6-17. Curvas de radio de poro según volumen de mercurio acumulado.....	133
Figura 6-18. Penetración superficial por bola de acero (6mm).....	134
Figura 6-19. Resistencia a flexión, aplicación con brocha.....	134
Figura 6-20. Resistencia a compresión de especímenes	135
Figura 6-21. Espectros FTIR de sustratos pre y post consolidación.	139

RESUMEN

La consolidación con silicato de etilo, es una técnica de intervención no invasiva, utilizada actualmente para rehabilitar materiales constructivos (principalmente silíceos) en edificaciones históricas y contemporáneas. Sin embargo, la ausencia de información que relacione la dosis a utilizar con la mejora en las propiedades físicas y mecánicas del material, impide utilizar esta técnica de forma efectiva y eficiente.

El objetivo de esta investigación fue evaluar, mediante un protocolo de caracterización, la dosis y efectividad del silicato de etilo como consolidante del ladrillo (sustrato de estudio) mediante distintos métodos de aplicación. Para esto, se fabricaron ladrillos con distintas proporciones de arcilla común y caolín, y se aplicó el consolidante mediante métodos utilizados en el laboratorio (inmersión total a diferentes tiempos) e “in situ” (brocha, rociador con presión y rociador sin presión). Se utilizaron diferentes temperaturas de calcinación para lograr distintos grados de porosidad e interconexión de poros en los ladrillos. Se evaluó las variaciones en las propiedades físicas (porosidad abierta, interconexión y distribución del tamaño de poro), mecánicas (dureza superficial, resistencia a compresión y flexión), color e interacciones químicas antes y después de la consolidación para determinar el desempeño del silicato de etilo.

Los resultados indican una estrecha relación entre parámetros como distribución y tamaño de radio de poro con la efectividad de la consolidación. El principal rango de acción del consolidante se encontró entre 0.01 a 0.1 μm . Asimismo, la interacción

sustrato-consolidante determinada por el tipo de mineralogía del ladrillo brinda un aporte adicional en el desempeño de la consolidación.

Métodos de aplicación “in situ” como la brocha son adecuados para consolidar materiales cerámicos como el ladrillo. Asimismo, la re-impregnación del ladrillo con brocha logró las mayores disminuciones en permeabilidad y aumentos en resistencia mecánica de los métodos evaluados.

Finalmente, pocas variaciones cromáticas fueron detectadas en los ladrillos con los métodos de aplicación, lo que valida la aplicación del consolidante en albañilería patrimonial.

Palabras Claves: Efectividad, consolidación, silicato de etilo, dosis consolidante, propiedades físicas, propiedades mecánicas, ladrillo, ladrillo, rehabilitación.

ABSTRACT

Consolidation with ethyl silicate is a non-invasive intervention technique, currently used for rehabilitation construction materials (mainly siliceous) in historical and contemporary buildings. However, the absence of information relating dosage used with improvement in physical and mechanical properties of the material, prevents the use effectively and efficiently of this technique.

The objective of this research was to evaluate, using a characterization protocol, the dosage and effectiveness of ethyl silicate as consolidant in brick (study substrate), using different application methods. For this, bricks were made using different proportions of common clay and kaolin. The consolidant was applied using laboratory methods (total immersion at different times) and "in situ" methods (brush, spray pressure and spray with no pressure). Different calcination temperatures were used to achieve varying degrees of porosity and pore interconnectivity. Variations in physical properties (open porosity, interconnectivity and pore size distribution), mechanical properties (surface hardness, compressive and flexural strength), color, and chemical interactions were evaluated before and after consolidation to determine the ethyl silicate performance.

The results indicate a close relationship between parameters such as size distribution and pore radius with the consolidation effectiveness. The main action of consolidating range was between 0.01 to 0.1 μm . Also, a substrate-consolidant interaction determined

by brick mineralogy provides an additional contribution to the performance of the consolidation.

“In situ” methods as brush application are suitable to consolidate ceramic materials such as brick. Also, brush re-impregnation achieved the highest permeability reduction, and mechanical strength increases of all the evaluated methods.

Finally, few color variations were detected in the bricks with the application methods, which validate the consolidant application in heritage masonry.

Keywords: Effectiveness, consolidation, ethyl silicate, consolidant dosage, physical properties, mechanical properties, brick, brick, rehabilitation.

GLOSARIO

Albañilería: arte de construir edificios u obras a partir de materiales como ladrillos, piedra, cal, arena, yeso, cemento u otros materiales semejantes (Diccionario de la Real Academia Española, 2001).

Conservación: Conjunto de medidas destinadas a salvaguardar y prevenir la degradación de un edificio, incluyendo la realización de las obras de mantenimiento necesarias al correcto funcionamiento de todas las partes y elementos del mismo (Sirchal, 2013).

Consolidante: Químico líquido que se aplica en un sustrato (piedra, adobe, hormigón, madera, entre otros) deteriorado con el fin de restituir la consistencia original. Se aplica generalmente en la superficie y de esta forma penetra en el interior del sistema poroso, reduciendo la porosidad y aumentando las características mecánicas.

Mantenimiento: Serie de operaciones que buscan disminuir los ritmos de deterioro de la vida de un edificio y se practican en diversas partes y elementos de su construcción, así como en sus instalaciones y equipamientos, siendo generalmente obras programadas y efectuadas en ciclos regulares (Carta de Lisboa, 1995).

Patrimonio: Conjunto de bienes heredados del pasado. Aquellas obras que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, el arte o la ciencia. Concepto cuya noción y prácticas están en evolución permanente y pasan de tener un valor único de antigüedad a poseer un valor simbólico para la sociedad de un conjunto territorial complejo.

Preservación: Es el conjunto de medidas cuyo objetivo es proteger de un mal identificado o probable a un sitio, monumento o una construcción (Sirchal, 2013). Consiste en cuidar, amparar o defender un sitio, monumento o construcción con anticipación con el fin de evitar un eventual perjuicio o deterioro.

Rehabilitación de un edificio: Obra cuya finalidad es la recuperación y la reintegración física de una construcción y la búsqueda de soluciones para las anomalías constructivas, funcionales, higiénicas y de seguridad acumuladas a lo largo de los años, procediendo a realizar una modernización que mejore su desempeño hasta cumplir con los actuales niveles de exigencia (Sirchal, 2013).

Renovación de un edificio: Cualquier obra que se realice con el objetivo de reconstruir totalmente un edificio en un lugar donde ya existen construcciones (Sirchal, 2013).

Restauración de un edificio: Obras especializadas cuya finalidad es la conservación y consolidación de una construcción, así como la preservación o reposición de la

totalidad de su concepción original o de la parte correspondiente a los momentos más significativos de su historia (carta de Lisboa, 1995).

Silicato de etilo: Conocido también como silicato de tetraetilo o éster etílico de ácido ortosilícico se suele abreviar como TEOS ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$). Posee la propiedad de convertirse en SiO_2 amorfo al reaccionar con la adición de agua.

Sustrato: conglomerado de materia o masa.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Albañilería de ladrillo: construcción y causas de su deterioro

Los ladrillos son fabricados a partir de arcilla (suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas), que es mezclada con agua, moldeada y secada para después ser calcinada en hornos. Conforme aumenta la temperatura de calcinación ocurren cambios mineralógicos y de textura (Cultrone y Sebastián, 2009).

Por otro lado, la resistencia mecánica del ladrillo es adquirida por medio del proceso de sinterización, el cual ocurre cuando los puntos de contacto de los granos adyacentes se funden en una fase vítrea y se unen. La sinterización vítrea, comienza a los 800°C y continúa hasta temperaturas cercanas a los 1200°C, cuando tiene lugar la fusión y recristalización de los materiales (Betancourt et al, 2007).

En cuanto a durabilidad, el ladrillo suele ser un material susceptible al deterioro por diversas causas, ya sea por factores externos o a propiedades inherentes al material. Entre las causas más comunes del deterioro en el ladrillo, se presentan las siguientes (Esbert et al, 1997):

- Defectos durante preparación y moldeo: hidratación de CaO, deformaciones, exfoliaciones, laminaciones y fisuras.

- Defectos producidos durante el secado: fisuraciones, grietas y deformaciones.
- Defectos producidos durante la cocción: disminución resistencia mecánica, microfisuraciones, corazón negro y deformaciones.
- Deterioro por microorganismos o biológicos: hongos, palomas.
- Deterioro por cristalización e hidratación de sales.
- Deterioro por expansión hídrica: ciclos hielo-deshielo.
- Deterioro por contaminación atmosférica: ingreso de SO_2 , CO_2 y NO_x

De los deterioros mencionados anteriormente, la cristalización de sales es uno de los agentes de daño más poderosos en materiales con elevada permeabilidad como el ladrillo (Figura 1-1), especialmente si es acompañado por el congelamiento del agua dentro de los poros y el ataque por sulfato (Benavente et al, 2004). Asimismo, la hidratación de sales también es un serio problema de deterioro. Existen sales como el sulfato sódico que pueden cristalizar hasta con diez moléculas de agua por cada molécula de sal ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) lo que produce un aumento de volumen de aproximadamente 315% con respecto a la sal anhidra y generan ruptura del material (Grossi y Esbert, 1994; Scherer, 2004; Illescas, 2012).

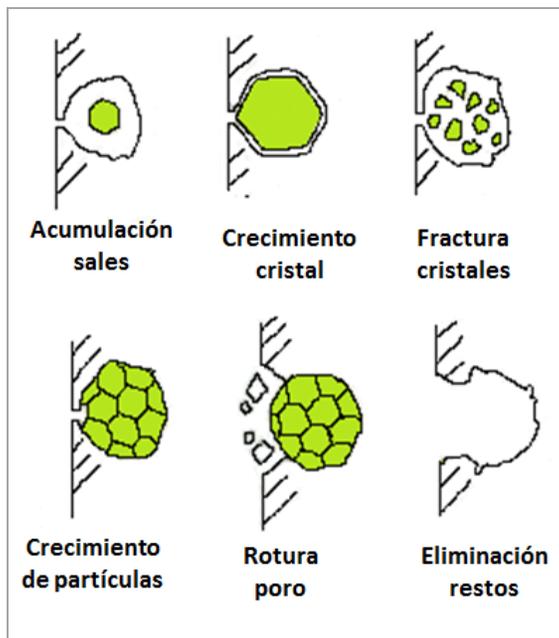


Figura 1-1. Daño por cristalización de sales

Fuente: http://servicios-edificacion.blogspot.com/2011_09_01_archive.html

Con respecto a estos daños, varios investigadores concuerdan que la durabilidad del ladrillo para resistir a estos fenómenos está ligada principalmente a la porosidad total y a la distribución del tamaño de poros (Elert et al, 2003; Cultrone et al 2004; Alexandre y Villegas, 2009, Cultrone y Madkour, 2013).

Investigaciones han demostrado experimentalmente que ladrillos (así como rocas o morteros) con alta porosidad y alto porcentaje de poros entre 1-2.5 μm son más susceptibles a deteriorarse por fenómenos de cristalización de sales y ciclos hielo-deshielo (Maage, 1984; Cultrone et al, 2004; Alexandre y Villegas, 2009). Otras investigaciones han encontrado que la durabilidad de los ladrillos disminuye considerablemente al contar con sustratos con alta porosidad ($\sim 40\%$) y un alto porcentaje de poros ($>60\%$) con

diámetro $< 2\mu\text{m}$. Los ladrillos con mayor nivel de vitrificación desarrollan mayores resistencias a compresión y son capaces de soportar los deterioros por los ensayos de alteración. Los resultados indican que para determinar la durabilidad en los ladrillos es conveniente medir al menos estos tres parámetros (Elert et al, 2003).

En la actualidad, la consolidación, es la técnica más utilizada en el campo de la conservación y rehabilitación de edificaciones para disminuir la permeabilidad y aumentar la resistencia mecánica de sustratos porosos como el ladrillo (Zárraga et al, 2006).

1.2 Consolidación: técnica de rehabilitación de materiales cerámicos

La consolidación es un proceso activo y consiste en impregnar en los sustratos cerámicos deteriorados, sustancias químicas penetrantes, para restablecer la cohesión y resistencia que con el tiempo y los factores ambientales se han ido perdiendo (Zárraga et al, 2006).

La consolidación reduce la permeabilidad para disminuir la susceptibilidad al ataque químico del agua y sustancias químicas agresivas. Asimismo, busca adherir las capas alteradas y granos de minerales sueltos con el sustrato sano para mejorar la resistencia mecánica para soportar los esfuerzos originados por los procesos de alteración mecánicos (Zárraga et al, 2010; Tulliani et al, 2011; Ferreira y Delgado 2012; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013).

1.2.1 Generalidades

Entre las características que debe cumplir un consolidante se encuentran (Ferron, 2007; Illescas, 2012):

- Capacidad consolidante: la efectividad del consolidante está condicionada por propiedades y tipo de sustrato, características del consolidante, procedimiento de aplicación, cantidad de producto aplicado y retenido en el material tratado, condiciones ambientales, entre otras.
- Profundidad de penetración: depende de características microestructurales del material tratado (especialmente tamaño de poro), de propiedades intrínsecas de los productos (tensión superficial, peso molecular, viscosidad) y del método de aplicación.
- Capacidad de transferencia de humedad: se debe permitir el paso de vapor de agua a través del sustrato para impedir la acumulación de agua y sales en determinadas zonas.
- Compatibilidad con el sustrato: evitar la formación de compuestos nocivos que puedan reaccionar con los componentes del sustrato o que puedan afectar a su estructura cristalina. Desde el punto de vista físico, las propiedades del sustrato consolidado deben ser similares a las del sustrato sin tratar, con el fin de que no se creen tensiones entre la capa tratada y el sustrato interno.
- Compatibilidad de aspecto: evitar los cambios de color o de brillo a causa de un tratamiento. El aspecto superficial tampoco debe alterarse significativamente con el

paso del tiempo por efecto de los agentes ambientales, especialmente la radiación ultravioleta.

Por otro lado, muchos productos utilizados como consolidantes, poseen también propiedades hidrorrepelentes, lo que les confiere un efecto protector. Sin embargo, aunque utilizando un mismo consolidante se pueden obtener ambos efectos, se debe tener presente que el objetivo de la consolidación es distinto al de un hidrorrepelente.

Es importante señalar que los materiales constituyentes de la edificación expuestos a la atmósfera suelen presentar una superficie alterada más porosa que las partes internas. Así que se debe cuidar de no producir fuertes discontinuidades en las propiedades de los materiales tratados con respecto al sustrato no alterado y lograr una transición gradual entre ambas zonas (ver Figura 1-2). Por esto, es que algunos investigadores consideran a la consolidación uno de los tratamientos de conservación más riesgosos debido a su irreversibilidad independiente del producto utilizado y la probabilidad de causar efectos no deseados, como es la pérdida de la superficie que se debe conservar (De Clercq et al, 2007; Ferreira y Delgado, 2008; Maravelaki-Kalaitzaki, et al 2008; Matziaris et al, 2011; Tulliani et al, 2011).

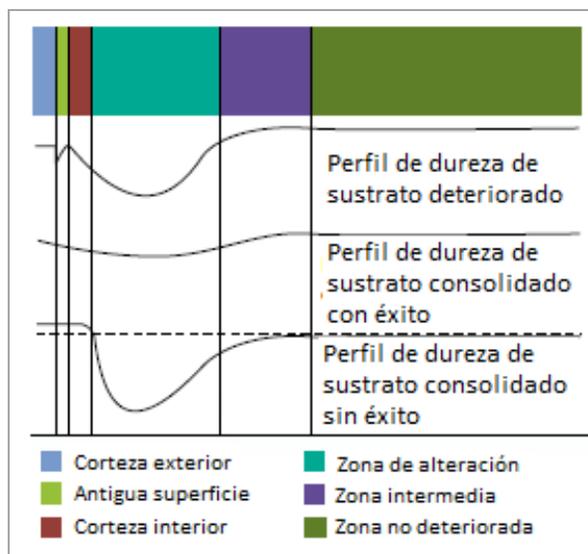


Figura 1-2. Perfil de dureza de un sustrato alterado, consolidado con y sin éxito
 Fuente: Wacker Chemie

De ahí la importancia de realizar estudios en el material a consolidar con el fin de conocer la compatibilidad con el consolidante a colocar y de esta forma evitar un efecto indeseado en el material. En general se sugiere que la evaluación previa de los diferentes tratamientos de consolidación, sea un paso esencial en cada proyecto y debe basarse en el seguimiento sistemático de las propiedades cuantitativas de las muestras tratadas.

Para evaluar la compatibilidad con el tratamiento consolidante se deben tomar en cuenta los parámetros del material sin alterar (composición mineralógica, porosidad total, permeabilidad al vapor de agua, capilaridad, color, contenido en sales, distribución de tamaño de poro), parámetros propios del consolidante (composición química, viscosidad, tensión superficial y capacidad de impregnar) y parámetros del material consolidado (resistencia mecánica, permeabilidad al vapor de agua, capilaridad, expansión hídrica, coeficientes de expansión térmica, cambios de color) (Illescas, 2012).

Entre los consolidantes con mayor éxito para tratar materiales silíceos como el ladrillo se encuentran los consolidantes organosilíceos.

1.2.2 Consolidantes organosilíceos

Llevan silicio en su composición, el cual al igual que el carbono tiene la propiedad de unirse a sí mismo, formando una estructura reticular y posibilitando la formación de compuestos inorgánicos análogos a los orgánicos (Esbert et al, 1997).

Su nombre se debe a que son compuestos orgánicos que precipitan productos inorgánicos (SiO_2) por medio de reacciones químicas con los sustratos a los cuales son colocados. Se incluyen dentro de esta categoría los silanos, alquilsilanos, alcoxisilanos, alquialcoxisilanos y siliconatos.

Los silanos (SiH_4) son los compuestos más simples, en cuya composición intervienen el hidrógeno y el silicio tetravalente. Cuando los hidrógenos del silano se sustituyen por grupos alcoxi $-(\text{OC}_n\text{H}_m)$, el producto se denomina alcoxisilano. Estos últimos son también conocidos como ésteres de ácido silícico o silicatos de etilo (Esbert et al, 1997). El silicato de etilo más utilizado en la consolidación de materiales es el tetraetoxisilano que se abrevia como TEOS ($\text{Si}-(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) (Ferreira y Delgado, 2008; Sandrolini et al, 2012).

Cuando los hidrógenos están sustituidos por grupos alcoxilo y alquilo, se obtienen los metiltrimetoxisilanos ($\text{CH}_3\text{-Si}(\text{OCH}_3)_3$) o metiltrietoxisilano MTMOS ($\text{CH}_3\text{-Si}-(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$),

que también son utilizados frecuentemente en la consolidación de materiales pétreos como hidrofugantes.

La humedad ambiental es suficiente para que la hidrólisis de monómeros de alcoxisilanos ocurra espontáneamente (sin ayuda de catalizadores), dando como resultado un producto estable que forma enlaces silicio-oxígeno, de naturaleza similar a los existentes en los silicatos. Esto sucede mediante el proceso sol-gel que consiste en tres etapas principales: hidrólisis, condensación y gelación.

En la hidrólisis, la unión entre el silicio y el grupo que es susceptible al agua $-(OC_2H_5)_4$, se rompe. Este es remplazado por grupos hidroxilos $-(OH)$ desprendiendo alcohol y formando los silanos. Esto se observa en la Figura 1-3.

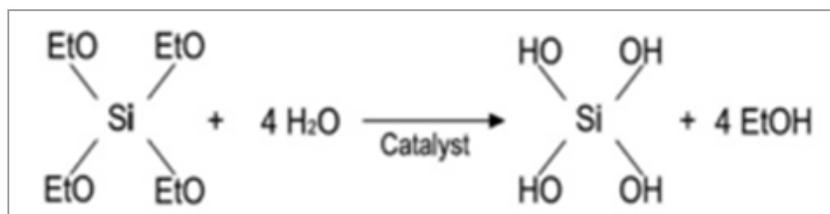


Figura 1-3. Hidrólisis del silicato de etilo en presencia de agua (Sandrolini et al, 2012)

La hidrólisis está fuertemente influenciada por la humedad relativa del ambiente. Bajo condiciones de alta humedad relativa la hidrólisis es rápida y completa, pero la polimerización es escasa debido a la presencia de grupos Si-O-H residuales; esto ocasiona que el producto se fracture.

Por otro lado, bajo condiciones de humedades relativas bajas, la hidrólisis es lenta. Sin embargo, no quedan grupos Si-OH residuales, por lo que se logra una buena polimerización y resulta en un producto final sin fracturas y con aspecto vidrioso (Sandrolini et al, 2012). Sin embargo, se genera alta evaporación del monómero reduciendo la cantidad final de polímero que precipita en el sustrato.

La naturaleza y concentración del catalizador condiciona la velocidad de hidrólisis y por lo tanto la eficacia del tratamiento. En general la hidrólisis es relativamente lenta, por lo que el efecto consolidante tarda unas semanas. Esto es una ventaja ya que pueden eliminarse fácilmente los residuos superficiales antes de que se produzca la precipitación del Si(OH)_4 . En la condensación, el grupo hidroxilo de los silanos formados reacciona con grupos -OH del sustrato generando la pérdida de moléculas de agua. Posteriormente, en la gelación se produce la unión química entre los átomos de silicio del consolidante y los átomos de oxígeno del sustrato mediante enlaces electrostáticos lo que hace que se deposite SiO_2 amorfo en el material (Sandrolini et al, 2012). Esto se aprecia en la Figura 1-4.

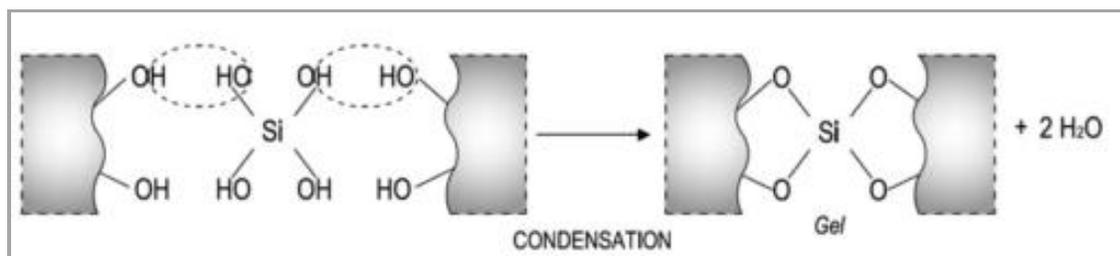


Figura 1-4. Condensación y gelación de los silanos (Sandrolini et al, 2012)

Esto forma una red polimérica de sílice, debido a la condensación de los grupos silanos con otros monómeros y oligómeros de silicio presentes en la solución y con grupos hidroxilo existentes en los silicatos (Illescas, 2012).

Sin embargo, muchas aplicaciones de alcoxisilanos como consolidantes han proporcionado resultados muy diversos por varios motivos: variaciones en los métodos de aplicación, fluctuaciones en la humedad relativa (HR) y el contenido de humedad en las rocas y variaciones en la estructura y composición de los materiales (Silva et al, 2000).

Con objeto de evitar el efecto de la humedad sobre el proceso de gelificación, se añaden catalizadores al producto comercial para acelerar la polimerización y así evitar la excesiva pérdida de monómeros en condiciones de baja humedad relativa. No obstante, el efecto de estos catalizadores sobre la estabilidad y la estructura del producto final han sido poco estudiados. Además, los alcoxisilanos utilizados como consolidantes de material, se suelen aplicar a la intemperie en condiciones no controlables, de tal manera que estos productos se someten a gradientes de humedad. En esta misma línea, Silva et al, (2000) evaluaron la eficacia de diferentes productos consolidantes e hidrofugantes sobre substratos graníticos húmedos que contienen cierta cantidad de sales solubles. Concluyeron que la presencia de sales o agua, modificaba sensiblemente la velocidad de polimerización de los productos.

Otro problema que se nombra en la literatura es la formación de fisuras y fracturas en el consolidante durante la etapa de secado (Mosquera et al, 2003; Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008). Zárraga et al (2010) y Tulliani et al (2011) indican que estas fisuras pueden

provocar una red secundaria de poros empeorando el envejecimiento y deterioro del material.

Sin embargo, Brus y Kotlik (1996), previamente habían determinado que los productos preparados por casas comerciales como Wacker OH 100, eran estables en el tiempo y generaban poco agrietamiento. Asimismo otros investigadores han utilizado consolidantes con el mismo principio activo, y han obtenido resultados muy efectivos con la consolidación a pesar del agrietamiento del consolidante (Mosquera et al, 2003, Ahmadi, 2008; Alejandre y Villegas, 2009; Cultrone y Madkour, 2013), teniéndose en todos los casos mejores propiedades mecánicas y físicas del material consolidado en comparación con el material inicial.

Finalmente, la literatura destaca que la consolidación con silicatos de etilo, suele dar buenos resultados en materiales con importantes fases silíceas (Zinsmeister et al. 1988; Saleh et al, 1992; Grisafe, 2002; Zárrega et al, 2006; Doehene y Price, 2010; Zárrega et al, 2010; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013), sin embargo, en aquellos que presentan carbonatos, el comportamiento del consolidante no resulta tan efectivo (Esbert y Díaz-Pache, 1993; Luque et al, 2008; Ferreira y Delgado, 2012).

Esto a causa de una escasa adherencia por la ausencia de un enlace químico entre los grupos silícicos del consolidante y el carbonato cálcico de las calizas y mármoles (Zárrega et al, 2006; Ferreira y Delgado, 2012; Sandrolini et al, 2012). Otros autores explican que el carbonato cálcico hace más lenta la reacción de condensación debido a su carácter básico,

promoviéndose la evaporación de los monómeros más volátiles antes de que ocurra el proceso de gelificación en los poros de la roca. Además, la ausencia de suficientes grupos Si-OH en la superficie del material calcáreo impide que se produzcan reacciones de condensación entre los alcoxisilanos y el sustrato (Kronkright, 2007; Illescas, 2012).

1.2.3 Métodos de aplicación del silicato de etilo

Estudios indican que existe una relación entre el tipo de consolidante a colocar, el sustrato a intervenir y el procedimiento de aplicación (Ferreira y Delgado, 2008; Illescas, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). La eficacia de una intervención de consolidación depende en gran medida de la profundidad de penetración del producto y de la distribución dentro de la estructura porosa. Asimismo, investigaciones indican como conveniente una penetración mínima de 2 cm con la aplicación del consolidante (Delgado Rodrigues y Grossi, 2007) para evitar la formación de fuertes diferencias en la proporción de consolidante localizado en el interior del material tratado (Figura 1-2).

En cuanto a métodos de colocación, no existe un protocolo de colocación específico, sino que esto ha quedado más a la experiencia personal del investigador. Diferentes métodos de colocación se han estudiado en el laboratorio con el fin de representar lo mejor posible las condiciones del material en la estructura y poder aplicarlos a los casos de terreno.

Por ejemplo en el laboratorio, la literatura ofrece investigación sobre diferentes métodos de colocación como: inmersión total (Silva et al, 2000; Casanova, 2005) o por absorción capilar (Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008; Ferreira y Delgado, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). Algunos autores han establecido la idoneidad del método de absorción capilar en piedras calizas sobre los demás logrando mayor deposición de SiO_2 en la matriz (Ferreira y Delgado, 2008). Sin embargo, a la fecha no existe un estudio sistemático y específico de la influencia del protocolo de aplicación en el desempeño de la consolidación obtenida en el sustrato.

Por otro lado, en los tratamientos realizados “in situ” es más difícil obtener una buena profundidad de penetración, ya sea por las dimensiones del objeto o por la dificultad de mantener en contacto durante un tiempo suficiente al material con el consolidante. Al día de hoy, no se cuenta con suficiente información que permita evaluar completamente el rendimiento del silicato de etilo en terreno (Sandrolini, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). Esto debido a las variaciones presentes en el material con la humedad, temperatura, así como la dificultad para garantizar una penetración homogénea y uniforme en el material consolidado.

Los métodos más comunes para la colocación del consolidante “in situ” son mediante la utilización de brocha o aplicación con rociador (Cultrone et al, 2003; Ferron, 2007). Sobre esta línea, se encuentra información respecto a la utilización de la brocha en la consolidación de materiales cerámicos (Esbert y Díaz-Pache, 1993; Ferreira y Delgado, 2012; Prudêncio et al, 2012) y en otros casos la utilización de rociadores (Illescas, 2012).

Encontrándose, menor penetración en los materiales analizados al colocar el consolidante con brocha que con otros métodos de impregnación utilizados en laboratorio (absorción capilar, inmersión total).

Prudêncio et al. 2012, establecieron a la brocha como buen método de aplicación del consolidante, no solo porque se puede aplicar en la práctica, sino también porque es posible controlar la cantidad de producto que se coloca en el material.

Para determinar el potencial consolidante entre un sustrato-consolidante, Ferreira y Delgado (2012), encontraron que en rocas, la brocha no es un método confiable. Esto porque en su estudio la aplicación con brocha logró la menor penetración (2 cm) y menor profundidad de la acción de fortalecimiento. Sin embargo, establecen que después de comprobar la efectividad del consolidante de estudio mediante algún método confiable de aplicación en el laboratorio (absorción capilar), es posible utilizar la brocha como método comparativo de estudio “in situ”.

1.2.4 Resultados de consolidación utilizando silicato de etilo

En esta sección se enfocará en las técnicas de caracterización utilizadas para determinar los cambios generados por la aplicación del consolidante y el comportamiento reportado en la literatura del consolidante en el ladrillo.

a. Técnicas de caracterización de materiales y ensayos efectuados

Uno de los principales parámetros de estudio considerados a través de las investigaciones es la caracterización mineralógica de los sustratos a través de Difracción de rayos X (XRD) (Cultrone et al, 2003; López-Arce, 2004; Ferron, 2007; Ferreira y Delgado, 2008; Alexandre y Villegas, 2009; Cultrone y Madkour, 2013). La Fluorescencia de rayos X (XRF), ha sido utilizada como complemento en la caracterización de las muestras, para estudiar la composición química (López-Arce, 2004; Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008)

Asimismo, para evaluar el desempeño del silicato de etilo en el sustrato se han estudiado propiedades como: dureza superficial, resistencia a la abrasión, resistencia a flexión, resistencia compresión, velocidad de ultrasonido y módulo de elasticidad (Zinsmeister et al, 1988; Silva et al, 2000; Casanova, 2005; Kronkright, 2007; Ferreira y Delgado, 2008; Matziaris et al, 2011; Ferreira y Delgado, 2012, Illescas, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). También se han medido las variaciones que presenta el sustrato en sus propiedades físicas como porosidad total, coeficiente de absorción capilar, velocidad de secado, colorimetría, densidad real y aparente (Silva et al, 2000; Cultrone et al, 2003; Casanova, 2005; Ferreira y Delgado, 2008; Cultrone y Madkour, 2013).

La distribución del tamaño de radio de poro y tamaño de radio de poro promedio, son parámetros que ha sido estudiado también y determinado mediante Porosimetría de Inyección de Mercurio (MIP), en una amplia cantidad de estudios (Durán, 1995; López-

Arce, 2004; Cultrone et al, 2004; Luque et al, 2008; Illescas, 2012; Cultrone y Madkour, 2013).

La interacción química entre el consolidante y el sustrato ha sido identificada por Espectroscopía Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) (Maravelaki-Kalaitzaki, 2008; Sandrolini et al, 2012). Asimismo, la morfología del sustrato y precipitación del consolidante se ha logrado identificar por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (Durán, 1995; Grissom et al, 1999; Cultrone et al, 2003; Ahmadi, 2008; Luque et al, 2008; Alejandre y Villegas, 2009; Cultrone y Madkour, 2013).

b. Consolidación en el ladrillo

En cuanto a investigaciones que reportan la aplicación del silicato de etilo en el ladrillo, Cultrone et al (2003) fabricaron especímenes a 900°C con arcilla silíceo y aditivos como calcita, dolomita o sal. La aplicación del consolidante se realizó por inmersión total durante 10 minutos. Los resultados de porosidad abierta, arrojaron una disminución máxima de 9.1% para especímenes con menor porosidad abierta (38.2%), sin calcita y con vitrificación, y una disminución mínima de 2.8% para especímenes con mayor porosidad (40.8%) y presencia de calcita. La interconexión de poros disminuyó 10.1% para especímenes vitrificados y 1.7% para especímenes con calcita. La cantidad de consolidante retenido fue mayor para los especímenes más vitrificados y menos porosos. No se cuantificó la cantidad inicial de consolidante aplicado.

Alejandre y Villegas (2009), consolidaron especímenes calcáreos por inmersión total durante 20 minutos y lograron una ganancia de peso final en los especímenes entre 1.8 y 1.9%. Los resultados arrojaron una disminución en la porosidad abierta entre 4.3% y 4.6%. Reportaron bajas ganancias en dureza superficial Brinell (0.3 a 1.6%) y no identificaron ganancias en resistencia mecánica. La absorción capilar disminuyó un 10% en el caso más desfavorable, y un 15% en el caso más favorable. Asimismo, se disminuyó los poros ubicados en el rango entre 0.01 a 0.1 μm (de 90 a 50 mm^3/g). El ensayo de cristalización de sales arrojó más daños en el ladrillo con más contenido calcáreo, y se presume que la presencia de calcita en el sustrato generó menor adherencia sustrato-consolidante.

Cultrone y Madkour, 2013, fabricaron especímenes silíceos donde se estudió el efecto del consolidante y un hidrófugo mediante succión capilar en 3 ciclos de 2 horas cada uno, con un plazo de media hora entre ciclos. Los especímenes lograron una ganancia de peso final en los especímenes de un 8.9% y disminuyeron la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos y la porosidad abierta en 12.2% y 27.6%, respectivamente. Asimismo, la absorción de agua se disminuyó en un 31% y el coeficiente de capilaridad en un 55% (0.20 a 0.11). En cuanto a distribución del tamaño de poros, se redujo en un 10.5% el porcentaje de poros ubicados entre 0.01 μm a 0.1 μm y en un 0.5% los poros ubicados entre 1 a 10 μm , pero se aumentó en un 10.5% los poros que se encontraban entre 0.1 a 1 μm . Este fenómeno puede deberse al desarrollo de microgrietas en el consolidante mientras este polimeriza en los capilares. No se contabilizó la cantidad de consolidante aplicado ni remanente en la matriz cerámica.

En Chile, Casanova (2005) estudió el desempeño del consolidante Silres BS OH 100 en ladrillos de la Iglesia de San Francisco en Valparaíso que presentaban problemas de desprendimiento. La aplicación se realizó mediante inmersión total durante diferentes tiempos (1, 6, 12, 24, 48 y 72 horas). Se obtuvo que la inmersión por 12 horas arrojó los resultados más favorecedores: disminución de 78% en succión capilar; aumento de 67% en resistencia a compresión y aumento de 36% en resistencia a flexión. Se logró un aumento de 138% en el módulo de elasticidad. En este estudio no cuantificó la cantidad de consolidante absorbido ni retenido, por lo que no es posible a partir de sus resultados cuantificar el rendimiento del producto.

Finalmente, se ha encontrado proyectos a nivel mundial donde se ha utilizado el silicato de etilo para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo, como por ejemplo: Iglesia de Santa Maria de Jesus (Sevilla), el Castillo de San Romualdo (San Fernando, Cádiz), la Pinakoteca Alte International (Munich), la iglesia memorial Kaiser-Wilhelm (Berlín) y el Palazzo Bocchi (Bologna). De los resultados de estos proyectos luego de efectuar el tratamiento de consolidación, no se presenta información que relacione para las dosis aplicadas, las ganancias en propiedades físicas y mecánicas, lo que redundaría en la falta de información necesaria al día de hoy para aplicar de forma eficiente y eficaz el tratamiento de consolidación.

2 PROPUESTA DEL TRABAJO A REALIZAR

2.1 Antecedentes

El concepto de patrimonio está ligado a la herencia que un pueblo transfiere a través de las generaciones, enriqueciendo los rasgos culturales de una comunidad y otorgándole las referencias para su quehacer actual, permitiendo una proyección a futuro (Casanova, 2005). En cuanto al patrimonio arquitectónico, los primeros pactos internacionales como la Carta de Atenas (1931) hasta las últimas convenciones como la Carta ICOMOS para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural (2008) han creado consciencia a nivel mundial sobre la importancia que posee para la humanidad la preservación, mantenimiento y rehabilitación de este patrimonio edificado (López-Arce, 2004; Casanova, 2005).

La intervención en las edificaciones patrimoniales, implica un trabajo complejo y delicado que debe estudiarse detenidamente (López-Arce, 2004). Esto debido a la dificultad que genera enfrentarse a materiales muchas veces de propiedades desconocidas, sistemas constructivos particulares, imposibilidad de realizar ensayos destructivos sobre la estructura, y la mínima intervención o impacto visual que se exige sobre ellas.

Las edificaciones de carácter patrimonial se caracterizan por ser soluciones constructivas que se materializaron con sistemas constructivos que no se utilizan actualmente como la

albañilería de piedra, adobe, bahareque o mediante soluciones particulares en madera, albañilería de ladrillo, acero, hormigón, además del uso de cal y yeso como aglutinantes y productos de terminación (Casanova, 2005).

Actualmente, en Santiago de Chile el ladrillo es el principal material constituyente de sus edificaciones históricas, abarcando como se observa en la Figura 2-1, el 70% de los Inmuebles de Conservación Histórica de Santiago (Municipalidad de Santiago, 2012).

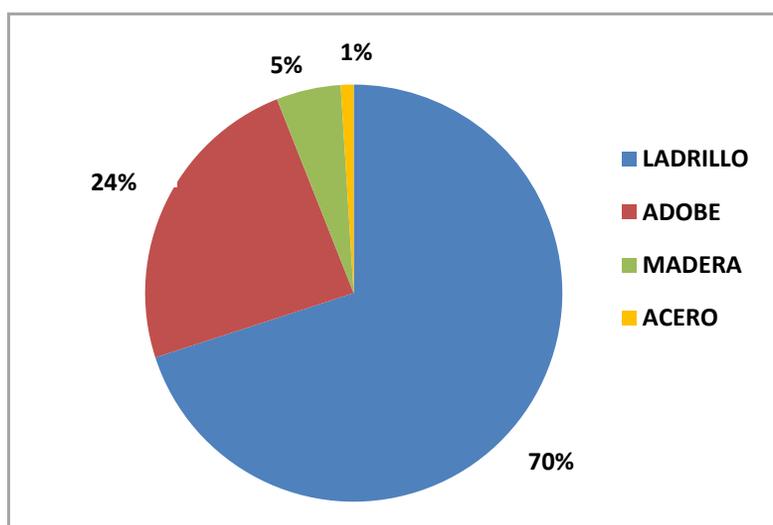


Figura 2-1. Materialidad de los Inmuebles de Conservación Histórica en Santiago (Adaptado de información entregada por la Municipalidad de Santiago, 2012)

Estos antecedentes hacen relevante el estudio de este material constructivo a la hora de intervenir edificaciones patrimoniales en Santiago. La mayor permeabilidad y menor resistencia mecánica son desventajas del ladrillo, con respecto a otros materiales

constructivos, como el hormigón o acero hacen que sea más susceptible al deterioro ante la acción de agentes químicos, físicos y biológicos.

Con el fin de proteger al ladrillo de las agresiones, existen diversas técnicas de intervención como limpieza, consolidación, hidrofugación, sustitución de piezas, complementación de piezas y reparación de juntas y fisuras (Durán, 1995; Cultrone et al, 2007; Fort, 2007). De éstas, la consolidación es la técnica más utilizada en el campo de la rehabilitación de materiales cerámicos como el ladrillo (Zárraga et al, 2006). La consolidación consiste en aplicar en los materiales cerámicos deteriorados polímeros impregnantes para adherir capas alteradas y granos de minerales sueltos con el sustrato sano, reducir la permeabilidad y mejorar la resistencia mecánica (Zárraga et al, 2010; Tulliani et al, 2011; Ferreira y Delgado 2012; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). Los consolidantes se clasifican en cuatro grupos: inorgánicos, orgánicos, organosilícicos y biológicos (ver anexo 1). En la actualidad los consolidantes organosilícicos, donde sobresalen el silicato de etilo, han sido implementados exitosamente para tratar materiales constructivos con altos contenidos de sílice como tobas, areniscas, ladrillos y terracotas, con los que posee una gran afinidad.

En cuanto a métodos de colocación del silicato de etilo, no existe un protocolo de colocación específico, sino que esto ha quedado más a la experiencia personal del investigador. La literatura ofrece investigación sobre métodos de colocación en laboratorio como: inmersión total (Silva et al, 2000; Casanova, 2005) o por absorción capilar (Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008; Ferreira y Delgado, 2012; Cultrone y Madkour, 2013) y métodos de la colocación del consolidante “in situ” mediante la utilización de brocha

(Ferron, 2007; Ferreira y Delgado, 2012; Prudêncio et al, 2012) o aplicación con rociador (Cultrone et al, 2003; Luque et al, 2008; Illescas, 2012), especialmente para materiales como roca o adobe. Sin embargo, la información de consolidaciones efectuadas con silicato de etilo en ladrillos es bastante limitada. Se conoce de pocos estudios internacionales que estudien el desempeño del silicato de etilo en el ladrillo: Cultrone et al, 2003, Alexandre y Villegas 2009, Cultrone y Madkour, 2013, así como nacionales, Casanova (2005). La información reportada en estos estudios, es insuficiente para establecer estudios sistemáticos y específicos de la influencia de la dosis y el protocolo de aplicación en el desempeño de la consolidación en el ladrillo. De esta forma usar el tratamiento de consolidación de forma efectiva y eficiente.

2.2 Definición del problema

Actualmente, se conoce el buen desempeño del silicato de etilo para consolidar materiales silíceos como el ladrillo. Sin embargo, la investigación desarrollada con respecto al uso de silicato de etilo este tipo de materiales constructivos, no ha podido relacionar la dosis de consolidante en función de variables de respuesta de interés post consolidación: disminución de permeabilidad y aumento en propiedades mecánicas. Esto limita la posibilidad de utilizar más acertadamente esta técnica, no sólo por aspectos económicos, sino por la falta de información relevante para su uso eficaz y eficiente en el sustrato a tratar. Asimismo, la determinación de un método de aplicación “in situ” idóneo, es información valiosa para la óptima aplicación de la técnica.

2.3 Hipótesis experimental

Las hipótesis experimentales de la investigación son:

- “Tanto la porosidad abierta como el tamaño, distribución e interconexión de poros tienen relación directa sobre la efectividad de la dosis total de consolidante a utilizar”
- “La brocha es un método de aplicación “in situ” más idóneo que el rociador, ya que favorece el contacto y colocación homogénea entre consolidante y material cerámico”
- “La re-impregnación de un material previamente consolidado permite reducir la permeabilidad y aumentar propiedades mecánicas debido a la alta evaporación del consolidante, aumentando con ello la efectividad del tratamiento”.

2.4 Objetivos y alcances de la investigación

2.4.1 Objetivo principal

El objetivo de esta investigación, consistió en establecer, a partir del método científico y una metodología experimental, la relación entre la dosis de consolidante (silicato de etilo) con las variaciones físicas y mecánicas detectadas en el material mediante distintos

métodos de aplicación en el laboratorio. Esto con el fin de evaluar su efectividad para reducir la permeabilidad y aumentar las propiedades mecánicas. De esta forma facilitar su uso efectivo y eficiente.

2.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del tipo de microestructura en la efectividad de la dosis total de consolidante a utilizar, en términos de reducción de permeabilidad y aumento de propiedades mecánicas en el ladrillo.

- Evaluar el efecto del método de aplicación “in situ” en la efectividad del silicato de etilo como consolidante para reducir la permeabilidad y aumentar las propiedades mecánicas del ladrillo.

- Evaluar el efecto de la re-impregnación en la reducción de la permeabilidad y aumento de propiedades mecánicas de materiales previamente consolidados.

- Establecer relaciones entre las propiedades de los ladrillos calcinados (mineralogía, físicas, mecánicas) con las dosis de consolidante aplicadas y el efecto consolidante.

2.4.3 Alcances

Esta investigación se enfocó en el estudio del comportamiento del silicato de etilo, SILRES OH 100 para la consolidación del ladrillo en Santiago de Chile. El objetivo fue estudiar la rehabilitación de este material constructivo. En la fabricación del ladrillo, se utilizaron dos materias primas: arcilla común y caolín y un rango de temperaturas ubicadas entre los 800°C a 1000°C, siendo estas temperaturas esperables en la realización de ladrillos. Tanto los métodos de aplicación de laboratorio y métodos de aplicación “in situ” se realizaron en el laboratorio con condiciones controladas de temperatura y humedad (20°C/50%HR). Con el fin de entender claramente el comportamiento del consolidante en el ladrillo y debido a la alta variabilidad de los morteros propios de edificaciones históricas, éstos quedaron fuera del análisis realizado.

2.5 Metodología

La metodología empleada en esta investigación, consistió de tres etapas que se representan en el diagrama de flujo en la Figura 2-2. Las etapas realizadas fueron las siguientes:

1. Revisión del estado y de la práctica: Para esto, se efectuó una revisión de los consolidantes utilizados en la actualidad y los métodos de aplicación. En paralelo se realizó un estudio de la materialidad de los edificios patrimoniales en Santiago, con el fin de enfocar la investigación a la materialidad predominante en estos edificios y generar un aporte significativo en el tema de preservación, mantenimiento y rehabilitación.

2. Diseño experimental: En el diseño experimental se definieron las siguientes variables dependientes de estudio: permeabilidad (porosidad abierta, interconexión, distribución y tamaño de poro), resistencia mecánica (dureza superficial, resistencia a compresión y flexión) y color. Las variables independientes fueron: el consolidante a utilizar, el tipo de espécimen fabricado y el método de aplicación del consolidante (laboratorio o “in situ”). Para la fabricación de los especímenes se utilizaron 3 niveles de temperatura de calcinación y 3 contenidos de caolín en la mezcla de arcilla. Asimismo, se realizaron 12 especímenes de cada mezcla estudiada (3 repeticiones por variable dependiente de estudio). Se utilizó condiciones controladas de temperatura y humedad relativa en el laboratorio para ubicar a los ladrillos calcinados. Finalmente, para evaluar la efectividad del consolidante, se relacionó la dosis aplicada en función de las variables dependientes pre y post consolidación.

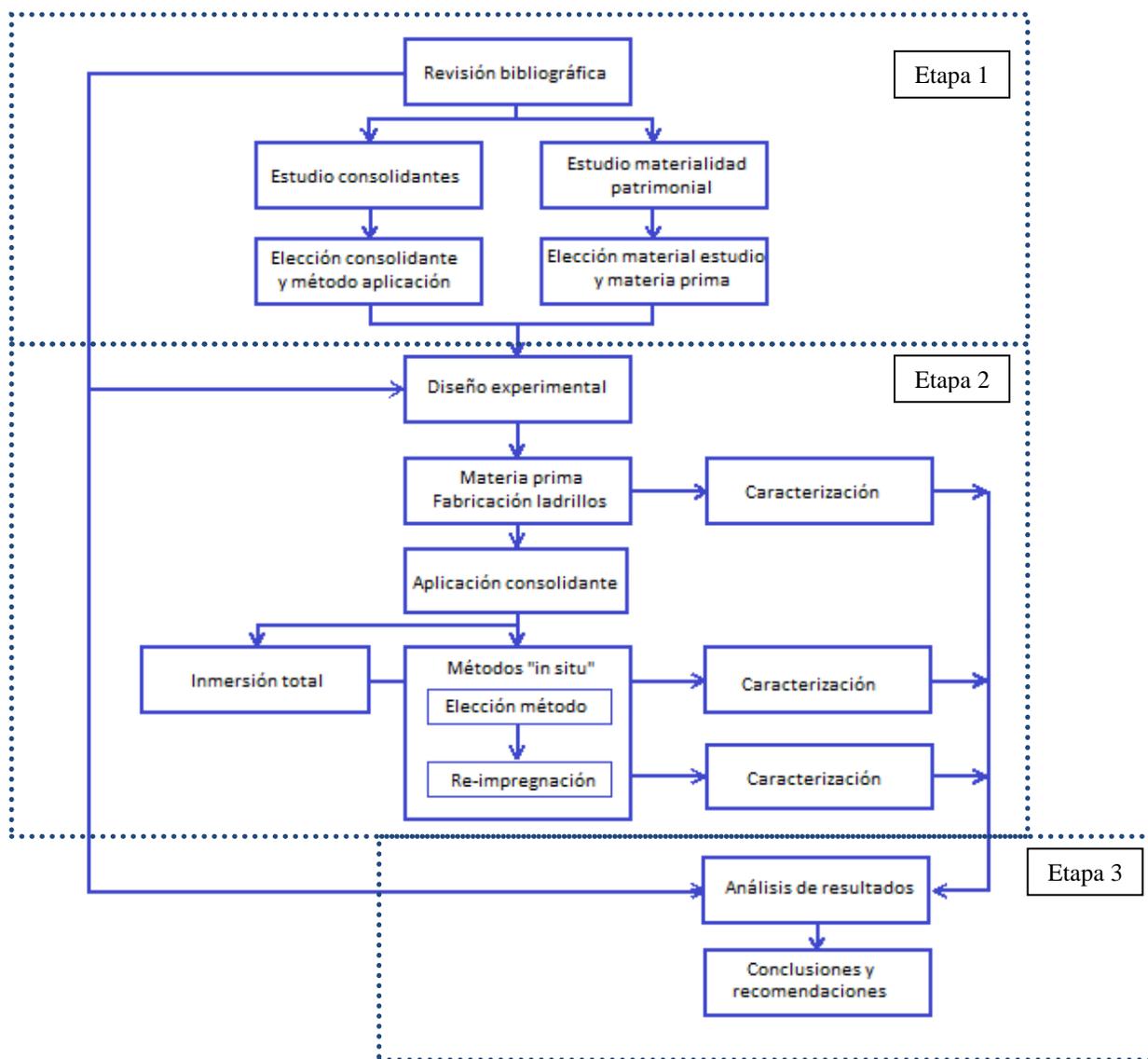


Figura 2-2. Diagrama de flujo del trabajo realizado

3. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

El análisis de resultados se basó en la aplicación de estadística descriptiva para determinar valores atípicos y análisis de comparación de diferencia de medias para determinar incrementos en propiedades físicas y mecánicas estadísticamente

significativos. Con estos resultados se procedió a realizar conclusiones y recomendaciones de la investigación.

2.6 Diseño experimental

El diseño experimental de este trabajo está constituido por dos fases de trabajo las cuales se mencionan a continuación:

- Caracterización de arcillas y fabricación de especímenes en el laboratorio
- Aplicación del consolidante: inmersión total y métodos de aplicación “in situ”

2.6.1 Caracterización de arcillas y fabricación de especímenes en el laboratorio

El objetivo de esta fase es establecer un protocolo de caracterización de las materias primas y especímenes fabricados.

Para la realización de esta fase, se utilizará arcilla común y caolín proporcionadas por la empresa Industrias Princesa Ltda. Para caracterizar química y mineralógicamente las arcillas se utilizará Fluorescencia de Rayos X (XRF) y Difracción de Rayos X (XRD).

Posterior a la caracterización de las arcillas, se procederá a fabricar especímenes de 4x4x16cm, según las proporciones y temperaturas que se indican en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Factorial a estudiar para contenido de caolín en la mezcla y temperaturas de calcinación a utilizar

Variables de estudio	Contenido de caolín en la mezcla (%)		
	0	10	20
Temperatura de calcinación (°C)			
800	----	L10-800	---
900	L0-900	L10-900	L20-900
1000	---	L10-1000	---

Nomenclatura LX-YYY, donde L indica ladrillo, X porcentaje de caolín y YYY temperatura de cocción.

Con información obtenida de análisis mineralógico de ladrillos de edificios patrimoniales en Santiago de Chile (anexo 6.5.3), se encontró como principales minerales: cuarzo, plagioclasas y hematita. Se espera que el espécimen 900°C y 10% de contenido de caolín presente una composición mineralógica similar, por lo que será el espécimen principal de estudio. Esto para correlacionar los resultados de esta serie con resultados esperados en ladrillos de edificios patrimoniales.

Las mezclas no presentadas en el factorial, se deben a que presentaron problemas por baja resistencia mecánica: 800°C con 0% caolín y 800°C con 20% caolín y por fisuración debido a altas temperaturas: 1000°C con 0% caolín. El espécimen de 1000°C con 20% de caolín quedó fuera de análisis por ser un espécimen poco comparable con los ladrillos pertenecientes a los de edificaciones patrimoniales.

En estos especímenes se estudiarán la composición mineralógica (XRD) y química (XRF). Como complemento a la caracterización química se utiliza Espectroscopía Infrarroja de

Transformada de Fourier (FTIR) con el fin de comparar los grupos funcionales (compuestos) en los diferentes especímenes.

Asimismo, se estudiarán las propiedades físicas: densidad real (ρ_r) y aparente (ρ_a), porosidad abierta (P_a), interconexión de poros (I_p), porcentaje de saturación a presión atmosférica (S), coeficiente de absorción capilar (C_c), color (C) y las propiedades mecánicas: resistencia a flexión (R_f), resistencia a la compresión (R_c) y dureza superficial (D_s). La morfología y textura de cada serie fabricas será observada mediante la utilización de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX). Por último la distribución y tamaño de poro se determinarán por Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP) para las series L10.

2.6.2 Aplicación del consolidante: inmersión total y métodos de aplicación “in situ”

El objetivo de esta fase es estudiar la efectividad de la consolidación de los especímenes previamente caracterizados mediante distintos métodos de colocación del consolidante en el laboratorio.

Para esto, los especímenes se colocarán en una cámara climatizada ($T=20^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR}= 50\%$) durante una semana hasta obtener peso constante. Posteriormente, se sumergirán en el consolidante Silres OH de la casa comercial Wacker Chemie, por diferentes períodos, según se observa en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Factorial de propiedades físicas y mecánicas a evaluar, según tiempo de inmersión

Tipo de espécimen	Tiempo inmersión	1h	6h	12h	24h	48h
	L0-900	FTIR, SEM ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds	-----	-----	-----	-----
L10-800	FTIR, SEM, MIP ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds	-----	-----	-----	-----	-----
L10-900	FTIR, SEM, MIP ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S,	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S,	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S,	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S,	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S,
L10-1000	FTIR, SEM, MIP ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds	-----	-----	-----	-----	-----
L20-900	FTIR, SEM ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds	-----	-----	-----	-----	-----

Posteriormente, se determinará el peso final de cada espécimen impregnado y se dejará al consolidante reaccionar por un período de cuatro semanas. Se determinará la cantidad de producto que precipita y las propiedades físicas y mecánicas.

Luego, se aplicará el consolidante mediante tres métodos de aplicación utilizados “in situ”: brocha, rociador manual y rociador a presión. Se utilizará el método que logre el menor desperdicio y que logre un acabado final homogéneo. Con este método, se colocará el consolidante en dos aplicaciones. Una aplicación inicial hasta saturar la superficie y una

segunda aplicación después de 2 horas. Luego de cuatro semanas, se desea repetir el mismo tratamiento. Las propiedades que se estudian luego de estas impregnaciones se presentan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Factorial de propiedades físicas y mecánicas a evaluar según método de aplicación in situ

Método aplicación in situ Tipo de espécimen	Método más eficaz
L0-900	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds
L10-800	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds
L10-900	MIP, ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds
L10-1000	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds
L20-900	ρ_r , ρ_a , Pa, Ip, S, Cc, C Rc, Rf, Ds

2.7 Estructura del documento

La estructura del trabajo de investigación desarrollada fue la siguiente:

- **Capítulo 1:** Contiene la revisión bibliográfica de los antecedentes necesarios para sustentar la información presente en los capítulos 2, 3 y 4.

- **Capítulo 2:** Contiene los antecedentes de la investigación realizada. Incluye el estado del arte y la práctica para definir el problema, así como la hipótesis, objetivos, alcances y metodología realizada en la investigación.

- **Capítulo 3:** Capítulo auto contenido que incluye el artículo científico “Influencia de la microestructura del sustrato en la eficiencia y eficacia de la consolidación con silicato de etilo en ladrillos” enviado al Journal of Construction and Building Materials, con los métodos utilizados, principales resultados obtenidos y referencias utilizadas.

- **Capítulo 4:** Capítulo auto contenido que incluye el artículo técnico “Estudio de la relación dosis-efectividad en la consolidación con silicato de etilo en el ladrillo” a enviarse al Journal of Cultural Heritage, con los métodos utilizados, principales resultados obtenidos y referencias utilizadas.

- **Capítulo 5:** Incluye las conclusiones, recomendaciones obtenidas y propuesta de trabajo futuro.

- **Capítulo 6:** Incluye las referencias utilizadas para la elaboración del documento total e incluye las referencia utilizadas para la elaboración de los artículos técnicos.

3. INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA DEL SUSTRATO EN LA EFICIENCIA Y EFECTIVIDAD DE LA CONSOLIDACION CON SILICATO DE ETILO EN LADRILLOS

Melissa Soto ^a, Patricia Martínez ^a, Mauricio López ^{a*}

^aDepartamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería

Pontificia Universidad Católica de Chile. Vicuña Mackenna 4860, Casilla 30, Correo 22, Santiago, Chile.

*Autor correspondiente

Resumen

La consolidación con silicato de etilo en materiales constructivos como adobe, roca y ladrillo, ha tenido un gran auge en los últimos 50 años. Sin embargo, aún no se ha identificado el efecto que presenta el sustrato cerámico y la dosis de consolidante, en las mejoras en permeabilidad y propiedades mecánicas. Información esencial para diseñar un tratamiento eficiente y efectivo.

Este artículo busca, evaluar la efectividad de la consolidación por medio de la aplicación del consolidante en sustratos de diferente microestructura. Para ello, se fabricaron ladrillos utilizando arcilla común con distintas proporciones de caolín (0, 10 y 20% en peso) y se calcinaron a 800, 900 ó 1000°C. . Éstos se trataron con el consolidante por inmersión a 1 hora y luego se evaluaron efectos en propiedades mecánica y de transporte, color y en cambios químicos. La inmersión total obtuvo retenciones de consolidante entre 4.9 y 5.9%,

que produjeron aumentos en dureza superficial (>40%), resistencia a compresión (>30%), resistencia a flexión (>40%), reducción en propiedades de transporte y variaciones poco significativas en el color. Lo anterior se explica por un cambio en la estructura de poros (6% porosidad, 10% resistividad eléctrica, 10% distribución tamaño de poro) e interacción química entre el sustrato y el consolidante según lo medido con la técnica FTIR.

Palabras claves: Consolidación, silicato de etilo, rehabilitación, propiedades mecánicas, dureza, permeabilidad, porosidad, FTIR, XRD

3.1 Introducción

El ladrillo es uno de los materiales de construcción más antiguos, y aún en nuestros días es muy utilizado en la construcción de edificios contemporáneas, por los bajos costos que poseen la materia prima y el proceso de elaboración (Nayak y Singh, 2007; Cultrone y Madkour, 2013; Görhan y Şimşek, 2013). El estudio de este material es relevante para Santiago de Chile, ya que es el material de construcción predominante de sus edificaciones históricas, especialmente en América Latina como es el caso de Chile (Municipalidad de Santiago, 2012).

Una desventaja que posee el ladrillo con respecto a otros materiales de construcción, es su elevada porosidad abierta. En edificios contemporáneos, la porosidad abierta puede variar entre 11-40% (Straube y Burnett, 2005) y en edificios históricos entre 30 a 48% (Elert et al, 2003). Además dicha porosidad posee considerable interconexión, haciendo posible el

transporte de agua y agentes agresivos a través de su matriz. Entre éstos se encuentran sales, que llegan a cristalizar en la matriz del ladrillo produciendo expansiones, y diferentes gases como SO₂, NO_x, CO₂ (Cultrone et al, 2000; Benavente et al, 2004; López-Arce, 2004). A esto se le suma una baja resistencia mecánica (<20MPa en compresión y <5 MPa en tracción), que lo hace más susceptible a la degradación.

Con el fin de proteger al ladrillo de las sollicitaciones ambientales, existen diversas técnicas de intervención. La consolidación, es actualmente una técnica muy utilizada (Durán, 1995; Cultrone et al, 2007), que busca adherir capas alteradas y granos de minerales sueltos de un sustrato alterado con la matriz sana y mejorar la resistencia mecánica para soportar los procesos de alteración, a través del uso de polímeros sintéticos impregnantes (Zárraga et al, 2010; Sandrolini et al, 2012).

Entre los consolidantes más conocidos se encuentra el silicato de etilo, que ha reportado significativas mejoras en propiedades mecánicas y disminución en propiedades de transporte en materiales constructivos silíceos como tobas, areniscas, granitos y ladrillos (Grisafe, 2002; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013).

No obstante, no ha sido posible identificar relaciones cuantitativas entre dosis de consolidante utilizadas y mejoras en propiedades mecánicas y de transporte en función de las características de la microestructura de un sustrato consolidado. Esto limita la posibilidad de utilizar efectiva y eficientemente esta técnica, no solo por el factor económico sino por la falta de información respecto al desempeño esperado. Este

desempeño está evaluado por la ganancia en propiedades mecánicas y la disminución en permeabilidad.

3.2 Significancia de la investigación

Esta investigación evalúa el efecto del silicato de etilo utilizado como consolidante en ladrillos de arcilla (sustrato) en las mejoras del desempeño mecánico y físico. De esta manera se identifican factores determinantes en la microestructura del sustrato que maximicen el efecto consolidante en las propiedades mecánicas y de transporte lo que permite diseñar el tratamiento de consolidación con silicato de etilo.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Preparación de especímenes calcinados

Los ladrillos se prepararon a partir de arcilla común (Yacimiento Princesa, Quilicura, Santiago) y caolín (zona Tiltil, Chacabuco). Se varió la proporción arcilla/caolín y la temperatura de calcinación de los especímenes para obtener diferentes microestructuras tanto química como físicamente.

Se utilizó tres niveles en la razón arcilla/caolín en masa: 100% arcilla y 0% caolín (100/0), 90% arcilla y 10% caolín (90/10) y 80% arcilla y 20% caolín (80/20) para variar la plasticidad inicial de las mezclas de arcilla utilizadas en la fabricación de ladrillos (Industrias Princesa, 2013).

Los ladrillos se calcinaron a 800, 900 ó 1000 °C para obtener distintos grados de sinterización y cristalización de la matriz, de esta forma se logra diferente porosidad e interconexión en los poros en la microestructura de los especímenes (Cultrone et al, 2004; López-Arce, 2004). Esto se realizó para mezclas razón arcilla/caolín 90/10 por ser una composición puede explicar las propiedades mecánicas y físicas de los ladrillos artesanales.

La temperatura de 900°C se utilizó también en mezclas razón arcilla/caolín 100/0 y 80/20, ya que es una temperatura utilizada en la fabricación de ladrillos artesanales de edificaciones históricas (López-Arce, 2004; Cultrone et al, 2007).

El detalle de las condiciones de fabricación y la nomenclatura utilizada para identificar a los especímenes, se presenta en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Nomenclatura según variables de estudio (contenido de caolín y temperatura de calcinación) de los especímenes fabricados

		Contenido de caolín en mezcla seca (%)		
		0	10	20
Temperatura de calcinación (°C)	800	---	L10-800	---
	900	L0-900	L10-900	L20-900
	1000	---	L10-1000	---

Se fabricó 3 especímenes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm para cada mezcla y temperatura de calcinación. Los especímenes utilizados posterior a la calcinación, fueron colocados en una

cámara climatizada (H.R.=50% y T=20°C) por al menos un semana, con el fin de alcanzar una humedad de equilibrio con el ambiente antes de la aplicación del consolidante.

3.3.2 Aplicación del tratamiento

Se utilizó el consolidante Silres OH 100, que es un silicato de etilo hidrolizado producido por la casa comercial Wacker Chemie. La ficha técnica del producto indica una deposición final del gel de sílice de 30% después de 28 días y una densidad de 0.997 g/cm³ a 25°C.

La aplicación del consolidante consistió en la inmersión a temperatura ambiente de los especímenes por 1 hora en el consolidante (periodo de la mayor proporción de absorción) (Soto, en proceso de publicación). Luego de la inmersión, los especímenes se dejaron escurrir en la misma posición que fueron colocados en el consolidante (horizontal) y se ubicaron en la cámara climatizada por 4 semanas para permitir el curado del consolidante.

3.3.3. Técnicas experimentales

▪ Caracterización de arcillas y especímenes, y medición de efectividad

La mineralogía se determinó mediante Difracción de Rayos X (XRD) utilizando un difractómetro modelo D2 Phaser de Bruker, radiación CuK α operando en escaneo continuo, 40 kV, 20 mA, área explorada 2θ entre 0° y 70°. Para los ladrillos se utilizó el método del polvo cristalino desorientado. Para la arcilla común y el caolín, se utilizó el

método del agregado orientado solvatado con etilenglicol en estufa a 60°C durante 48 horas.

- **Medición de la efectividad de la consolidación**

La efectividad de la consolidación se evaluó mediante la comparación entre propiedades mecánicas y propiedades de transporte antes y después de la consolidación.

Para las propiedades mecánicas, se determinó la dureza superficial, la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. La dureza superficial (D_s), se determinó mediante el uso de un durómetro tipo Universal, marca Karl Frank serie 500, empleando una bola de acero de 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ "), se aplicó una precarga de 10 kg, y se adicionó una carga de 62.5 kg. El valor de la dureza (adimensional), se determinó como función inversa de la diferencia entre la penetración de la bola con la carga de 72.5 kg y con la carga de 10 kg. El intervalo de medida utilizado osciló entre 0 y 150 unidades. Se realizaron 3 medidas en la cara consolidada de 3 especímenes hermanos (9 mediciones totales) antes y después de la consolidación. El ensayo de resistencia a la compresión (R_c) y resistencia a la flexión (R_f) se realizó según las normas UNE-EN 1926:2007 y UNE-EN 12372:2007, respectivamente.

Las propiedades de transporte se caracterizaron en 6 especímenes hermanos, evaluando: densidad real (ρ_{real}), densidad aparente ($\rho_{aparente}$), porosidad abierta (P_a) según UNE-EN 1936:2007; coeficiente de absorción capilar (C_c) según UNE-EN 1925:1999 y ASTM

C1585; el porcentaje de saturación a presión atmosférica (S) según la norma UNI-EN 13755. La interconexión de poros se determinó al medir la resistividad eléctrica (R) de los especímenes saturados a presión atmosférica por 72 horas. Para esto, se utilizó un Megóhmetro Análogo MILLER 400A aplicando un voltaje de 12V.

Para el análisis cuantitativo de la distribución del tamaño de poros se utilizó el ensayo de desorción de agua. Este ensayo se basa en el comportamiento de la condensación capilar dentro de los poros de un sustrato, donde Kelvin estableció que la presión de vapor (humedad relativa) sobre un menisco en un poro cilíndrico de radio r se expresa mediante la ecuación (Straube y Burnett, 2005):

$$\ln(RH) = \frac{-2\gamma V_m}{rRT} \quad (3-1)$$

RH = humedad relativa

γ = tensión superficial de la solución del poro (N/m)

V_m = volumen molar de la solución (m^3/mol)

r = radio del mayor poro cilíndrico saturado con agua

R = constante de gas universal (8,314 J/(mol*k))

T = temperatura absoluta (k)

Se analizó principalmente tamaños de poro ubicados entre 0.01 a 1 μm por corresponder a un rango importante de acción del consolidante (Mosquera et al, 2003; Alejandre y Villegas, 2009; Cultrone y Madkour, 2013). La curva de desorción se determinó mediante la aplicación de la norma ASTM E104-02. Para esto, se fijaron humedades relativas mediante el uso de las distintas sales que se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Sales utilizadas para fijar la humedad relativa objetivo (Greenspan, 1977)

Humedad relativa (%)	Sal	Estequiometria	Temperatura
97,59 ±0,53	Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	20°C
94,62 ±0,66	Nitrato de potasio	KNO ₃	
90,79 ±0,83	Nitrato de potasio		
85,11 ±0,29	Cloruro de potasio	KCl	20°C
79,23 ±0,44	Cloruro de amonio	NH ₄ Cl	
75,47 ±0,14	Cloruro de sodio	NaCl	

Posteriormente para el ensayo, se tomó especímenes cúbicos de 1x1x1cm, previamente saturados en agua a presión atmosférica (48 horas) y colocados en un recipiente hermético. En el fondo del recipiente se colocó 5 cm de solución sobresaturada con la respectiva sal para fijar la humedad relativa. Se verificó las condiciones iniciales de temperatura y humedad antes de ubicar los especímenes en el recipiente. Luego, éstos estuvieron 48 horas dentro del recipiente para medir de la pérdida de masa de agua a diferentes humedades relativas y estimar el volumen de poros en el rango de tamaños.

Las variaciones del color se determinaron a partir de las coordenadas cromáticas (a, b), y el factor de luminancia (L) del sistema CIELAB. Se usó un colorímetro MiniScan XE Plus, en un rango de medición del equipo es de 350 a 750 nm con precisión de longitud de onda de ±0,5nm. La diferencia de color se cuantificó como (ΔE) mediante la ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (3-2)$$

L_1^* = luminosidad del espécimen sin tratar

a_1^* = coordenada cromática (variación rojo-verde) del espécimen sin tratar

b_1^* = coordenada cromática (variación amarillo-azul) del espécimen sin tratar

L_2^* = luminosidad del espécimen tratado

a_2^* = coordenada cromática (variación rojo-verde) del espécimen tratado
 b_2^* = coordenada cromática (variación amarillo-azul) del espécimen tratado

Interacción sustrato-consolidante (FTIR)

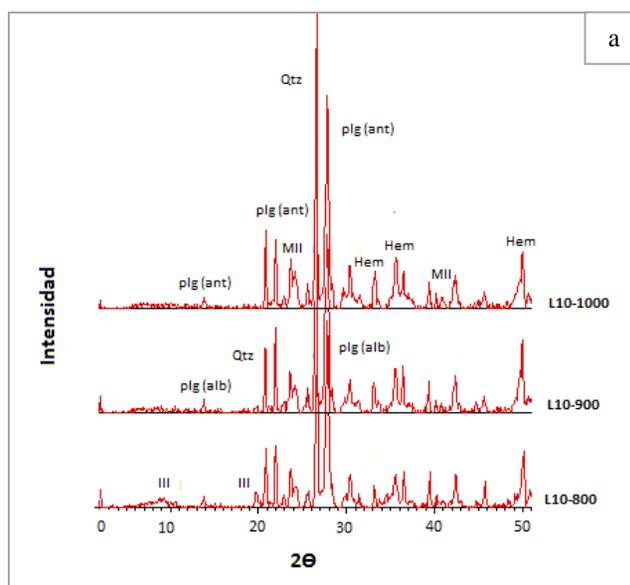
Las interacciones sustrato-consolidante se determinaron mediante Espectroscopia Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR). Para esto, se comparó la formación de bandas funcionales que explican enlaces entre el sustrato cerámico y el consolidante. Se utilizó la técnica de transmitancia, en un espectrómetro infrarrojo FT-IR Prestige 21 con resolución de 4 cm^{-1} y rango espectral de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$. Los especímenes fueron micronizados con etanol para secarse a 40°C formando una pastilla con KBr en polvo de proporción 1:200.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1 Caracterización de materias primas y especímenes fabricados

Los resultados de XRD de la arcilla común detectó minerales como: plagioclasas (albita), cuarzo y como filosilicatos esmectitas (montmorillonita), illita, clorita y caolinita. En cuanto al caolín, los minerales detectados fueron: cuarzo y como filosilicatos caolinita, muscovita, illita y esmectita (montmorillonita). La mineralogía de los especímenes calcinados se presenta en la Figura 3-1. En general, se observó al cuarzo y a las plagioclasas (albita o anortita) como principales minerales. Los especímenes L10-800 y L20-900 presentaron filosilicatos: illita y muscovita, respectivamente. La formación de nuevas fases se explica por la aparición e incremento de hematitas con el aumento de

temperatura (L10-800<L10-900<L10-1000). Asimismo, L10-1000 presenta minerales neo-formados (formados a partir de la descomposición de minerales de arcilla bajo altas temperaturas de calcinación) como mullita ($2\text{SiO}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$). La aparición de mullita confirma la vitrificación y las plagioclasas anortitas, corroboran el alto grado de fundición y recristalización del calcio, que no se encuentra en los demás especímenes. En L0-900 y L10-900 no se detectó filosilicatos ni minerales neo-formados. Se presume que la temperatura de calcinación no fue suficiente para la destrucción de los filosilicatos o que los minerales neo-formados no lograron un porcentaje significativo en la matriz (>5%) para ser detectados por XRD.



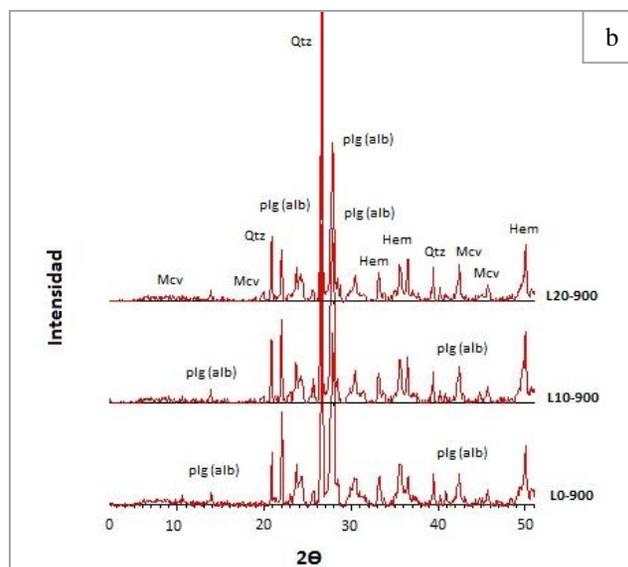


Figura 3-1. Difractogramas de los especímenes fabricados según a) temperatura de calcinación y b) contenido de caolín

Nomenclatura: Hem: hematita, plg (alb): plagioclasa albita, plg (ant): plagioclasa anortita, Ill: illita, Mll: mullita, Mcv: muscovita, Qtz: cuarzo

3.4.2 Evaluación de la efectividad de las aplicaciones del consolidante

- **Retención del consolidante**

La retención del consolidante no fue idéntica para los diferentes especímenes, a pesar de haber sumergido a todos por 1 hora en el consolidante. En general, la retención promedio del consolidante en los especímenes fue de un 37%, porcentaje levemente superior al entregado por el fabricante en la ficha técnica del consolidante (30%). Asimismo, la Figura 3-2, muestra que las dosis de consolidante finalmente retenidas variaron según la microestructura de los especímenes.

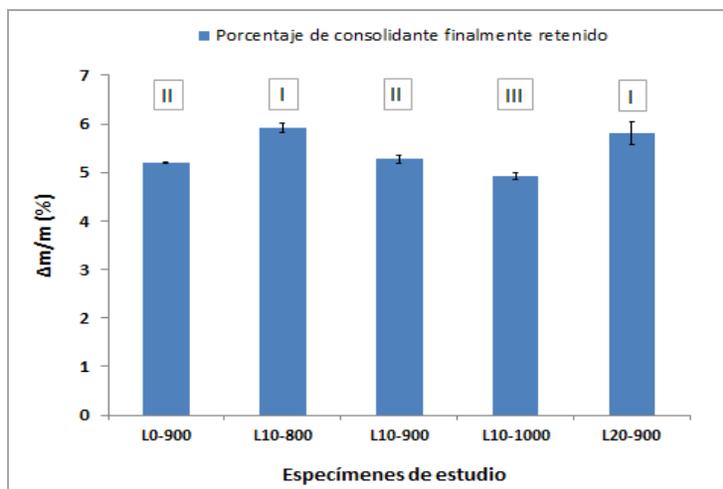


Figura 3-2. Porcentajes de consolidante finalmente retenido para los especímenes. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar.

Se observa de la Figura 3-2, que la retención del consolidante decrece conforme incrementa la temperatura de calcinación mientras que tiende a incrementar con el contenido de caolín. Esto sugiere que la matriz vitrificada puede interferir en la retención mientras que el contenido de caolín lo puede facilitar.

Se efectuó un análisis de pruebas de múltiples rangos para establecer grupos homogéneos de los resultados obtenidos. El análisis estadístico arrojó 3 con un nivel de confianza del 95%: I (L10-800 y L20-900), II (L0-900 y L10-900) y III (L10-1000). Es de esperar que cada grupo obtenido presente un comportamiento similar al evaluar las mejoras en propiedades mecánicas y de transporte de los especímenes consolidados.

- **Variación en dureza superficial y propiedades mecánicas**

La efectividad del tratamiento puede evaluarse por la variación de los cambios en propiedades mecánicas (dureza superficial, resistencia a compresión y flexión) al aplicar el consolidante.

Los resultados de dureza superficial se presentan en la Figura 3-3. Los especímenes L10-800 y L0-900 lograron las mayores disminuciones en la profundidad de penetración (aumento en la dureza superficial): 59.6 y 51.5%, respectivamente. Se observó que los especímenes consolidados se aproximaron a un mismo límite de dureza entre 40 a 50 unidades de penetración.

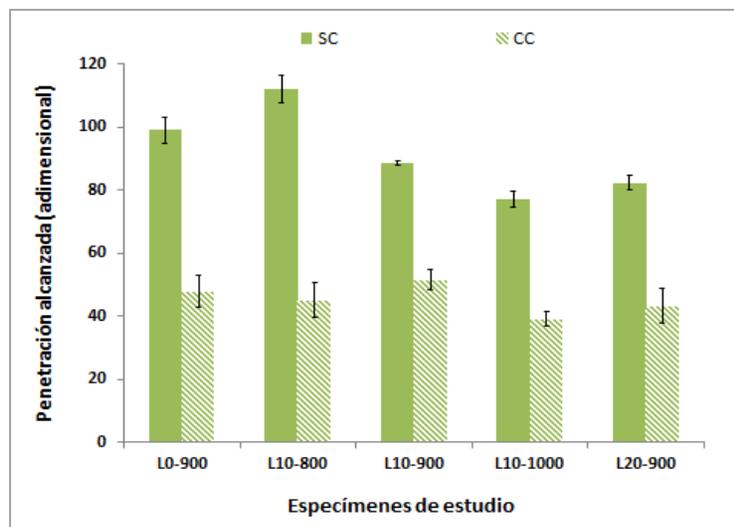


Figura 3-3. Penetración superficial alcanzada por la bola de acero (6mm) para los especímenes antes y después de la consolidación. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar.

Nomenclatura: SC: sin consolidante, CC: con consolidante

Los resultados de resistencia a compresión y flexión, se muestran en Figura 3-4. Se detectó que previo a la consolidación, la resistencia a compresión (R_c) y flexión (R_f) se incrementó con el aumento en la temperatura de calcinación y el contenido de caolín.

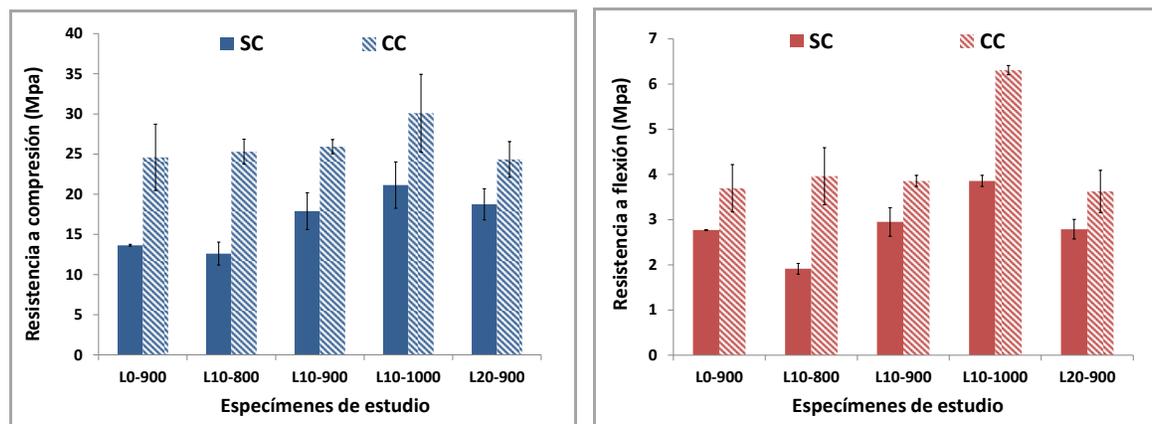


Figura 3-4. Aumento de resistencia a compresión y flexión para los especímenes antes y después de la consolidación. Cada barra representa el promedio de tres especímenes y la desviación estándar

Nomenclatura: SC: sin consolidante, CC: con consolidante

A partir de los resultados, se construyeron intervalos de confianza para la diferencia entre las medias de especímenes sin y con consolidante. Puesto que los intervalos obtenidos no contenían el valor 0, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras analizadas, con un nivel de confianza del 95%. Es decir, existe un aumento de resistencia a compresión y flexión estadísticamente significativo al aplicar el consolidante en los especímenes.

Para los especímenes consolidados (excepto L10-1000), se presentó una resistencia a la resistencia a compresión y flexión de aproximadamente 25MPa y 4 MPa, respectivamente, lo que sugiere una resistencia límite para este tratamiento. Debido a lo anterior, la

efectividad relativa de la aplicación de consolidante varió ya que los especímenes más resistentes inicialmente, aumentaron menos su resistencia con la aplicación del consolidante. Así, los mayores aumentos de resistencia a compresión fueron para L10-800 (100.6%) y L0-900 (80.3%). En resistencia a flexión los mayores aumentos fueron para L10-800 (106.9%) y L10-1000 (63.5%). Éste último desarrolló una resistencia mecánica superior al resto, que podría explicarse por una interacción sustrato-consolidante, (debido a vitrificación), lo que podría aportar mejoras adicionales en la matriz.

Con respecto a la relación entre el porcentaje de ganancia en propiedades mecánicas y la retención del consolidante (Figura 3-2, 3-3 y 3-4), se observa que el espécimen con mayor retención de consolidante (L10-800 con 5.9%) experimentó el mayor aumento en propiedades mecánicas. Sin embargo, la serie con menor retención de consolidante (L10-1000 con 4,9%) no experimentó la menor disminución en propiedades mecánicas. Esto indica que la retención y desempeño del consolidante no está relacionado solamente con la microestructura de estudio.

- **Variación en las propiedades físicas**

Las propiedades de transporte pre y post consolidación se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Propiedades de transporte de los especímenes antes y después de la consolidación

Tipo tratamiento	ρ_{aparente} (g/cm ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	Pa (%)	R (Ω *m)	Cc	Especímen
S.C.	1,82	2,66	31,44	71.63	0.33	L0-900
C.C.	1,92	2,55	24,52	76.72	0.026	
S.C.	1,81	2,65	31,44	47.8	0.22	L10-800
C.C.	1,92	2,53	24,18	62.2	0.060	
S.C.	1,83	2,65	31,14	54.2	0.32	L10-900
C.C.	1,93	2,58	25,10	71.9	0.029	
S.C.	1,84	2,66	30,68	64.6	0.49	L10-1000
C.C.	1,95	2,58	24,27	93.6	0.052	
S.C.	1,81	2,64	31,53	44.3	0.31	L20-900
C.C.	1,92	2,54	24,62	63.4	0.090	

Nomenclatura: S.C.: sin consolidante, C.C.: con consolidante

Los resultados de densidad real (ρ_{real}) de los especímenes sin consolidante, son coherentes para sustratos con altos contenidos de cuarzo ($\rho_{\text{cuarzo}}=2.7 \text{ g/cm}^3$), como el ladrillo. El aumento de la densidad aparente (ρ_{aparente}) con la adición del consolidante corroboró la capacidad de la matriz para permitir la polimerización del mismo. La porosidad abierta (Pa), se redujo en todos los casos, siendo L10-800 (7.3%) el espécimen con la mayor disminución. En cuanto a la interconexión de poros, antes de la consolidación, se observó un incremento en la resistividad eléctrica conforme disminuía el contenido de caolín o aumentaba la temperatura de calcinación. Este comportamiento que se mantuvo post consolidación. En general, todos los especímenes lograron un incremento en la resistividad eléctrica. El mayor aumento detectado fue para L10-1000 (45%) y el menor aumento fue para L0-900 (7%). Este último valor resultó ser bajo y parece ser atípico.

Del análisis de coeficiente de absorción capilar (C_c), se observó una disminución significativa en la absorción capilar y la tasa de absorción capilar después de la consolidación (Figura 3-5). En particular, los especímenes L20-900 y L10-1000, iniciaron el ascenso de forma rápida. Esto indica que son los especímenes que poseen el mayor tamaño de poro. Los demás especímenes iniciaron el ascenso con el aumento en el tiempo de contacto con el agua. Posterior al ascenso, las curvas se estabilizaron de la siguiente forma: L20-900 y L10-1000 (1 día), L10-800 y L10-900 (3 días) y L0-900 (8 días). Los resultados, revelaron una disminución en la porosidad por parte del consolidante hacia un “techo” para todos especímenes. Sin embargo, en cuanto a la interconectividad de los poros, los especímenes L20-900 y L10-1000, no presentaron cambios significativos con respecto a los especímenes sin consolidar.

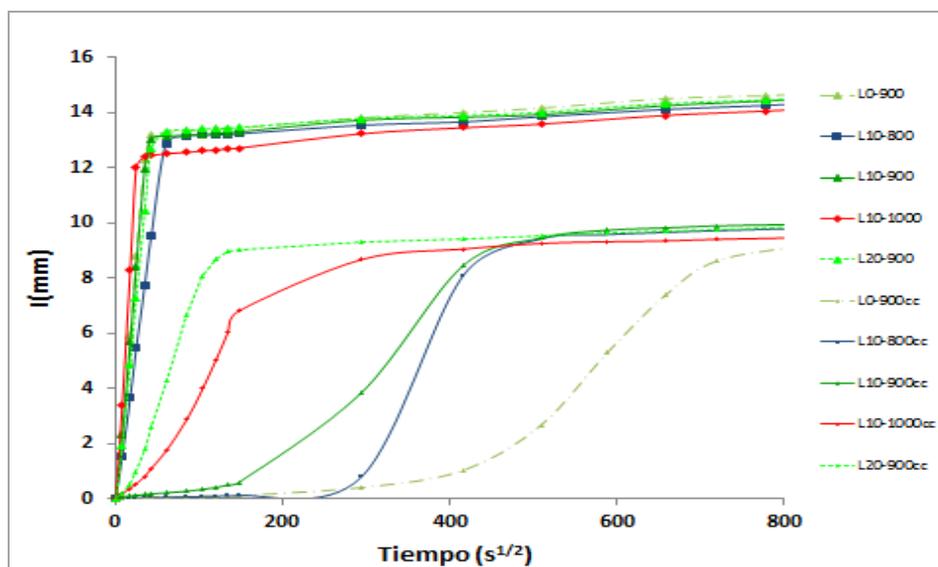


Figura 3-5. Coeficiente y tasa de absorción capilar para los especímenes antes y después de la consolidación

En cuanto a la distribución del tamaño de poros, la Figura 3-6 presenta los resultados obtenidos del ensayo de desorción. Antes de la consolidación, los especímenes con menor tamaño de poro fueron L10-800 y con mayor tamaño de poro L10-1000.

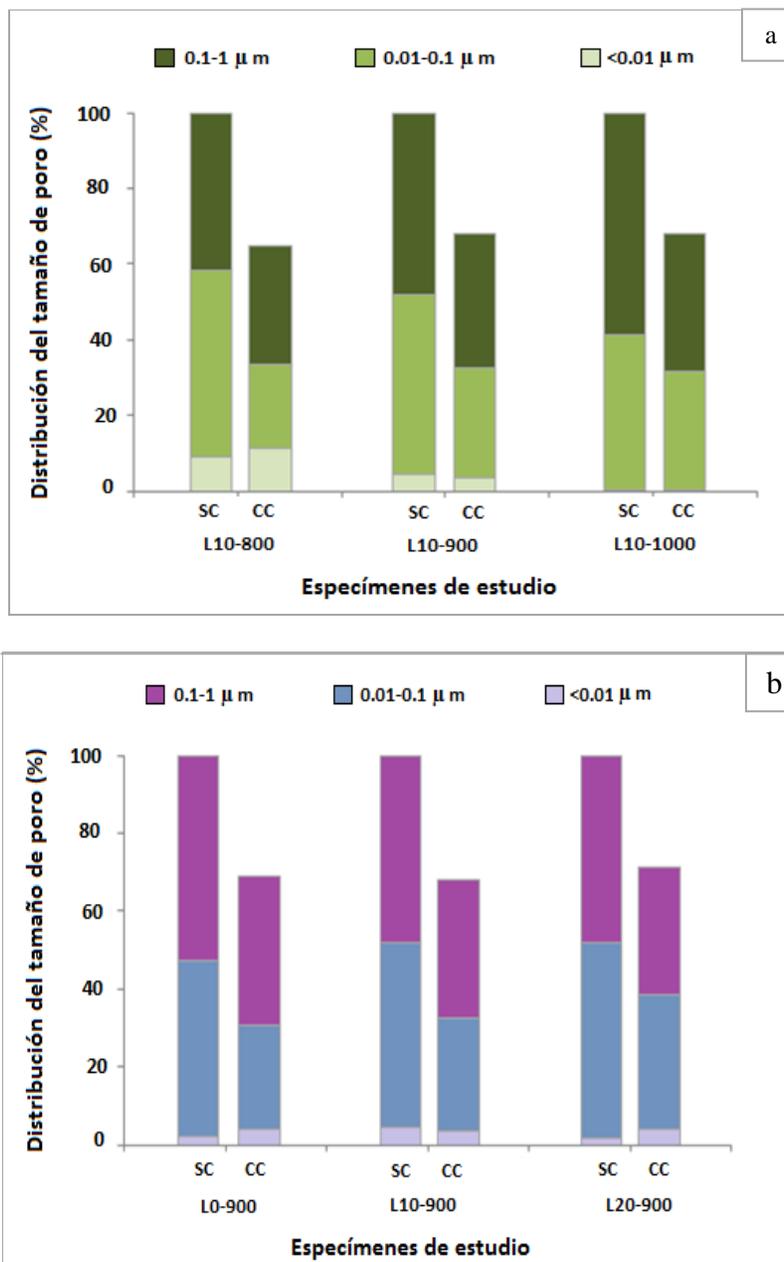


Figura 3-6. Distribución del tamaño de poros de los especímenes antes y después de la consolidación según a) temperatura de calcinación y b) contenido de caolín

Los resultados muestran una disminución mínima de 8% en el rango de poros ubicados entre 0.1 a 1 μm , siendo la mayor para el espécimen L10-1000 (23%). Asimismo, se presentó una disminución mínima de 10% en el rango de poros ubicados entre 0.01 a 0.1 μm , siendo la mayor para el espécimen L10-800 (28%). Para todos los especímenes excepto para L10-1000 se produjo un aumento en los poros de gel ($<0.01 \mu\text{m}$) posterior a la consolidación. Esto puede explicarse por un aumento en la micro-porosidad remanente de los especímenes debido a la fractura del consolidante. Este aumento puede ser ocasionado por la tensión producida por las fuerzas capilares en el consolidante ubicado en los poros de gel ($<0.01\mu\text{m}$). Esto, porque las fuerzas capilares producen tensión y cuando ésta supera la resistencia consolidante, se produce la rotura del consolidante. O bien, debido a la fractura del consolidante por esfuerzos residuales propios de la gelificación durante el curado del consolidante (Mosquera et al, 2003; Maravelaki-Kalaitzaki et al; 2008; Zárraga et al, 2010).

Ferreira y Delgado, 2008, consideran que la deposición del SiO_2 formado durante las aplicaciones precipita inicialmente en los poros pequeños (capilares) lo que provoca un fortalecimiento de los granos y el contacto entre ellos. Esto concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que la mayor ganancia en dureza, resistencia a compresión y propiedades de transporte fue lograda en los especímenes de menor tamaño de poro (L10-800 y L0-900) a diferencia de especímenes de mayor tamaño de poro (L10-1000 y L20-900) por un “llenado” en el rango de poros 0.01-0.1 μm . En general, la disminución lograda en este rango de poros, resulta en un beneficio para la durabilidad del

ladrillo, ya que materiales con abundancia de poros en este rango, son susceptibles a problemas por cristalización de sales, ciclos hielo-deshielo y ataque de gases (Elert et al, 2003; Cultrone et al, 2004; Alexandre y Villegas, 2009).

▪ **Colorimetría**

Para el cálculo de las variaciones cromáticas, los especímenes sin consolidante fueron utilizados como referencia. En cuanto al factor de luminosidad L^* , se logró una disminución en todos los casos ($L_2^* < L_1^*$) al aplicar el consolidante, lo que cuantifica su efecto oscurecedor. Para las coordenadas cromáticas a^* y b^* , se detectaron bajas disminuciones con respecto a los valores obtenidos inicialmente.

La literatura propone (Delgado Rodrigues y Grossi, 2007; Maravelaki-Kalaitzaki, 2008) un límite aceptable de $\Delta E < 5$ en el cambio de color para los especímenes tratados, por consideraciones estéticas. Siguiendo esta recomendación, los especímenes con mayor contenido de hematita (mayores valores a^*), superan levemente el límite recomendado, lo que se aprecia en la Figura 3-7.

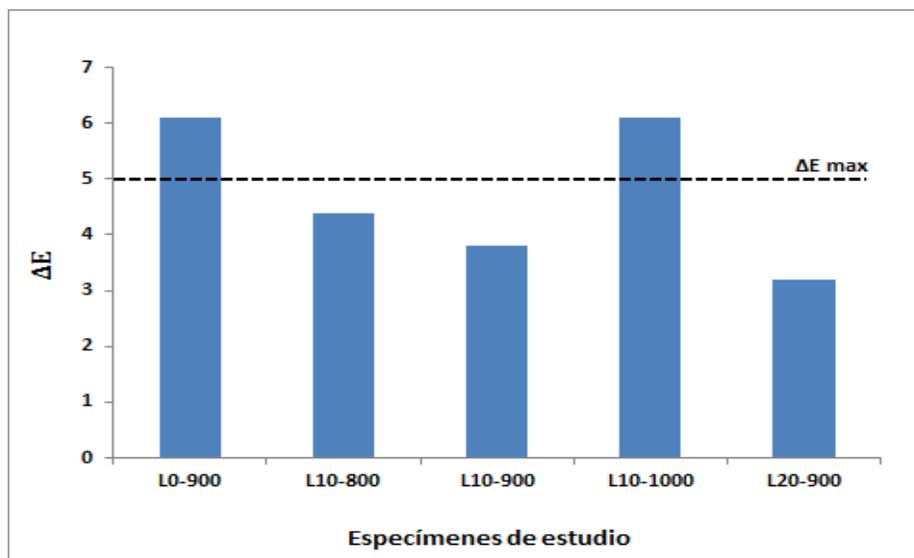


Figura 3-7. Ubicación del límite máximo de variación de color para los especímenes consolidados

3.4.3 Interacción sustrato-consolidante (FTIR)

El efecto de la consolidación puede ser representado por las variaciones en las bandas funcionales características de los especímenes con el ensayo FTIR. Los principales grupos de interés para este estudio se muestran en las bandas funcionales de la Figura 3-8, (Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008; Calabria et al, 2009; Dhanapandian et al, 2009; Kapridaki y Maravelaki-Kalaitzaki, 2012; Sandrolini et al, 2012).

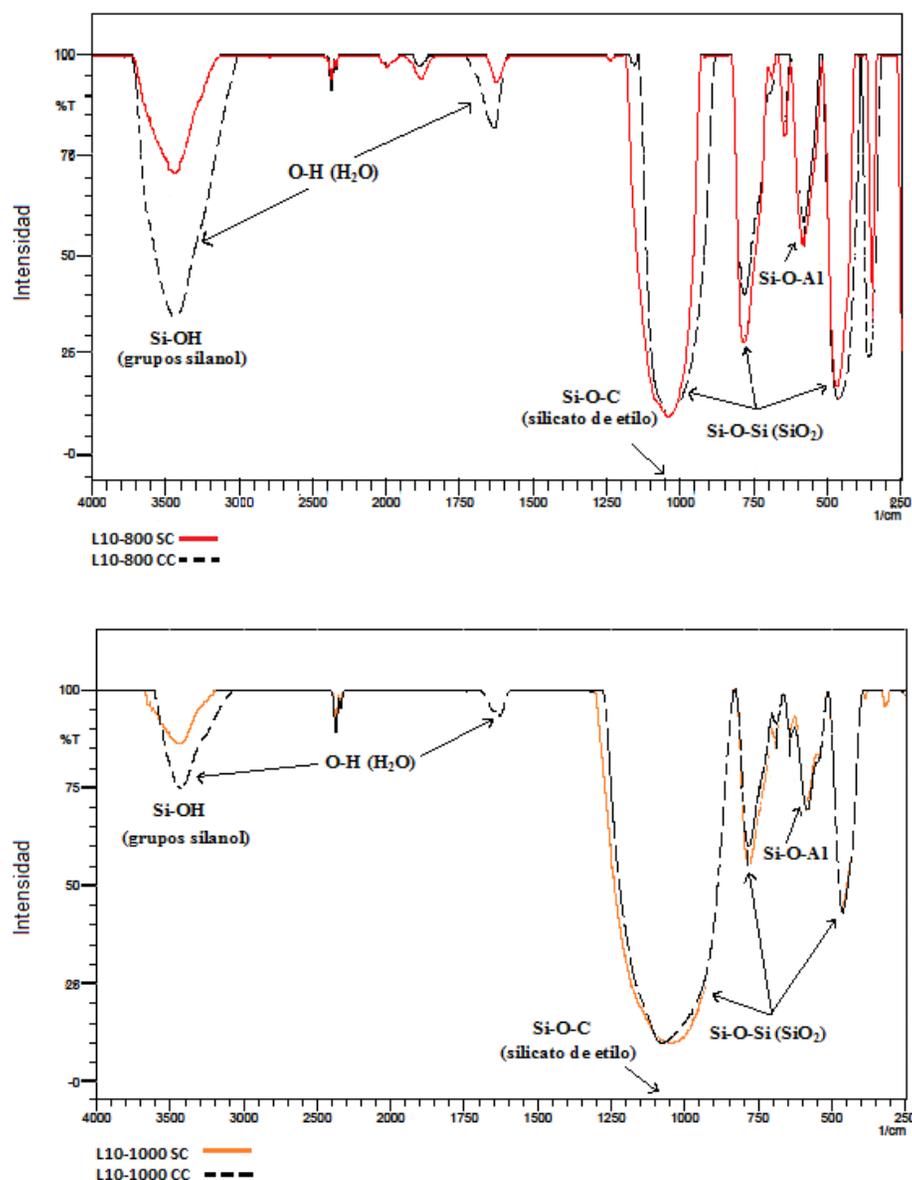


Figura 3-8. Ubicación de principales bandas de estudio y detección de las variaciones obtenidas para L10-800 y L10-1000 (casos más significativos).
Arriba: L10-800, Abajo: L10-1000

La comparación de los especímenes SC y CC, evidenció aumento o aparición de la banda O-H en todos los casos. El aumento en la intensidad de esta banda evidencia la interacción entre grupos O-H del sustrato y Si-OH del consolidante. Asimismo, el aumento en las

bandas Si-O-Si ubicadas en las frecuencias 1040, 780 y 462 cm^{-1} se justifica por la creación de nuevas uniones Si-O-Si. El cambio de frecuencia de las bandas ubicadas en 1020-1040 cm^{-1} hacia la frecuencia 1100 cm^{-1} se explica también por la formación de nuevos enlaces Si-O-Si con el silicato hidrolizado (Kapridaki y Maravelaki-Kalaitzaki, 2012). La disminución en las bandas Si-O-Al, ubicadas en las frecuencias 640 y 586 cm^{-1} implican también interacciones de los grupos propios de aluminosilicatos con los grupos Si-O-Si del consolidante.

El aumento en la resistencia mecánica, en especial resistencia a flexión se explica por la formación de enlaces entre el sustrato y el consolidante. Para este caso, los especímenes L10-800 y L10-1000 (Figura 3-8) lograron los mayores incrementos. Para L10-800, las ganancias en resistencia mecánica pueden deberse a que este espécimen presentó la menor temperatura de calcinación (mayor cantidad grupos O-H disponibles, filosilicatos presentes), y por ende, alta posibilidad de reactividad con el consolidante. El espécimen L20-900 retuvo el segundo mayor porcentaje de consolidante, pero logró un menor incremento en su resistencia final. Esto debido a una mayor resistencia inicial antes del tratamiento. Sin embargo, ambos llegaron a un mismo límite de resistencia final (mismo techo).

Por último, el espécimen L10-1000 presentó pocas variaciones en sus bandas características (Figura 3-9), pero un aumento significativo en resistencia a flexión. Esto puede explicarse por la interacción de grupos funcionales Si-O-C del silicato de etilo con grupos Si-O-Si presentes en la vitrificación (amorfosidad) del espécimen. Formando así,

compuestos de alta energía de enlace que aumentan de forma importante la resistencia a flexión del espécimen.

Se prevé que las mejoras logradas en propiedades mecánicas y de transporte son principalmente debido a la deposición del consolidante en los poros (efecto disminución de porosidad) y que la interacción sustrato-consolidante que juega también un rol relevante.

3.5 Conclusiones

En el laboratorio se fabricaron 5 tipos de ladrillos para lograr diferentes microestructuras. Para esto se utilizaron 3 diferentes temperaturas de calcinación y 3 diferentes contenidos de caolín. Los especímenes fueron tratados con silicato de etilo para medir cambios en propiedades mecánicas y físicas.

A partir de la caracterización realizada, se detectó que especímenes calcinados a 800°C presentaron filosilicatos en la matriz (illita). Por otro lado, especímenes calcinados a 900°C mostraron desaparición de los filosilicatos y aquellos calcinados a los 1000°C, presentaron mullita, plagioclasas anortitas y una fase vítrea. Los especímenes con contenidos de caolín bajo el 20%, no presentaron filosilicatos ni minerales neoformados en su matriz.

Se encontró que especímenes que lograron los mayores porcentajes de consolidante finalmente retenido en la matriz, lograron los mayores aumentos en propiedades mecánicas

y de transporte, siempre y cuando no hubieran desarrollado suficiente resistencia mecánica inicial. Se detectó que la acción consolidante actuaba principalmente en el rango de tamaño de poro entre 0.01-0.1 μm . Aquellos ladrillos con mayor porcentaje de poros en este rango, lograron las mayores ganancias en dureza superficial, resistencia mecánica y propiedades de transporte de los especímenes estudiados.

Mediante FTIR, se detectaron interacciones sustrato-consolidante, que explicaron principalmente las ganancias logradas en resistencia a flexión de los especímenes. Se encontró que especímenes con mayor cantidad de grupos $-\text{OH}$ accesibles (baja temperatura de calcinación o mayor humedad) presentaron una mayor interacción química con el consolidante. Asimismo, especímenes que desarrollaron vitrificación (contenido amorfo) también aumentaron de forma considerable en la resistencia a flexión. Esto puede estar relacionado con la creación de compuestos (Si-O-Si) que presenten alta energía de enlace.

Los incrementos logrados en propiedades mecánicas, propiedades de transporte así como la detección de una interacción sustrato-consolidante, indican aumento en la durabilidad del sustrato. Estos efectos explican que el desempeño de la consolidación está estrechamente ligado a la microestructura del espécimen (principalmente distribución tamaño de poro) y a la interacción sustrato- consolidante (mineralogía).

Finalmente, en cuanto a la variación cromática, la consolidación con silicato de etilo logró alteraciones poco significativas en el color de los especímenes tratados. Esto hace factible

la utilización de esta técnica para la conservación y rehabilitación de ladrillos en edificaciones históricas y contemporáneas, por el bajo impacto visual logrado.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de Wacker Chemie por brindar el consolidante, y a Industrias Princesa Ltda, por proveer de las materias primas para realizar los especímenes. A los profesores Gloria Arancibia del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica y Pablo Pastén del Departamento de Ingeniería Hidráulica, de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile proyecto FONDAP-CONICYT 15090013, por la caracterización de materias primas y especímenes fabricados. Finalmente, se agradece el apoyo brindado al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Referencias

Alejandro, F.J. y Villegas R. (2009). Estudio de la alterabilidad y efecto de tratamientos de conservación para los ladrillos de la portada de la iglesia de Santa María de Jesús (Sevilla). *Materiales de Construcción*, 293(59), 85-103.

ASTM E104-02 (Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity By Means of Aqueous Solutions).

ASTM C1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes).

- Benavente D., García del Cura M. A., Fort R. y Ordóñez S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74 (1), 113-127.
- Calabria J., Vasconcelos W. y Boccaccini A. (2009). Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. *Ceramics International* 35 (1) 665-671.
- Cultrone G., De la Torre M.J., Sebastián E., Cazalla O., Rodríguez-Navarro C., (2000). Behavior of brick samples in aggressive environments. *Water, Air and Soil Pollution* 119(1), 191-207.
- Cultrone, G., Sebastián E., Elert K., De la Torre M.J, Cazalla O. y Rodríguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 547-564.
- Cultrone, G., Sebastián E., Ortega Huertas M. (2007). Durability of masonry systems: A laboratory study. *Construction and Building Materials* 21(1), 40-51.
- Cultrone G. y Madkour F. (2013). Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (4) 304-310.
- Dhanapandian S, Gnanavel B, Ramkumar T. (2009). Utilization of granite and marble sawing power wastes as brick materials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 4 (1), 147-160.
- Durán Suarez A., (1995). Estudio de consolidantes y protectivos para restauración de material pétreo. Ph D Thesis. Granada: University of Granada, 1995 p. 1-369.
- Delgado Rodrigues J, Grossi A (2007). Indicators and ratings for the compatibility assesment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*, 4:32-43.
- Elert K., Cultrone G., Rodríguez-Navarro C. y Sebastián E. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historical buildings –influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage* 4(1), 91-99.
- Ferreira A.P. y Delgado J. (2008). Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage*. 9(1) 38-53.
- Greenspan L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the National Bureau of Standards*. A Physics and Chemistry vol 81(1).
- Görhan G. y Şimşek O. (2013). Porous clay bricks manufactured with rice husks. *Construction and building materials* 40(1) 390-396.

Illescas J. (2012). Nuevos Nanomateriales para la Conservación del Patrimonio monumental Andaluz. *Tesis doctoral*. Departamento de Química física, Universidad de Cádiz.

Industrias Princesa. Entrevista personal y visitas técnicas realizadas en la planta de producción de Industrias Princesa Ltda, Quilicura, Santiago de Chile. 2013.

Kapridaki, C, Maravelaki-Kalaitzaki N (2012). TiO₂-SiO₂ Nano-composite hydrophobic coating with self-cleaning properties for marble protection. *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. p. 47-56.

López-Arce, P (2004). Ladrillos de edificios históricos de Toledo: Caracterización, origen de las materias primas y aplicaciones para su conservación y restauración. *Memoria para optar al grado de doctor*, Universidad Complutense de Madrid.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Kallithrakas-Kontos N., Agioutantis Z., Maurigiannakis S. y Korakaki D. (2008). A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents. *Progress in Organic Coatings* 62 (1) 49-60.

Meseguer S., Pardo F., Jordan M.M., Sanfeliu T., Gonzalez I. (2010). Ceramic behaviour of five Chilean clays which can be used in the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 4 (1) 372-377.

Mosquera M. J., Pozo J. y Esquivias L. (2003). Stress during drying of two stones consolidants applied in monumental conservation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 26(1-3), 1227-1231.

Municipalidad de Santiago (2012). *Catálogo de inmuebles de conservación histórica. Asesoría urbana 2005-2006*. Santiago de Chile, 2012.

Nayak P. y Singh B.K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bulletin Material Science* 30(3), 235-238.

Sandrolini F., Franzoni E. y Pigino B. (2012). Ethyl silicate for surface treatment of concrete-Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate. *Cement and Concrete Composites* 34 (3) 306-312.

Soto M. (En proceso de publicación). Evaluación de la efectividad del silicato de etilo como consolidante para rehabilitar albañilería en edificios patrimoniales. *Tesis para lograr el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Straube, J. y Burnett E. (2005). "Building Science for Building enclosure". Building Science Press, 2005.

UNE-EN-1925. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

UNE-EN 1926:2007. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

UNE-EN 1936 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNE-EN 12372:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.

Zárraga R., Cervantes J., Salazar-Hernández C y Wheeler G. (2010). Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 11 (2) 138-144.

4. ESTUDIO DE LA RELACIÓN DOSIS-EFECTIVIDAD EN LA CONSOLIDACIÓN CON SILICATO DE ETILO EN EL LADRILLO

Melissa Soto ^a, Patricia Martínez ^a, Mauricio López ^{a*}

^a Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile. Vicuña Mackenna 4860, Casilla 30, Correo 22, Santiago, Chile.

*Autor correspondiente

Resumen

En la literatura se reporta que es posible obtener buenos resultados al utilizar el silicato de etilo como consolidante en materiales constructivos silíceos como el ladrillo. Sin embargo, no se ha detectado información que explique las mejoras en permeabilidad y propiedades mecánicas en un material, a partir de dosis aplicadas y el método de aplicación utilizado.

Para evaluar las dosis de consolidante y sus métodos de aplicación, se fabricaron ladrillos utilizando arcilla común y caolín (90 y 10% en peso seco, respectivamente) a 900°C. Éstos se caracterizaron mediante DRX y SEM/EDX. Se trataron con el consolidante mediante inmersión total y 3 métodos de aplicación “in situ”, para medir variaciones en permeabilidad, dureza superficial y resistencia mecánica (flexión y compresión). El método “in situ” más eficaz se colocó nuevamente 30 días después de la primera colocación, para estimar mejoras adicionales.

La caracterización realizada al material post-consolidación, detectó minerales como cuarzo, plagioclasas (albita) y hematita, sin presencia de filosilicatos ni vitrificación en la matriz. La aplicación con brocha, resultó ser el método de aplicación “in situ” más eficaz.

Los resultados arrojaron disminuciones en permeabilidad de 3, 6 y 5% y aumentos aproximados de resistencia mecánica de 30, 45 y 65% para 1^{era} aplicación brocha, inmersión total y 2^{da} aplicación con brocha, respectivamente. La 2^{da} aplicación con brocha logró el mejor desempeño de los métodos utilizados evidenciando las ventajas de la re-impregnación.

Palabras claves:

Silicato de etilo, dosis consolidante, permeabilidad, propiedades mecánicas, inmersión total, aplicación brocha, ladrillo.

4.1 Introducción

La intervención en las edificaciones, en especial aquellas dentro de la categoría de históricas, implica un trabajo complejo y delicado que debe estudiarse detenidamente (López-Arce, 2004). Para esto, se debe brindar la mejor y más duradera solución, de manera de mejorar la calidad final del sustrato inicial (Ferreira y Delgado, 2008).

Asimismo, se deben evitar futuros deterioros a consecuencia de la implementación de tratamientos inadecuados y evitar alterar aspectos estéticos (Prada et al, 1996; Zárraga et

al, 2006; Ferreira y Delgado, 2008). Ante la ausencia de una guía clara que determine el método de intervención a desarrollar en las edificaciones históricas, resulta necesario profundizar en los fundamentos básicos que las originaron. Esto mediante la caracterización de los materiales constituyentes y el estudio de la interacción de éstos en el medio donde se encuentra la estructura. Además, se debe realizar una auscultación de antecedentes previos al proceso constructivo y las acciones ejecutadas durante la intervención (López-Arce, 2004; Ferreira y Delgado, 2008).

Un aspecto importante con respecto a la intervención en edificaciones históricas, es la importancia generada a nivel mundial sobre la conservación y el mantenimiento del patrimonio edificado. Pactos internacionales como lo fueron la Carta de Atenas (1931), la Convención de Protección de Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado (1954), la Carta de Venecia (1964), hasta las últimas convenciones como la Carta de Cracovia (2000) y la Carta ICOMOS para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural (2008) han creado consciencia en la población sobre la importancia que posee para la humanidad la protección de este patrimonio edificado (López-Arce, 2004; Casanova, 2005).

En su artículo 2, la Carta de Venecia (1946), establece un fundamento importante: “La conservación y restauración de los monumentos constituye una disciplina que se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental”. De este artículo se desprenden dos conceptos importantes que se desarrollarán en esta investigación: el estudio de nuevas técnicas de intervención en el

material constructivo de edificaciones y el apoyo de equipos interdisciplinarios para la toma de decisiones.

La intervención en estructuras contemporáneas resulta ser también un trabajo delicado, pero el que se debe realizar en estructuras históricas posee mayor grado de complejidad. Esto debido a la dificultad que genera enfrentarse a materiales muchas veces de propiedades desconocidas, sistemas constructivos particulares, imposibilidad de realizar ensayos destructivos sobre la estructura, y la mínima intervención o impacto visual que se exige sobre ellas (Casanova, 2005).

La consolidación se encuentra entre las técnicas de intervención menos invasivas conocidas para tratar un material, y busca rehabilitar al sustrato dañado por fenómenos ambientales a partir de la aplicación de químicos penetrantes, (Zárraga et al, 2006; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013).

Entre los consolidantes más utilizados se destacan los alcoxisilanos, y de éstos sobresale el silicato de etilo (Ferreira y Delgado, 2008). Este consolidante ha logrado reportar significativas mejoras en propiedades físicas y mecánicas en materiales constructivos con altos contenidos de sílice, como lo son las tobas, areniscas, granitos y ladrillos (Zárraga et al, 2010; Sandrolini et al, 2012; Cultrone y Madkour, 2013).

Sin embargo, no se reporta en la literatura, información que explique las mejoras en permeabilidad y propiedades mecánicas en un material a partir de las dosis y los métodos

de aplicación utilizados en el ladrillo. Esta información es necesaria para correlacionar los resultados de la consolidación realizada en laboratorio e “in situ” y determinar el método más eficaz para aplicar el consolidante en terreno, así como las dosis a utilizar.

4.2 Significancia de la investigación

Esta investigación se centró en el estudio de distintas técnicas de consolidación, utilizadas tanto en el laboratorio como en terreno, con el objetivo de definir métodos para determinar la dosis adecuada de consolidante a usar y el procedimiento que permita aplicarla efectivamente en terreno. El estudio se realizó en el ladrillo, principal material constructivo de las edificaciones patrimoniales en Santiago de Chile (Municipalidad de Santiago, 2012).

Aunque la motivación de esta investigación es el estudio de técnicas de intervención en edificaciones históricas, estas técnicas también son extrapolables a edificaciones contemporáneas. Por lo que las soluciones estudiadas pueden utilizarse en ambos tipos de edificación.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Preparación de especímenes calcinados

Los especímenes se fabricaron a partir de arcilla (Yacimiento Princesa, Quilicura, Santiago) y caolín (Tilttil, Chacabuco) en proporción 90 y 10% (porcentajes en peso con respecto al material seco). Se realizaron especímenes de 4x4x16cm y se calcinaron a

900°C, ya que es una temperatura utilizada en la fabricación de especímenes industriales y artesanales (Industrias Princesa, 2013; López-Arce, 2004; Cultrone y Madkour, 2013).

4.3.2 Aplicación del tratamiento

Se utilizó el consolidante Silres OH 100, que es un silicato de etilo hidrolizado producido por la casa comercial Wacker Chemie. El consolidante viene preparado con su catalizador, por lo que no debe diluirse. La ficha técnica del consolidante indica una deposición final de sílice de 30% después de 28 días y una densidad de 0.997 g/cm³ a 25°C. El consumo del consolidante, varía según el material a tratar entre 0.5 a 15 l/m². Con esta información, se creó una primera clasificación del posible consumo a utilizar (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Clasificación inicial del consumo del consolidante (propuesto por la autora)

Consumo (l/m ²)	Proporción de uso
R<5	Bajo
5 <R<10	Medio
R>10	Alto

Posterior a la calcinación, los especímenes fueron colocados en una cámara climatizada (H.R.=50% y T=20°C) una semana, con el fin de alcanzar una humedad de equilibrio con el ambiente antes de la aplicación del consolidante. Posteriormente, fueron sumergidos en el consolidante por diferentes períodos: 1 h, 6 h, 12 h, 24 h y 48 h, para comprender el movimiento del consolidante en la matriz y comparar la ganancia de consolidante según el

tiempo de absorción. A partir de estos resultados, se determinó el periodo que generó la mayor proporción de absorción.

Por otro lado, ya que en terreno no es posible sumergir completamente el material cerámico se analizaron tres conocidos métodos de aplicación en terreno: brocha, rociador manual sin presión y rociador a presión (Ferreira y Delgado, 2008; Illescas, 2012; Cultrone y Madkour, 2013). Esto con el fin de entender el comportamiento del consolidante “in situ”, y comparar con los resultados obtenidos en la inmersión total. El consolidante se aplicó en los especímenes utilizando los tres métodos y se escogió el que brindó la mayor relación $V_{\text{absorbido}}/V_{\text{aplicado}}$. En los tres casos, se realizaron aplicaciones hasta observar la superficie saturada por al menos un minuto.

La aplicación con rociador a presión, utilizó una pistola de aire (113-330 l/min), con presión máxima de 5.5 bar provista con depósito de flujo por gravedad de INDURA. Para la aplicación con rociador manual sin presión, se utilizó un rociador manual realizando aplicaciones constantes hasta saturar la superficie.

Escogido el método de colocación más eficiente, se aplicó el consolidante en un tratamiento de dos etapas. La etapa inicial consideró impregnación hasta saturar la superficie (visualmente húmeda por al menos 1 minuto). Posteriormente, se realizó la segunda etapa después de dos horas (período donde la superficie deja de observarse saturada y se estima que el consolidante ha logrado penetrar nuevamente a través de su sistema poroso superficial) según la experiencia observada en el laboratorio.

Se midió la cantidad de consolidante y la penetración para determinar el consumo real del consolidante y su retención en el tiempo. Luego de cuatro semanas (tiempo suficiente para completar la polimerización del consolidante) se repitió el tratamiento, nuevamente en dos etapas. Se determinó si los especímenes eran capaces de absorber más consolidante y de lograr aún una mayor ganancia en las propiedades físicas y mecánicas.

4.3.3 Técnicas experimentales

Protocolo de caracterización de arcillas y especímenes fabricados (XRD, SEM/EDX)

La mineralogía de las arcillas y especímenes fabricados, se determinó mediante Difracción de Rayos X (XRD) utilizando un difractómetro modelo D2 Phaser de Bruker, radiación $\text{CuK } \alpha$ con escaneo continuo, 40 kV, 20 mA, área explorada 2θ entre 0° y 70° .

Se utilizó Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX) para identificar la morfología y elementos presentes en los especímenes. Se utilizó un microscopio Quanta 250 marca FEI, con microanálisis EDX de OXFORD Instruments Analytical-Inca. Se analizaron secciones de lámina delgada pulida y muestras de 5x5x5 mm recubiertas con carbono.

Evaluación de métodos de aplicación y su efectividad

Para evaluar el consumo de los métodos de aplicación, se midió la cantidad de consolidante aplicado en cada caso. La cantidad de consolidante remanente se determinó a

partir de la diferencia de peso del ladrillo seco y el ladrillo impregnado 30 días después de colocarse el consolidante.

La efectividad se evaluó comparando la permeabilidad y las propiedades mecánicas, antes y después de la consolidación. La permeabilidad se midió en seis probetas hermanas, evaluando los siguientes parámetros: densidad real (ρ_{real}), densidad aparente (ρ_{aparente}) y porosidad abierta (Pa) según UNE-EN 1936:2007; coeficiente de absorción capilar (Cc) según UNE-EN 1925:1999 y ASTM C1585; el porcentaje de saturación a presión atmosférica (S) según recomendaciones de la norma UNI-EN 13755. La interconexión de poros (I_p), se calculó a partir de ecuaciones propuestas por Cultrone et al, (2004).

La distribución del tamaño de poros se determinó al cuantificar la masa de agua perdida en especímenes saturados a presión atmosférica, y ubicados en ambientes con diferente humedad relativa (ensayo de desorción). Para esto se siguió la metodología implementada en Soto et al, (en proceso de publicación), utilizando la ecuación de Kelvin.

Asimismo, con el fin de comparar los resultados del ensayo de desorción, la distribución, tamaño promedio de poro y porosidad abierta, se determinaron también mediante Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP). Se utilizaron especímenes de 1x1x1 cm secados durante 24 horas a 100°C y desgasificados mediante bomba de vacío. Se utilizó un porosímetro de Mercurio Micromeritics Autopore IV 9500, presión 3300 psi (227.5 MPa).

Las propiedades mecánicas se determinaron mediante el estudio de la dureza superficial (D_s), resistencia a flexión (R_f) y resistencia a compresión (R_c). La dureza superficial (D_s), se determinó mediante el uso de un durómetro tipo Universal, marca Karl Frank serie 500, empleando una bola de acero de 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ "), aplicando una precarga de 10kg, y adicionando a ésta una carga de 62.5 kg. El valor de la dureza (adimensional), se determinó como función inversa de la diferencia entre la penetración de la bola con la carga de 72.5 kg y con la carga de 10 kg.

Los ensayos de resistencia a la flexión (R_f) y resistencia a la compresión (R_c) se realizaron según las recomendaciones de las normas UNE-EN 12372:2007 y UNE-EN 1926:2007, respectivamente.

Finalmente, las variaciones cromáticas fueron medidas al cuantificar las coordenadas cromáticas (a, b), y el factor de luminancia (L) del sistema CIELAB en los especímenes antes y después de la consolidación. Se utilizó un colorímetro MiniScan XE Plus, con rango de medición de 350 a 750 nm y precisión de longitud de onda de $\pm 0,5$ nm. La diferencia de color (ΔE) se calculó con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (4-1)$$

Donde:

L_1^* = luminosidad del espécimen sin tratar

a_1^* = coordenada cromática (variación rojo-verde) del espécimen sin tratar

b_1^* = coordenada cromática (variación amarillo-azul) del espécimen sin tratar

L^*_2 = luminosidad del espécimen tratado

a^*_2 = coordenada cromática (variación rojo-verde) del espécimen tratado

b^*_2 =coordenada cromática (variación amarillo-azul) del espécimen tratado

4.4 Resultados

4.4.1 Caracterización de materias primas

Los resultados de XRD para la arcilla común, presentan los siguientes minerales: esmectitas (montmorillonita), illita, caolinita y clorita por parte del grupo de los filosilicatos, así como plagioclasas (albita) y cuarzo. En cuanto al caolín, el análisis mostró como principales minerales al cuarzo, muscovita, caolinita, illita y esmectita (montmorillonita).

4.4.2 Caracterización de especímenes fabricados

La mineralogía de los especímenes calcinados se presenta en la Figura 4-1. Se observa como principales minerales al cuarzo, plagioclasas (albita) y hematita. No se detectan ni filosilicatos ni minerales neo-formados (formados a partir de la descomposición de minerales de arcilla bajo altas temperaturas de calcinación). Soto el al, (en proceso de publicación) indican que la temperatura de 900°C, fue suficiente para lograr la destrucción de los filosilicatos pero que posiblemente los minerales neoformados no lograron un porcentaje significativo en la matriz (>5%) para ser detectados por XRD.

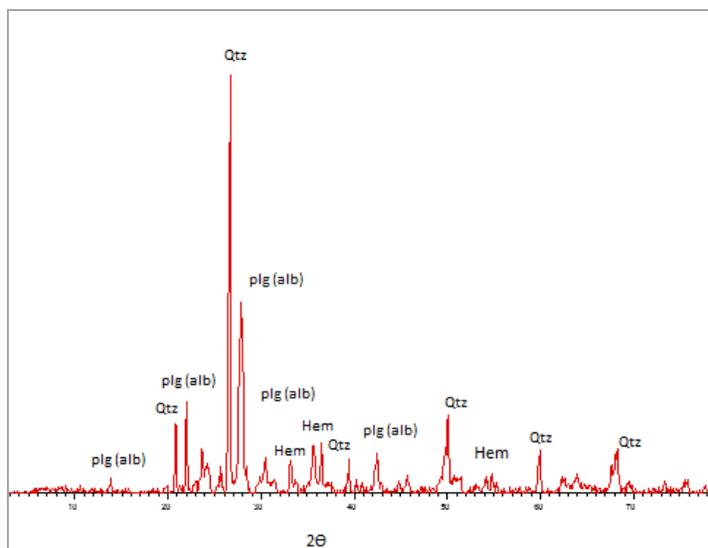


Figura 4-1. Difractograma de especímenes fabricados. El eje Y corresponde a Intensidad
Nomenclatura: Hem: hematita, plg (alb): plagioclasa albita, Qtz: cuarzo

En cuanto a los resultados de SEM/EDX, la morfología de los especímenes presentó granos irregulares y la deformación de algunos granos debido al proceso de sinterización. No se detectaron formas laminares típicas de los filosilicatos, información coincidente con los resultados mineralógicos (ver Figura 4-2).

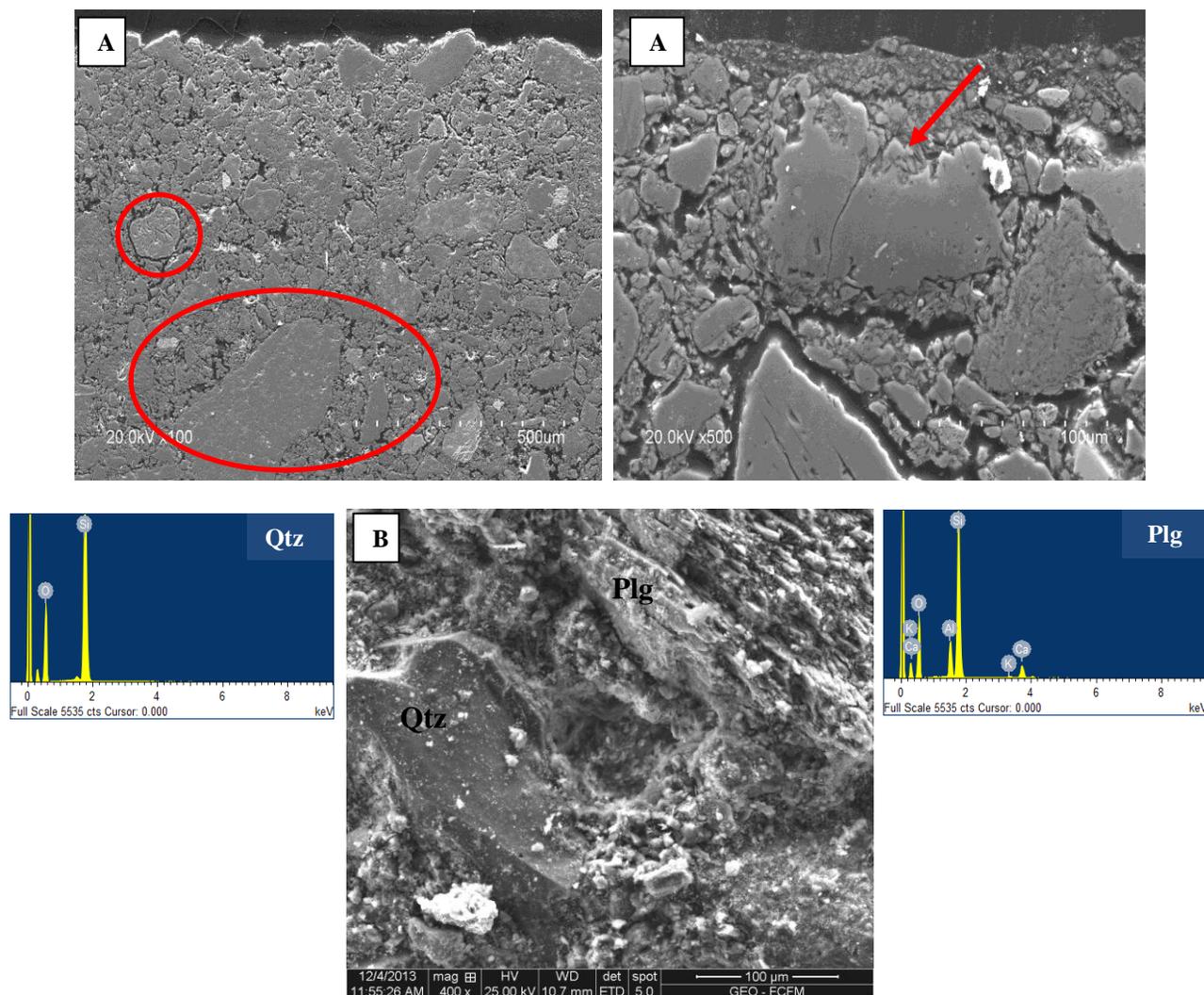


Figura 4-2 . A) Izquierda: matriz con granos irregulares predominantemente, derecha: inicio de deformación de granos en matriz, B) Principales minerales detectados
Nomenclatura: Plg: plagioclasa, Qtz: cuarzo

4.4.3 Determinación de la efectividad del método de aplicación del consolidante

En la Figura 4-3, se observa que durante la primera hora de inmersión, los especímenes absorbieron el 89% del total de consolidante, lo que representó un aumento de peso del 14.7%.

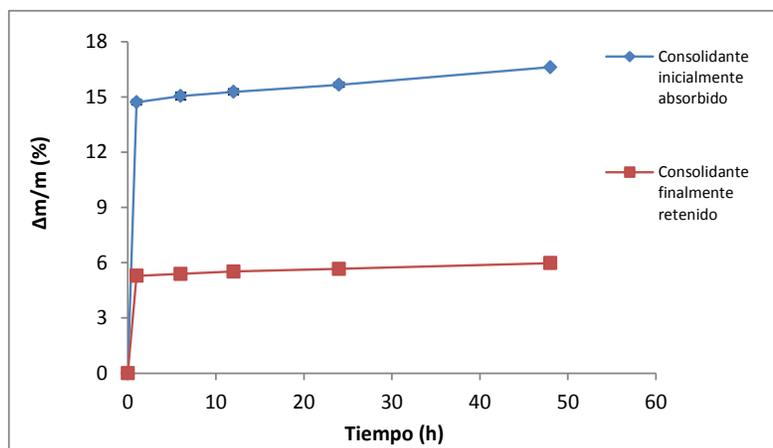


Figura 4-3 . Absorción y retención del consolidante por inmersión en distintos plazos, para determinar el tiempo de inmersión más significativo

La ganancia final de peso en promedio fue de 5.6% (evaporándose aproximadamente un 64% del consolidante). En todos los casos, la cantidad de consolidante finalmente retenido fue constante. A partir de estos resultados, se determinó a la inmersión a 1 hora (I_{1H}) como la más significativa, debido a la poca influencia de tiempo adicional de inmersión en la absorción del consolidante.

Para los métodos de aplicación “in situ”, el método que logró la mayor eficiencia fue la aplicación con brocha (Tabla 4-2). La ventaja de los demás métodos de colocación, fue que lograron una mayor penetración del consolidante. Sin embargo, estos métodos no aseguraron que la consolidación se lograra de forma homogénea entre la capa consolidada y la no consolidada, lo que fue observado en el laboratorio (ver Figura 4-4).

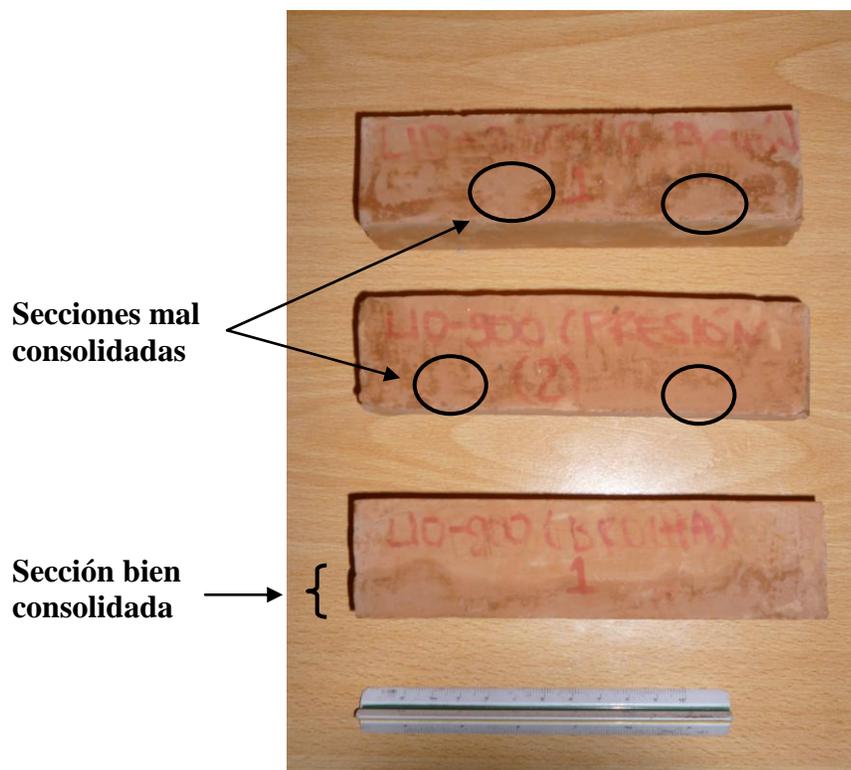


Figura 4-4. Detalle de consolidación para métodos estudiados
Arriba: rociador manual sin presión, medio: rociador con presión, abajo: brocha.

Al evaluar el desempeño logrado con la brocha, se encontró más producto distribuido de manera uniforme en la zona tratada (Figura 4-4), aspecto que se cuantifica en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Evaluación del método de aplicación de mayor eficiencia

Método de colocación	Volumen absorbido/volumen aplicado	Profundidad penetración mínima (cm)	Profundidad penetración máxima (cm)	Profundidad penetración promedio (cm)
Brocha	0.8	1.4	1.7	1.5
Rociador sin presión	0.3	1.5	3.5	2.5
Rociador con presión	0.3	2.5	4.0	3.5

Posteriormente, se evaluó la aplicación del consolidante con brocha 1^{era} aplicación (B_{1A}) y 2^{da} aplicación (B_{2A} , especímenes previamente consolidados). Los resultados se presentan en la Figura 4-5.

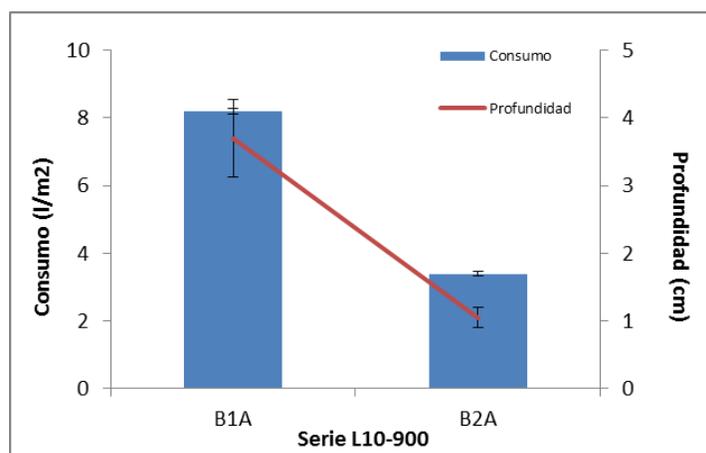


Figura 4-5 Consumo y profundidad logrados para L10-900, B_{1A} y B_{2A}

Los consumos utilizados en B_{2A} , disminuyen aproximadamente la mitad en comparación con los utilizados en B_{1A} . Asimismo, la penetración visual observada se reduce a 1.0 cm. Los resultados explican que B_{2A} incrementa la efectividad del tratamiento, ya que logra reducir la penetración del consolidante hacia la zona más superficial del ladrillo (vulnerable al deterioro) y de esta manera impermeabilizar en el sustrato impidiendo el acceso de agentes dañinos. Como se observa en la Figura 4-6, B_{2A} enfoca la consolidación a un área superficial más específica con un menor consumo de consolidante.

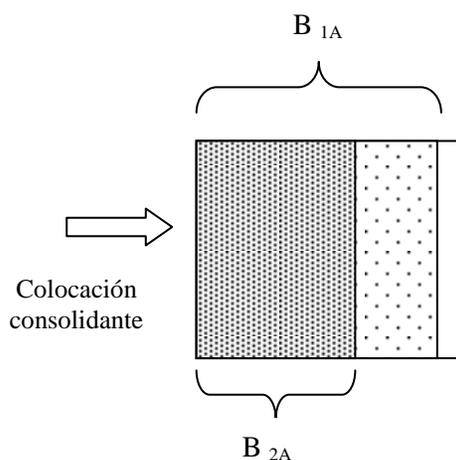


Figura 4-6 Sección transversal, medición de profundidad de penetración lograda para B_{1A} y B_{2A}

Por otro lado, la comparación entre el porcentaje de consolidante inicialmente absorbido colocado y finalmente retenido para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} , se presenta en la Figura 4-7. I_{1H} , absorbe y retiene la mayor cantidad del consolidante. En cuanto a la brocha, un segundo tratamiento de aplicación ($B_{1A}+B_{2A}$) retiene aproximadamente un 80% del logrado con I_{1H} . Los resultados indican que dada la retención del consolidante en B_{1A} (50%), la aplicación B_{2A} resulta conveniente.

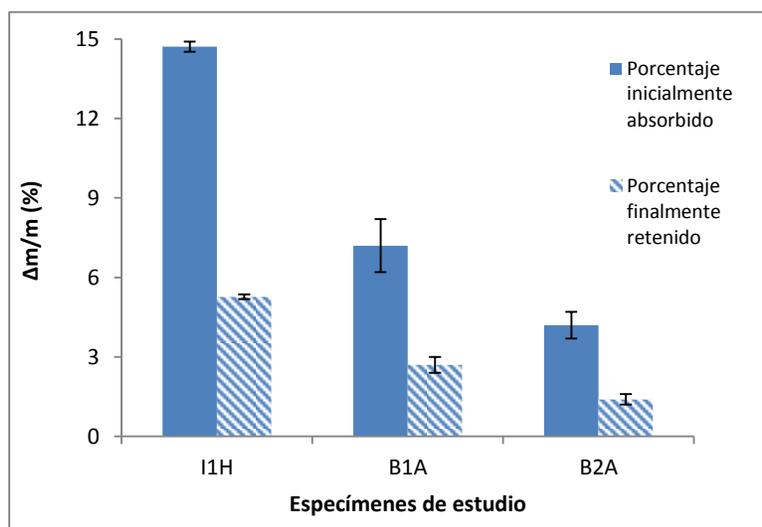


Figura 4-7. Absorción inicial y retención del consolidante para los métodos de aplicación estudiados

4.4.4 Evaluación de la efectividad de las aplicaciones del consolidante sobre las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo

- **Variación en propiedades hídricas: ensayo de desorción y MIP**

Los resultados de la distribución de poros Sin Consolidante (SC) y Con Consolidante (CC) para el caso I_{IH} se presentan en la Figura 4-8. Se observó que para los especímenes CC, la disminución en el volumen de poros fue de un 32.0%. Esto se debió a una menor proporción de poros accesibles al agua después de la consolidación. De los resultados, se tiene que los poros entre 0.1-1 μm en los especímenes SC, (HR=100 y 97%) representaron ~48.0%; en cambio para los especímenes CC dicho valor fue de 35.4%. Asimismo, los poros de 0.01-0.1 μm para los especímenes SC, (HR 97-90%) representaron ~47.7%; en cambio, para los especímenes CC dicho valor alcanzó 29.3%. Finalmente, poros < 0.01 μm (HR=90%) representaron ~4% en los especímenes SC, lo que disminuyó a 3.3% en los especímenes CC.

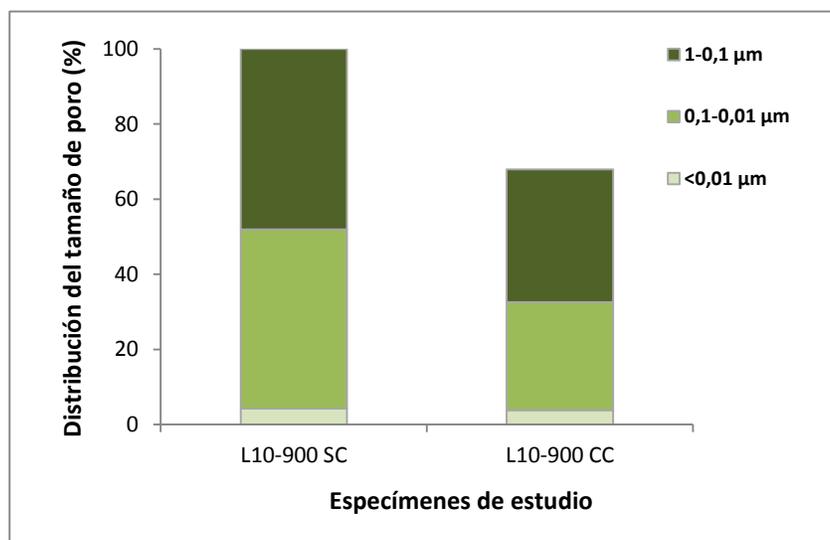


Figura 4-8. Re-distribución del tamaño de poro para I_{IH} a partir de la aplicación del consolidante en los especímenes
Nomenclatura: SC: sin consolidante, CC: con consolidante

Los resultados indican que la consolidación actúa en tamaños de radio de poro $<1\mu\text{m}$, principalmente los ubicados entre $0.01-0.1\mu\text{m}$. Los poros capilares $<1\mu\text{m}$, son los más susceptibles a problemas por ciclos hielo-deshielo, cristalización e hidratación de sales y ataque de gases (Elert et al, 2003; Cultrone et al, 2004; Alexandre y Villegas, 2009). Estos problemas atacan al ladrillo, afectando directamente su durabilidad. La disminución de este rango de poros al aplicar el consolidante en el sustrato, revalida los beneficios del tratamiento.

Por otro lado, los resultados MIP de la Figura 4-9, mostraron una disminución en la porosidad total al aplicar el consolidante de 8.2%. Este fenómeno se explicó por una disminución del 0.6% en los poros de aire ($>10\mu\text{m}$), un aumento de 9.0% en los poros capilares ($0.01-10\mu\text{m}$) y un aumento de 0,2% en los poros de gel ($<0.01\mu\text{m}$).

El aumento en los poros capilares, se debe posiblemente a que los poros de aire ($>10 \mu\text{m}$) son llenados parcialmente al ser consolidados y se contabilizan como poros capilares ($0.01-10 \mu\text{m}$) después de la consolidación. Asimismo, el aumento en los poros de gel ($<0.01\mu\text{m}$), puede deberse al agrietamiento del consolidante producto de la tensión producida por fuerzas capilares en estos poros, ya que cuando la tensión supera a la resistencia del consolidante, se produce la rotura (Mosquera et al, 2003; Maravelaki-Kalaitzaki et al, 2008; Zárraga et al, 2010). Los esfuerzos residuales propios de la gelificación durante el curado del consolidante pueden también agravar este problema. Estos aumentos no fueron percibidos en el ensayo de desorción, probablemente debido a la falta de precisión del mismo en comparación con MIP.

Finalmente, para B_{1A}, la porosidad final lograda fue de 27.6%, con una distribución de poros de aire de 1.8% y con un porcentaje de poros capilares del 25.8% (Figura 4-9).

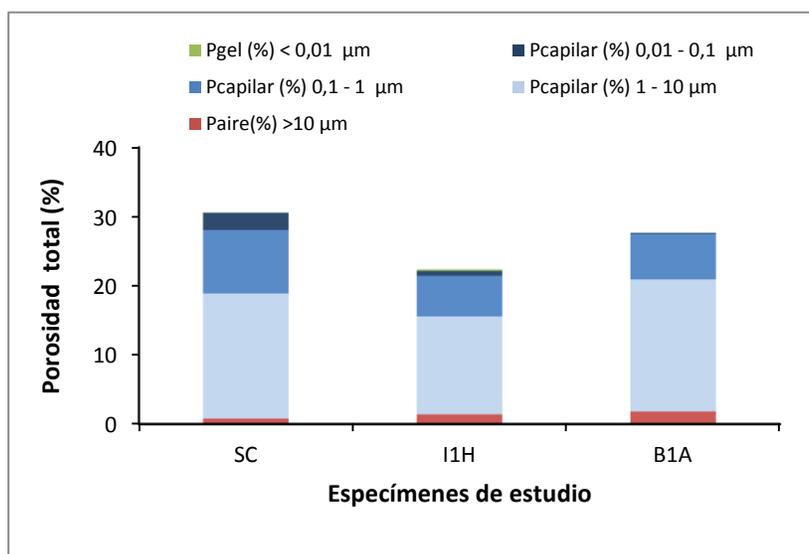


Figura 4-9. Re-distribución de porosidad total después de la consolidación
Nomenclatura: SC: sin consolidante; I_{1H}: Inmersión a 1 hora; B_{1A}: brocha 1 aplicación

Los resultados obtenidos por el ensayo de desorción y MIP apuntan a la disminución del rango de poros ubicados principalmente entre 0.01 a 0.1 μm . Asimismo, otro rango de que logró también considerable disminuciones fue 0.1 a 1 μm . Por tanto, se ratifica el efecto positivo que tiene la consolidación sobre el tipo de poros más vulnerable al ingreso de agentes dañinos, según se indicó en párrafos anteriores.

▪ **Variación en propiedades físicas: densidad y permeabilidad**

Los resultados obtenidos al comparar las propiedades físicas pre y post consolidación para: I_{1H}, B_{1A} y B_{2A} se presentan en la Tabla 4-3. De los resultados en densidad real y aparente (ρ_{real} y ρ_{aparente}), se encontró un aumento en la ρ_{aparente} conforme se adicionaba el consolidante en el sustrato. Los mayores aumentos alcanzados fueron para el método I_{1H}, el método donde se aplicó más consolidante.

Tabla 4-3. Variación propiedades físicas pre y post consolidación para los métodos de aplicación utilizados

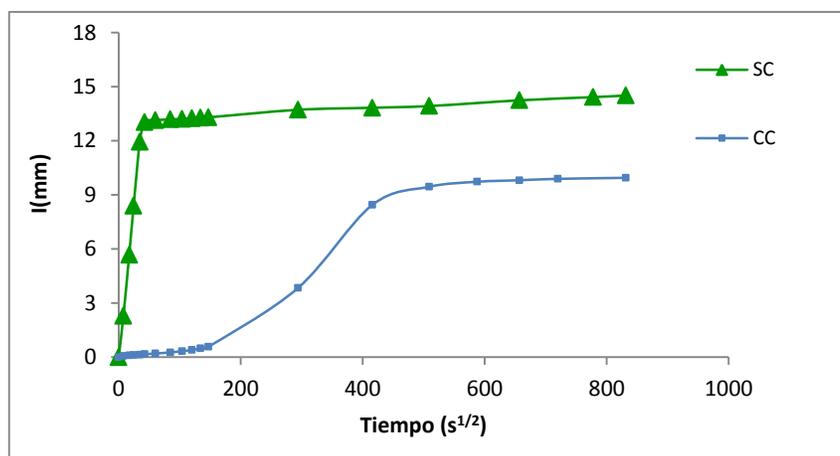
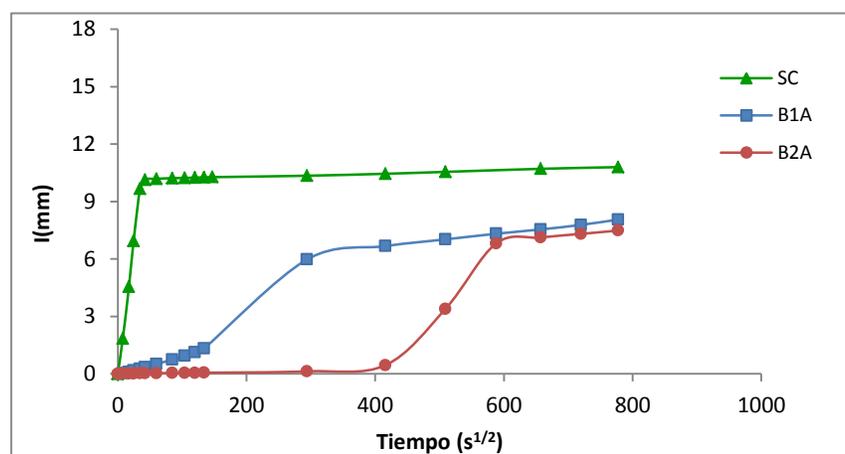
Tipo tratamiento	ρ_{aparente} (g/cm ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	P.a. (%)	Ip (%)	S (%)	Cc	Espécimen
S.C.	1.83	2.65	31.14	2.52	94.48	0.32	L10-900
I _{1H}	1.93	2.58	25.10	7.87	93.12	0.029	
S.C.	1.80	2.60	30.95	2.84	97.16	0.280	
B. 1A	1.85	2.55	27.65	5.18	95.23	0.029	
B. 2A	1.89	2.55	25.71	7.19	92.81	0.037	

Nomenclatura: S.C.: sin consolidante, I_{1H}: inmersión 1 hora, B_{1A}: brocha 1^{era} aplicación, B_{2A}: brocha 2^{da} aplicación

En cuanto a la porosidad abierta (P_a), se logró una disminución del 6.0, 3.3 y 5.2 %, para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} , respectivamente. Los resultados indican que B_{2A} , logra un comportamiento similar al alcanzado por I_{1H} , resaltando las ventajas de la re-impregnación.

En cuanto a interconexión de poros (IP), la disminución de este parámetro fue de 4.4, 2.3 y 4.4 % para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} , respectivamente. Siendo el comportamiento obtenido en I_{1H} igual al resultante para B_{2A} . La reducción lograda con B_{1A} , es de un 50% inferior a la lograda en los demás casos. Esto evidencia nuevamente el buen desempeño logrado con B_{2A} .

De los resultados del coeficiente de absorción capilar (C_c) en la Figura 4-10, se observa un mejor desempeño inicial de B_{1A} en comparación con I_{1H} . Esto posiblemente porque con B_{1A} se consolida la cara tratada, formando intencionalmente una capa superficial homogénea (aplicación de consolidante hasta saturar poros superficiales). En el caso I_{1H} , que se aprecia en la Figura 4-10, A, el consolidante se distribuye homogéneamente por todas las caras de la probeta, generando una mayor penetración, lo que no forma necesariamente un “sello”, pero sí estabiliza primero los especímenes tratados.

A) Curvas C_C para I_{1H} B) Curvas C_C para B_{1A} y B_{2A} **Figura 4-10.** Absorción capilar para los especímenes

Para el caso B_{1H} en comparación con I_{1H} se obtiene un menor coeficiente de absorción capilar, pero la absorción final de I_{1H} es significativamente menor a la lograda con B_{1H} , lo que demuestra la menor penetración del consolidante aplicado con brocha (ver Figura 4-10, B). Para B_{2H} , el efecto de la consolidación es aún mayor y la curva de ascenso inicia después del segundo día de contacto con el agua. Sin embargo, se observa un efecto negativo, ya que el valor de coeficiente de absorción aumenta en B_{2A} al compararse con

B_{1A} . Esto probablemente debido a que una vez superada la “barrera” del consolidante en B_{2A} , la absorción es más rápida que en B_{1A} (“barrera” menos densa).

Por último, el parámetro de saturación (S), disminuyó un 1.4%, 1.9% y 4.4%, para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} , respectivamente (ver Tabla 4-3). Para I_{1H} , estos resultados resultaron ser atípicos ya que la reducción en saturación no concuerda con la reducción obtenida en porosidad abierta.

- **Variación en dureza superficial y propiedades mecánicas**

La Figura 4-11, presenta los resultados de dureza superficial de los especímenes antes y después de la consolidación. El aumento en la dureza superficial, se explica por un aumento en la resistencia a la penetración del sustrato de 42, 31 y 64% para I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} , respectivamente.

Dado que I_{1H} es una condición ideal de consolidación y que la ganancia en dureza superficial para I_{1H} es mayor a la lograda en B_{1A} , se demuestra que una segunda aplicación (B_{2A}) es recomendable para mejorar el desempeño del consolidante en el sustrato.

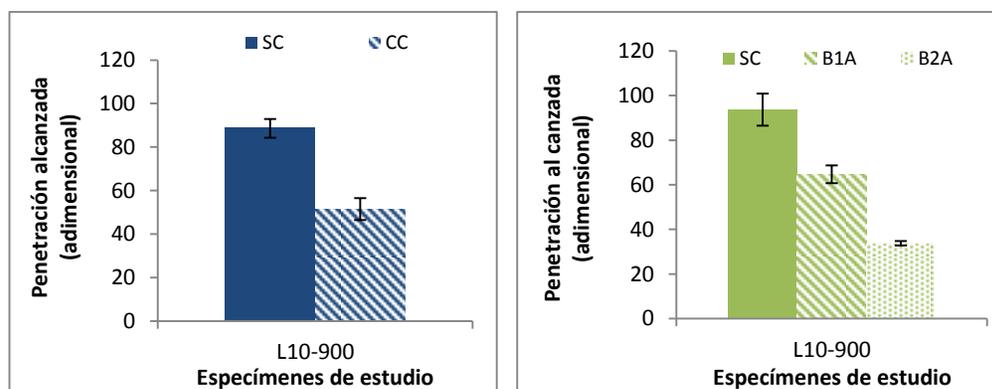


Figura 4-11. Penetración superficial por bola de acero (6mm) obtenida para los métodos de aplicación estudiados
Izquierda: I_{1H}, Derecha: B_{1A} y B_{2A}

En cuanto a la eficiencia de la consolidación, se tiene que para B_{1A} se logró una reducción en la penetración superficial de 31% con un consumo de 8.2 l/m². Para B_{2A}, se logró una reducción en la penetración superficial de 33% adicional con un consumo de 3.4 l/m². Esto indica que al re-impregnar el sustrato se logran ganancias adicionales en dureza superficial con bajos consumos de consolidante. El total de consolidante absorbido por I_{1H} fue de 14.7% mientras que para B_{1A}+B_{2A} el total absorbido fue de 11.4%, siendo el mayor desempeño adquirido para este último tratamiento.

En la Figura 4-12, se presentan los resultados de resistencia a flexión (R_f) pre y post consolidación para I_{1H}, B_{1A} y B_{2A}. Los aumentos en resistencia a flexión pueden explicar mejor la adherencia lograda entre el sustrato y el consolidante. El incremento en resistencia a flexión fue de 41, 31 y 71 %, para I_{1H}, B_{1A} y B_{2A}, respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos con dureza superficial e indican una correlación entre ambos parámetros.

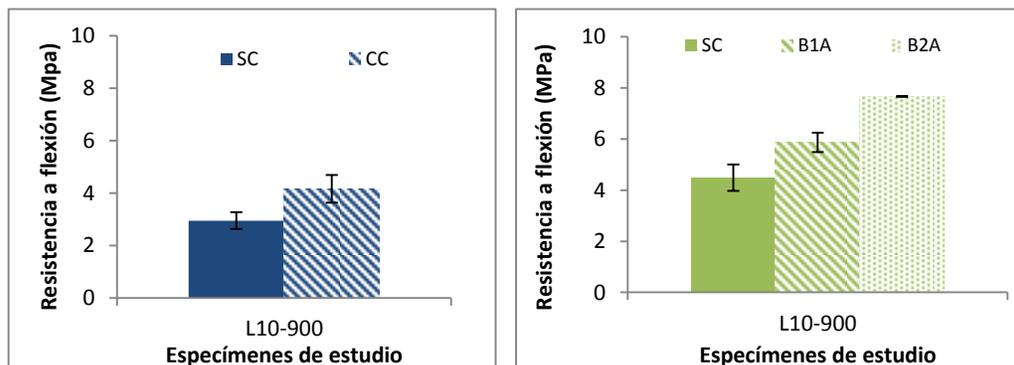


Figura 4-12. Resistencia a flexión obtenida para los métodos de aplicación estudiados Izquierda I_{IH} , Derecha B_{1A} y B_{2A} .

De acuerdo con Toniolo et al (2011), es conveniente que un consolidante incremente la resistencia a flexión de un material tratado sin exceder 1.5 veces a la muestra sin tratar, ello con el fin de evitar grandes diferencias entre la sección consolidada y la sección no alterada sin consolidar, ya que esto podría generar desprendimientos de la sección.

Para el caso, I_{IH} (41%) y B_{1A} (31%), la muestra cumple con el requisito. Sin embargo, en B_{2A} el límite es excedido en un 21%. Este resultado en conjunto con el obtenido en absorción capilar, exponen las precauciones que se deben considerar al re-impregnar un sustrato.

Por último, los resultados de resistencia a compresión (R_c) se presentan en la Figura 4-13. Las ganancias logradas en resistencia a compresión fueron de 45, 31 y 77 % para I_{IH} , B_{1A} y B_{2A} , respectivamente.

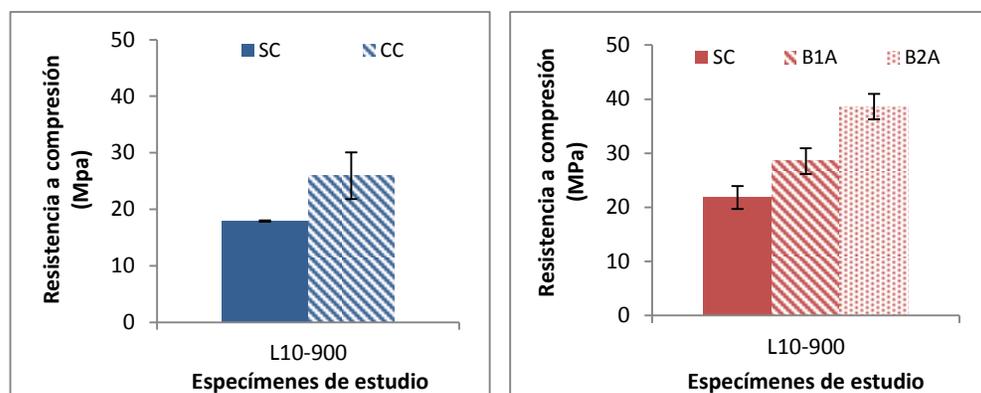


Figura 4-13. Resistencia a compresión de especímenes, según los métodos de estudio Izquierda I_{IH} , Derecha B_{1A} y B_{2A}

Los resultados obtenidos en dureza y resistencia mecánica se explican por la disminución lograda en poros capilares $<1\mu\text{m}$ según el ensayo de desorción y MIP. Para B_{1A} , la disminución en el rango de poros fue insuficiente si se compara con I_{IH} . Sin embargo, dados los resultados de B_{2A} , la re-impregnación resultó ser el método más eficiente de los estudiados para aplicar el consolidante, ya que logró las mayores ganancias en permeabilidad y resistencia mecánica. No obstante, parámetros como absorción capilar y resistencia a flexión, parecen indicar una mejora muy superior que podría afectar el desempeño final de la consolidación.

▪ Colorimetría

La colorimetría, se utilizó para determinar la variación cromática de los especímenes antes y después de la consolidación. La variación del color resulta un tema relevante a la hora de intervenir edificaciones en especial las de carácter patrimonial. Esto, porque el tratamiento

a aplicar debe provocar la menor alteración estética del material, por lo que se deben de evitar cambios bruscos en el color del ladrillo.

La Tabla 4-4 presenta en forma cuantitativa el cambio en variación cromática de I_{1H} , B_{1A} y B_{2A} . En cuanto al factor de luminosidad L^* , se observa que en todos los casos este ha disminuido ($L_2^* < L_1^*$), lo que cuantifica el efecto oscurecedor provocado por el consolidante. La disminución en los parámetros a^* y b^* implican cambios de los especímenes hacia tonos más verdes y azules, respectivamente.

Para B_{1A} , los cambios cromáticos obtenidos son menores a los reportados por I_{1H} . Para B_{2A} , los cambios cromáticos son superiores a los obtenidos con I_{1H} . Esto coincide con los resultados obtenidos en permeabilidad y propiedades mecánicas anteriormente, donde la efectividad de I_{1H} es superior al compararse con B_{1A} pero inferior a la lograda con B_{2A} .

Maravelaki-Kalaitzaki et al (2008), indican como conveniente un límite máximo para el cambio cromático de $\Delta E < 5$. Por lo que siguiendo esta recomendación, todas los especímenes de estudio cumplen con el requisito. Esto provoca una leve alteración en el color de los especímenes por efecto de la consolidación, que resulta en una solución adecuada para implementar en edificaciones, en especial las de carácter patrimonial.

Tabla 4-4. Resultados de colorimetría para I_{1H}, B_{1A} y B_{2A}

Ladrillo L10-900	Parámetros de evaluación cromática						
	Antes consolidación			Después consolidación			
Caso	L ₁ *	a ₁ *	b ₁ *	L ₂ *	a ₂ *	b ₂ *	ΔE
I _{1H}	55.9	18.4	27.0	54.0	17.0	24.1	3.8
B _{1A}	55.8	17.3	25.7	55.8	14.6	24.1	3.1
B _{2A}	55.8	17.3	25.7	52.3	16.3	24.1	3.9

4.5 Conclusiones

La caracterización del material cerámico arrojó como principales minerales al cuarzo, plagioclasas y hematita, sin la presencia de filosilicatos ni vitrificación. Se detectó la transformación de los granos irregulares hacia granos deformados debido al proceso de sinterización.

La brocha resultó ser el método más efectivo de aplicación “in situ” del consolidante, porque logró crear una capa homogénea visualmente notable durante la aplicación. Los demás métodos de aplicación lograron mayores penetraciones del consolidante pero de forma heterogénea. La consolidación homogénea es necesaria para impermeabilizar adecuadamente los primeros centímetros del ladrillo (en continuo contacto con el medio) con el fin de evitar el ingreso de agentes dañinos. Las heterogeneidades provocan variaciones en permeabilidad así como diferentes comportamientos mecánicos en una misma zona, que pueden llevar al desprendimiento del material tratado.

La determinación del consumo se clasificó en dos categorías. Una aplicación inicial con un alto consumo de 8.2 l/m^2 y eficiencia media y una re-impregnación con consumos adicionales bajos de 3.2 l/m^2 y eficiencia media-alta para el método con brocha.

La comparación de los métodos de aplicación arrojó las mayores ganancias en propiedades físicas y mecánicas para la re-impregnación del sustrato. Sin embargo, debido a las altas ganancias logradas en resistencia a flexión, conviene aplicar este método en sustratos muy dañados, donde se deba recuperar considerable ($>50\%$) resistencia mecánica y adherencia.

En cuanto a colorimetría, los cambios de color de los especímenes provocados por la consolidación, no superaron el límite de alteración recomendado en la literatura ($\Delta E < 5$). Esto indica que ningún método de aplicación afectó de forma importante el aspecto estético de las muestras. Este es un factor clave a la hora de intervenir edificaciones patrimoniales, ya que una intervención efectiva en este tipo de edificaciones busca el mínimo impacto visual posible.

Los resultados de esta investigación conducen a una línea de investigación dirigida hacia la optimización de la aplicación del consolidante. Es decir, a partir de una dosificación en laboratorio, desarrollar especificaciones de terreno para mejorar la técnica de consolidación y el desempeño a lograr en ladrillos.

El entendimiento de la relación dosis-efectividad, y los efectos del método de aplicación sobre ésta, son una guía para comprender más claramente la técnica de consolidación en materiales cerámicos, y permite brindar un criterio para futuras intervenciones que se deseen realizar en el patrimonio nacional y edificaciones contemporáneas.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa Wacker por proveer del consolidante para la realización de los ensayos y a la empresa Princesa Ltda, por brindar las materias primas para la realización de los especímenes. Por último, se agradece la valiosa colaboración de los profesores Pablo Pastén del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Gloria Arancibia, del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile proyecto FONDAP-CONICYT 15090013, por la caracterización de materias primas y especímenes fabricados.

Referencias

Alejandro, F.J. y Villegas R. (2009). Estudio de la alterabilidad y efecto de tratamientos de conservación para los ladrillos de la portada de la iglesia de Santa María de Jesús (Sevilla). *Materiales de Construcción*, 293(59), 85-103.

ASTM C1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes).

Carta de Atenas (1931). IV Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM). Rescatado de http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_de_atenas_1931_spa_orof.pdf

Casanova, G. (2005), Impregnación de polímeros para la rehabilitación de estructuras patrimoniales de ladrillos, *Tesis para optar al título de ingeniero constructor y grado académico en ciencias de la construcción*, Universidad de Valparaíso.

Convención de Protección de Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado (1954). La Haya, mayo 1954. Rescatado de <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/UNESCO.convencion.1954.proteccion.patrimonio.caso.guerra.pdf>

Cultrone, G., Sebastián E., Elert K., De la Torre M.J, Cazalla O. y Rodríguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 547-564.

Cultrone G. y Madkour F. (2013). Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (4) 304-310.

Elert K., Cultrone G., Rodríguez-Navarro C. y Sebastián E. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historical buildings –influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage* 4(1), 91-99.

Ferreira A.P. y Delgado J. (2008). Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage*. 9(1) 38-53.

ICOMOS (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. Rescatado de http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf

ICOMOS (2008). Carta para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural Comité Científico Internacional del ICOMOS. 16ª Asamblea General del ICOMOS, Québec (Canada). Rescatado de http://www.icomos.org/charters/interpretation_sp.pdf

Illescas J. (2012). Nuevos Nanomateriales para la Conservación del Patrimonio monumental Andaluz. *Tesis doctoral*. Departamento de Química física, Universidad de Cádiz.

Industrias Princesa. Entrevista personal y visitas técnicas realizadas en la planta de producción de Industrias Princesa Ltda, Quilicura, Santiago de Chile. 2013.

López-Arce, P (2004). Ladrillos de edificios históricos de Toledo: Caracterización, origen de las materias primas y aplicaciones para su conservación y restauración. *Memoria para optar al grado de doctor*, Universidad Complutense de Madrid.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Kallithrakas-Kontos N., Agioutantis Z., Maurigiannakis S. y Korakaki D. (2008). A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents. *Progress in Organic Coatings* 62 (1) 49-60.

Mosquera M. J., Pozo J. y Esquivias L. (2003). Stress during drying of two stones consolidants applied in monumental conservation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 26(1-3), 1227–1231.

Municipalidad de Santiago (2012). *Catálogo de inmuebles de conservación histórica. Asesoría urbana 2005-2006*. Santiago de Chile, 2012.

Prada J.L., Valenciano A. y Navarro A. (1996). Procesos de alteración de materiales pétreos en edificios de interés histórico. *Acta Geológica Hispana*, 30 (1), 97-110.

Sandrolini F., Franzoni E. y Pigino B. (2012). Ethyl silicate for surface treatment of concrete-Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate. *Cement and Concrete Composites* 34 (3) 306-312.

Soto M., Martínez P. y López M. (En proceso de publicación). Influencia de la microestructura del sustrato en el efecto consolidante del silicato de etilo en las propiedades mecánicas y de transporte en ladrillos. *Construction and Building Materials*.

Toniolo L., Paradisi A., Goidanich S. y Pennati G. (2011). “Mechanical behaviour of lime based mortars after surface consolidation”. *Journal Construction and Building Materials* 25 (4) 1553-1559.

UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

UNE-EN 1926:2007. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNE-EN 12372:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.

UNESCO (2000). Carta de Cracovia. Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido. Rescatado de http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_cracovia_2000_spa_orof.pdf

UNI-EN 13755 Natural Stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure.

Zárraga R., Cervantes J., Álvarez D. E., Reyes V., Salazar-Hernández C. (2006). Investigación científica en la conservación de monumentos de cantera. *Acta Universitaria*, 16(2) 38-50.

Zárraga R., Cervantes J., Salazar-Hernández C y Wheeler G. (2010). Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 11 (2) 138-144.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

La consolidación del ladrillo cerámico, a partir de la aplicación de silicato de etilo, es una técnica prometedora para preservar este material de las agresiones a las cuales se ve sometido. Los resultados obtenidos en esta investigación presentaron mejoras en permeabilidad (porosidad, interconexión de poros y distribución del tamaño de poro), en dureza superficial y propiedades mecánicas, interacción sustrato-consolidante y en general pocas variaciones en el color.

5.1 Conclusiones

- Del programa experimental se realizaron 5 tipos de ladrillos con diferentes microestructuras. Para esto se utilizó 3 diferentes temperaturas de calcinación y 3 diferentes contenidos de caolín. Los ladrillos fabricados para la investigación fueron realizados a mano en el laboratorio, por lo tanto en ladrillos artesanales es posible que se encuentren nuevos antecedentes a partir de la investigación realizada.
- La efectividad de la consolidación está estrechamente relacionada con la microestructura del ladrillo. Parámetros como distribución del tamaño de poros, porosidad abierta e interconexión de poros influyen en la dosis de consolidante a utilizar y el desempeño final logrado. Sin embargo, en el análisis se comprobó la

existencia de una interacción consolidante-sustrato en los ladrillos que afecta adicionalmente el desempeño de los ladrillos.

–

– La efectividad en la consolidación se explicó principalmente por la disminución en poros bajo 1 μm . Sustratos con altas porosidades y altas cantidades de poros bajo 1 μm son más susceptibles a deterioro por ciclos hielo-deshielo, hidratación y cristalización de sales, según lo expresa la literatura. La disminución en estos poros se refleja como disminución en la permeabilidad y aumento en la resistencia mecánica, aumentando la durabilidad del ladrillo.

– La brocha fue un mejor método “in situ” que el rociador. Esto porque logró crear una capa homogénea durante la aplicación del consolidante y logró el menor desperdicio. El rociador sin presión y el rociador con presión, se aplican de forma rápida, pero no distribuyen de manera homogénea el consolidante en la superficie tratada.

– Ladrillos con mayor tamaño promedio de poros y mayor interconexión de poros, utilizaron un mayor consumo de consolidante y mejoraron en menor proporción sus propiedades físicas y mecánicas. Ladrillos con menor tamaño de poro y menor interconexión de poros, utilizaron un menor consumo de consolidante y mejoraron de manera importante la calidad final del sustrato (anexo 6.6 y 6.8).

- La re-impregnación de los ladrillos previamente consolidados, logró considerables mejoras en permeabilidad (porosidad, interconexión de poros, absorción capilar), resistencia a compresión, flexión y dureza superficial. Esto fue para todos los ladrillos de estudio, excepto para L10-800, donde se lograron bajas ganancias en resistencia mecánica (anexo 6.8).

- Según la literatura, es importante estudiar el perfil de dureza del sustrato a tratar. Lo ideal es lograr un perfil uniforme entre el sustrato alterado que se debe consolidar con el sustrato no alterado. Por lo que conviene re-impregnar sustratos muy deteriorados, donde se deba recuperar un importante porcentaje de la permeabilidad y cohesión perdidas.

- La consolidación con brocha, logró un menor desempeño que la inmersión total a 1 hora. Sin embargo, la aplicación de una segunda aplicación con brocha (re-impregnación) logró el mayor desempeño de los tres métodos.

- En los casos de mantenimiento y prevención, conviene realizar una únicamente una aplicación del consolidante. Re-impregnar sustratos poco deteriorados, puede incrementar de forma excesiva la dureza, resistencia y permeabilidad. Las transiciones poco graduales entre la zona consolidada y la zona interna sin consolidar pueden agravar el daño y causar problemas como desprendimientos.

5.2 Recomendaciones e investigaciones futuras

- Según la revisión bibliográfica, se debe de tener cuidado a la hora de aplicar el consolidante. La efectividad de la consolidación puede verse comprometida según el tipo de material aplicarse por ejemplo: silíceo vs calcáreo, con sal o altos contenidos de humedad.
- Con el fin de incluir el factor “terreno” dentro de la investigación, conviene implementar ensayos de envejecimiento en los ladrillos. Resulta interesante entender el comportamiento del consolidante en ladrillos en dos casos de estudio: ladrillos previamente deteriorados así como deteriorados postconsolidación. En el primer caso, se explicaría la consolidación en ladrillos deteriorados como los encontrados en las edificaciones patrimoniales. En el segundo caso, se realizarían ensayos de envejecimiento (ciclos mojado-secado) con el fin de poner a prueba la efectividad del consolidante por agresiones físicas.
- Asimismo, en el caso de querer aplicar los ensayos realizados en esta investigación en una estructura real, conviene aplicar ensayos como: mineralogía, colorimetría, dureza superficial, coeficiente de absorción capilar y distribución del tamaño de poro que son ensayos no destructivos a aplicar en edificaciones históricas. Esto en al menos 6 especímenes debido a la variabilidad del ladrillo artesanal. Una primera clasificación de las muestras se llevaría mediante el análisis del color de los ladrillos a estudiar.

- A partir de estos resultados se entraría a una línea de investigación donde se pueda cuantificar la cantidad de consolidante y de esta forma definir la dosis según los casos de mantención: preservación, mantenimiento y rehabilitación. Dados los resultados de la aplicación con brocha conviene realizar una aplicación con brocha para casos de conservación y mantenimiento (resistencia mecánica bajo 30%) y la re-impregnación del sustrato para resistencias mecánicas altas.

- Conviene determinar mediciones del perfil de dureza del sustrato y permeabilidad de vapor de agua no determinadas en esta investigación

- La utilización de técnicas de aplicación del consolidante “in situ” como empapado de la superficie (compresas) durante tiempos controlados de aplicación serían interesantes de analizar en comparación con los métodos de aplicación típicamente conocidos. Esto con el fin de aumentar el tiempo de contacto entre superficie y consolidante. Asimismo, la implementación de una tercera aplicación con brocha es realizable, para comprobar nuevos incrementos en las variables objetivo.

- Por último, resulta interesante estudiar la interacción entre mampostería (ladrillo y mortero) con el consolidante. Esto partir de la utilización de distintos morteros conocidos utilizados en edificios patrimoniales y edificaciones contemporáneas.

BIBLIOGRAFIA

Ahmadi, S. (2008), Adobe conservation: Evaluation of silicone and acrylic consolidants, *Thesis submitted to the Art Conservation Program in the Department of Art in conformity with the requirements for the degree of Master of Art Conservation*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada.

Alejandre, F.J. y Villegas R. (2009). Estudio de la alterabilidad y efecto de tratamientos de conservación para los ladrillos de la portada de la iglesia de Santa María de Jesús (Sevilla). *Materiales de Construcción*, 293(59), 85-103.

ASTM E104-02 (Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity By Means of Aqueous Solutions).

ASTM C1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes).

Benavente D., García del Cura M. A., Fort R. y Ordóñez S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74 (1), 113-127.

Betancourt D., Martirena F., Day R. y Diaz Y. (2007). Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. *Revista de ingeniería de construcción*, 22(3), 187-196.

Brus J. y Kotlik P. (1996). Cracking of Organosilicone Stone Consolidants in Gel Form. *Studies in Conservation*, 41(1) 55-59.

Carta de Atenas (1931). IV Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM). Rescatado de http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_de_atenas_1931_spa_orof.pdf

Casanova, G. (2005), Impregnación de polímeros para la rehabilitación de estructuras patrimoniales de ladrillos, *Tesis para optar al título de ingeniero constructor y grado académico en ciencias de la construcción*, Universidad de Valparaíso.

Convención de Protección de Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado (1954). La Haya, mayo 1954. Rescatado de <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/UNESCO.convencion.1954.proteccion.patrimonio.caso.guerra.pdf>

- Constâncio C., Franco L., Russo A., Anjinho C., Pires J., Fátima M., Carvalho A. P., (2010). Studies on polymeric conservation treatments of ceramic tiles with Paraloid B-72 and two alkoxysilanes. *Journal of Applied Polymer Science* 116 (1), 2833-2839.
- Cultrone G., De la Torre M.J., Sebastián E., Cazalla O., Rodríguez-Navarro C., (2000). Behavior of brick samples in aggressive environments. *Water, Air and Soil Pollution* 119(1), 191-207.
- Cultrone G., De la Torre M. J., Sebastián E. y Cazalla O. (2003). Evaluación de la durabilidad de ladrillos mediante técnicas destructivas (TD) y no-destructivas (TND). *Materiales de Construcción*, 269(53), 41-59.
- Cultrone, G., Sebastián E., Elert K., De la Torre M.J, Cazalla O. y Rodríguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 547-564.
- Cultrone, G., Sebastián E., Ortega Huertas M. (2007). Durability of masonry systems: A laboratory study. *Construction and Building Materials* 21(1), 40-51.
- Cultrone G. y Sebastián E (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials* 23(1), 1178-1184.
- Cultrone G. y Madkour F. (2013). Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (4) 304-310.
- De Clercq, H. y De Zanche S. (2007). TEOS and time: The influence of application schedules on the effectiveness of ethyl silicate based consolidants. *Restoration of Buildings and Monuments*, 13(5), 305-315.
- Delgado Rodrigues J., y Grossi A. (2007). Indicators and ratings for the compability assesment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage* 8(1), 32-43.
- Doehne E. y Price C. A. (2010). Stone Conservation: An overview of current research. *The Getty Conservation Institute*, 2010.
- Durán Suarez A., (1995). Estudio de consolidantes y protectivos para restauración de material pétreo. Ph D Thesis. Granada: University of Granada, 1995 p. 1-369.
- Elert K., Cultrone G., Rodríguez-Navarro C. y Sebastián E. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historical buildings –influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage* 4(1), 91-99.

Esbert R. M. y Díaz-Pache F. (1993). Influencia de las características petrofísicas en la penetración de consolidantes en rocas monumentales porosas. *Materiales de Construcción*, 43(230) 25-36.

Esbert R. M., Ordaz J., Rodríguez A., Montoto M., Gonzalez T. y Álvarez de Buergo M. (1997). Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos, *Collegi d'Apparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, pp 77-105. Chap 7.

Ferreira A.P. y Delgado J. (2008). Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage*. 9(1) 38-53.

Ferreira A.P. y Delgado J. (2012). Consolidation of carbonate stones: Influence of treatments procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage* 13(2) 154-166.

Ferron, A. (2007). The Consolidation of Earthen Surface Finishes: A study of deisaggregating plasters at Mesa Verde National Park. Master of Science Thesis, University of Pennsylvania, 2007 p 1-157.

Fort, R. (2007). Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos, Libro *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*, pp. 71-83.

Görhan G y Şimşek O (2013). Porous clay bricks manufactured with rice husks. *Construction and Building Materials* 40, 390-396.

Greenspan L. (1977). "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions". *Journal of research of the National Bureau of Standards*. A Physics and Chemistry vol 81(1).

Grisafe, D. (2002). Potential Preservation of Native American Petroglyphs at Steamboat Butte, Montana, using ethyl silicate solution treatments. *Plains Anthropologist* 47 (180) 77-84.

Grissom, C.A., Charola A. E., Boulton A., y Mecklenburg M. F. (1999). Evaluation over time of an ethyl silicate consolidante applied to ancient lime plaster. *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*. 44 (2) 113-120.

Grossi C.M. y Esbert R.M., (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión Bibliográfica. *Materiales de Construcción* 235(44), 15-30.

Hameed F., Schillinger B., Rohatsch A., Zawisky M. y Rauch H. (2009). Investigations of stone consolidants by neutron imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 605 (1) 150-153.

ICOMOS (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. Rescatado de http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf

ICOMOS (2008). Carta para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural Comité Científico Internacional del ICOMOS. 16ª Asamblea General del ICOMOS, Québec (Canada). Rescatado de http://www.icomos.org/charters/interpretation_sp.pdf

Illescas J. (2012). Nuevos Nanomateriales para la Conservación del Patrimonio monumental Andaluz. *Tesis doctoral*. Departamento de Química física, Universidad de Cádiz.

Kronkright D. (2007). Book review: Alkoxysilanes and the consolidation of stone by George Wheeler. *Journal of the American Institute for Conservation*, 46 (2) 189-191.

López-Arce, P (2004). Ladrillos de edificios históricos de Toledo: Caracterización, origen de las materias primas y aplicaciones para su conservación y restauración. Memoria para optar al grado de doctor, Universidad Complutense de Madrid.

Luque A., Cultrone G., Sebastián E. y Cazalla O. (2008). Evaluación de la eficacia de tratamientos en el incremento de la durabilidad de una calcarenita bioclástica (Granada, España). *Materiales de Construcción* 292 (58) 115-128.

Maage M. (1984). Frost resistance and pore size distribution in bricks. *Materiaux et Constructions Bricks*, 17(5), 345-350.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Kallithrakas-Kontos N., Agioutantis Z., Maurigiannakis S. y Korakaki D. (2008). A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents. *Progress in Organic Coatings* 62 (1) 49-60.

Matziaris K., Stefanidou M. y Karagiannis G. (2011). Impregnation and superhydrophobicity of coated porous low-fired clay building materials. *Progress in Organic Coatings* 72(1), 181-192.

Mosquera M. J., Pozo J. y Esquivias L. (2003). Stress during drying of two stones consolidants applied in monumental conservation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 26(1-3), 1227-1231.

Moropoulou A., Haralampopoulos G., Tsiourva Th., Auger F. y Birginie J.M. (2003). Artificial weathering and non-destructive test for the performance evaluation of consolidant materials applied on porous stones. *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, 36(4), 210-217.

Municipalidad de Santiago (2012). *Catálogo de inmuebles de conservación histórica. Asesoría urbana 2005-2006*. Santiago de Chile, 2012.

Nayak P. y Singh B.K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bulletin Material Science* 30(3), 235-238.

Prudêncio M.I., Stanojev M.A., Marques J.G., Dias M.I., Esteves L., Burbidge C.I., Trindade M.J.y Albuquerque M.B. (2012). Neutron tomography for the assessment of consolidant impregnation efficiency in Portuguese glazed tiles (16th and 18th centuries). *Journal of Archaeological Science*, 39 (4) 964-969.

Real Academia Española (2014). *Diccionario de la lengua española* (22 ed). Madrid, España: Autor.

Saleh, A., Helmi F. M., Kamal M.M., El-Banna A. (1992). Study and Consolidation of sandstone: Temple of Karnak, Luxor, Egypt. *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*. 37(2) 93-104.

Sandrolini F., Franzoni E. y Pigino B. (2012). Ethyl silicate for surface treatment of concrete-Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate. *Cement and Concrete Composites* 34 (3) 306-312.

Santos T. P., Vaz. M.F., Pinto M. L.y Carvalho A.P. (2012). Porosity characterization of old Portuguese ceramic tiles. *Construction and Building Materials* 28 (1) 104-110.

Scherer G.W., (2004). Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 1613-1624.

Silva B., Rivas T. y Prieto B. (2000). Tratamientos de consolidación e hidrofugación aplicados a sustratos graníticos húmedos y contaminados con sales solubles. *Materiales de Construcción*, 257 (50) 15-31.

Straube, J. y Burnett E. (2005). "Building Science for Building enclosure". Building Science Press, 2005.

Toniolo L., Paradisi A., Goidanich S. y Pennati G. (2011). "Mechanical behaviour of lime based mortars after surface consolidation". *Journal Construction and Building Materials* 25 (4) 1553-1559.

Tulliani J.M., Formia A.y Sangermano M. (2011). Organic-inorganic material for the consolidation of plaster. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4) 364-371.

UNE-EN-1925. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

UNE-EN 1926:2007. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

UNE-EN 1936 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNESCO (2000). Carta de Cracovia. Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido. Rescatado de http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_cracovia_2000_spa_orof.pdf

UNI-EN-13755 Natural Stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure.

Zárraga R., Cervantes J., Álvarez D. E., Reyes V., Salazar-Hernández C. (2006). Investigación científica en la conservación de monumentos de cantera. *Acta Universitaria*, 16(2) 38-50.

Zárraga R., Cervantes J., Salazar-Hernández C y Wheeler G. (2010). Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 11 (2) 138-144.

Zendri E., Biscontin G., Nardini I. y Riato S. (2007). Characterization and reactivity of silicatic consolidants. *Construction and Building Materials*, 21(5) 1098-1106.

Zinsmeister K., Weiss N. y Gale F. (1988). Laboratory evaluation of consolidation treatment of Massillon (Ohio) Sandstone. *APT Bulletin*, 26 (3) 35-39.

ANEXOS

6. ANEXOS

6.1 Clasificación de los consolidantes

Los consolidantes se pueden clasificar en cuatro grupos. La Figura 6-1, muestra la clasificación de los consolidantes utilizados en restauración de monumentos y estructuras. A excepción de los tratamientos inorgánicos y los tratamientos biológicos, el resto de los tratamientos son de tipo orgánicos fabricados con polímeros sintéticos.

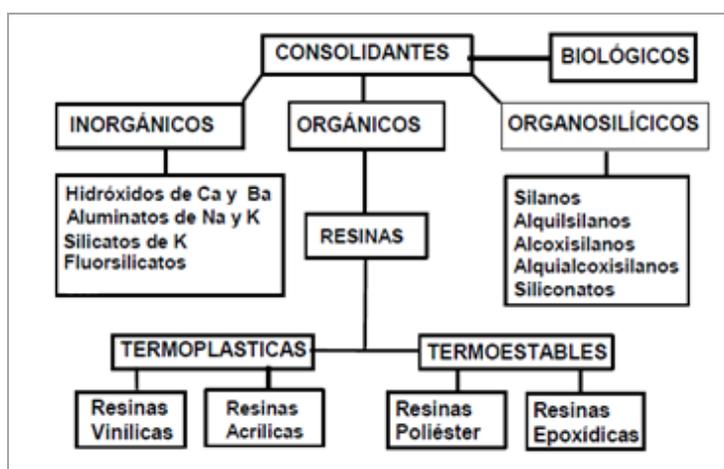


Figura 6-1. Tratamientos más utilizados en la consolidación (Fort, 2007)

a. Consolidantes inorgánicos

Los más conocidos son el hidróxido de calcio o bario y los silicatos de sodio o potasio que fueron muy utilizados en el siglo XIX y principios del XX. Son de naturaleza similar a los minerales de la piedra por lo que presentan buena afinidad química y física con el sustrato. Entre sus ventajas se encuentran que son durables y poseen buena resistencia frente a la radiación ultravioleta. Pero cuenta con desventajas como su fragilidad y baja penetrabilidad. Suelen ocasionar en la piedra cambios cromáticos superficiales y provocar

la aparición de sales, que hace en muchos casos desaconsejable su uso (Fort, 2007; Illescas, 2012). Investigadores indican que estos productos sólo pueden rellenar poros que tengan tamaños inferiores a 50 μm y que no son idóneos para unir fragmentos sueltos del material tratado (Esbert et al, 1997).

b. Consolidantes orgánicos

Son también conocidos como resinas y son de naturaleza diferente a la piedra. Al aplicarlos forman una capa adhesiva hidrofugante que logra cubrir la superficie y revestir las paredes de los conductos porosos (Esbert et al, 1997).

Los consolidantes orgánicos son elásticos y buenos adhesivos. Asimismo, pueden sellar espacios mayores que los consolidantes inorgánicos ya que forman capas continuas polimerizadas entre los granos constituyentes del material pétreo.

Sin embargo, debido a su alto peso molecular, viscosidad y al tamaño de sus moléculas, presentan dificultades de penetración en el material constituyente. Son altamente afectados por la acción de los rayos ultravioleta, incrementos de temperatura, la presencia de agua, el oxígeno, y por la acción de algas líquenes y bacterias (Fort, 2007; Zendri et al, 2007; Hameed et al, 2009). Se dividen en dos grupos principales: resinas termoplásticas y resinas termoestables.

Las resinas termoplásticas presentan en su mayoría cierta solubilidad en compuestos orgánicos, por lo que pueden ser utilizadas en solución en trabajos de consolidación. Además, al no sufrir polimerizaciones posteriores después de ser introducidas en el material pétreo, pueden ser redisueltas, y por lo tanto el tratamiento podría en teoría considerarse reversible. Sin embargo, otras investigaciones, han reportado que esto no es posible (Ferreira y Delgado, 2008). Entre las de mayor utilización se encuentran las resinas

vinílicas y las resinas acrílicas. De estas últimas un producto muy utilizado es el “Paraloid B72”, un copolímero constituido por metilmetacrilato 30% y etilmetacrilato 70%.

Investigaciones desarrolladas con la resina “Paraloid B72” presentan muy buenos resultados al consolidar piezas cerámicas delgadas (Santos et al, 2012; Constâncio et al 2010). Sin embargo, estudios realizados en rocas y ladrillos demostraron que, debido a su peso molecular, la utilización de la resina “Paraloid B72” no logra penetrar suficientemente en el sustrato, siendo una opción inconveniente para utilizar en este tipo de materiales (Cultrone et al, 2003; Hameed et al, 2009).

Por otro lado, las resinas termoestables son de cadenas que por calentamiento, reacción química o radiación, se convierten en un material duro y quebradizo; cuyas estructuras químicas son cambiadas. Por esta razón no pueden ser blandecidas ni remodeladas por el calor (Ahmadi, 2008). Estas resinas presentan un poder adhesivo más elevado que las termoplásticas. Por esta razón, son particularmente aplicables como "adhesivos estructurales" por su capacidad de resistir tensiones durante tiempos prolongados sin deformarse. Las más utilizadas son las resinas de poliéster y las resinas epoxídicas.

c. Consolidantes organosilícicos

Llevan silicio en su composición, el cual al igual que el carbono tiene la propiedad de unirse a sí mismo, formando una estructura reticular y posibilitando la formación de compuestos inorgánicos análogos a los orgánicos (Esbert et al, 1997).

Su nombre se debe a que son compuestos orgánicos que precipitan productos inorgánicos (SiO_2) por medio de reacciones químicas con los sustratos a los cuales son colocados. Se incluyen dentro de esta categoría los silanos, alquilsilanos, alcoxisilanos, alquialcoxisilanos y siliconatos.

Los silanos (SiH_4) son los compuestos más simples, en cuya composición intervienen el hidrógeno y el silicio tetravalente. Cuando los hidrógenos del silano se sustituyen por grupos alcoxi $-(\text{OC}_n\text{H}_m)$, el producto se denomina alcoxisilano. Estos últimos son también conocidos como ésteres de ácido silícico o silicatos de etilo (Esbert et al, 1997). El silicato de etilo más utilizado en la consolidación de materiales es el tetraetoxisilano que se abrevia como TEOS ($\text{Si}-(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) (Ferreira y Delgado, 2008; Sandrolini et al, 2012).

Cuando los hidrógenos están sustituidos por grupos alcoxilo y alquilo, se obtienen los metiltrimetoxisilanos ($\text{CH}_3\text{-Si}(\text{OCH}_3)_3$) o metiltrietoxisilano MTMOS ($\text{CH}_3\text{-Si}-(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$), que también son utilizados frecuentemente en la consolidación de materiales pétreos como hidrofugantes.

6.2 Silicato de etilo utilizado y polimerización del sílice amorfo



Figura 6-2. Consolidante Wacker OH 100 derecha, sílice amorfo precipitado izquierda.



Figura 6-3. Consolidación lograda en ladrillo pulverizado con consolidante Wacker OH 100

6.3 Distribución de tamaño de partícula para materias primas

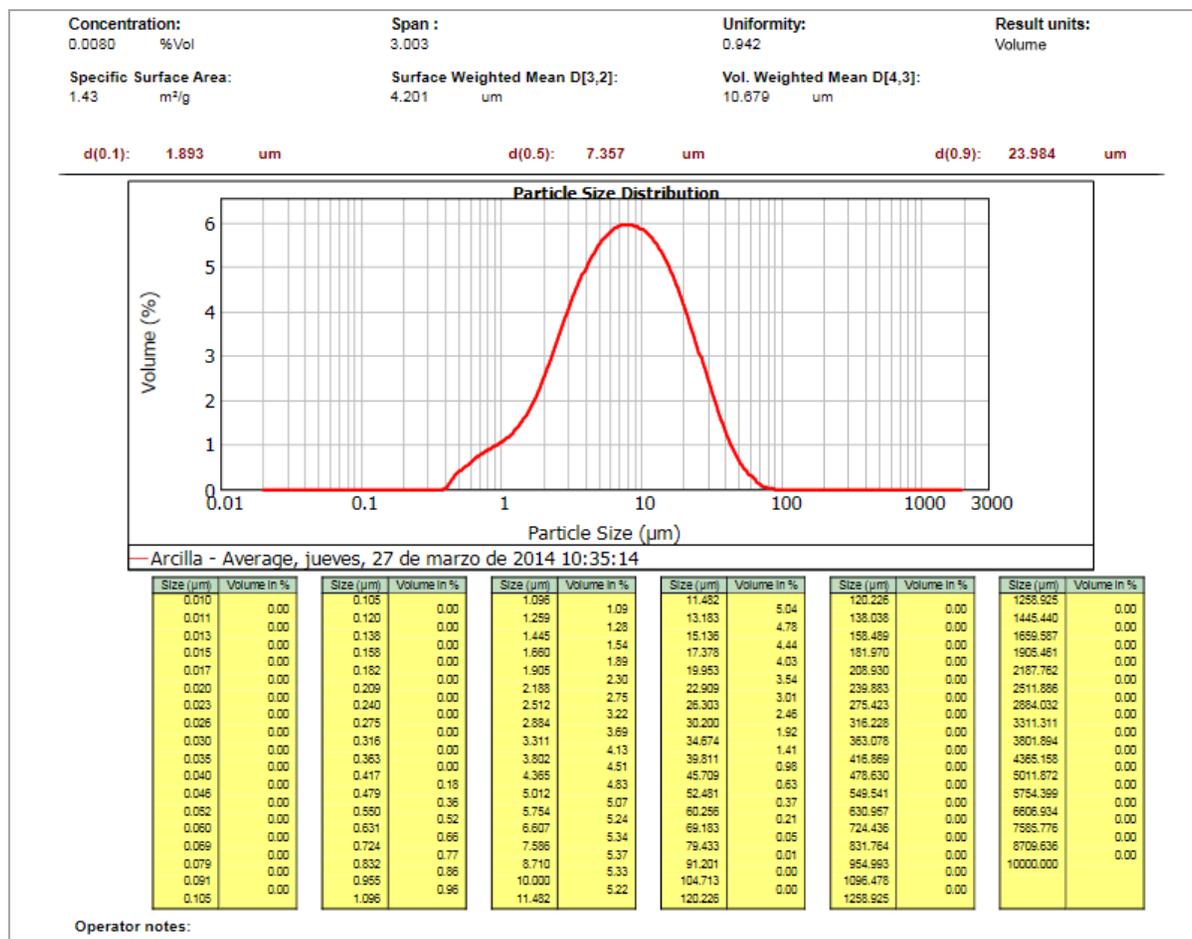


Figura 6-4. Distribución de tamaño de partícula para la arcilla común

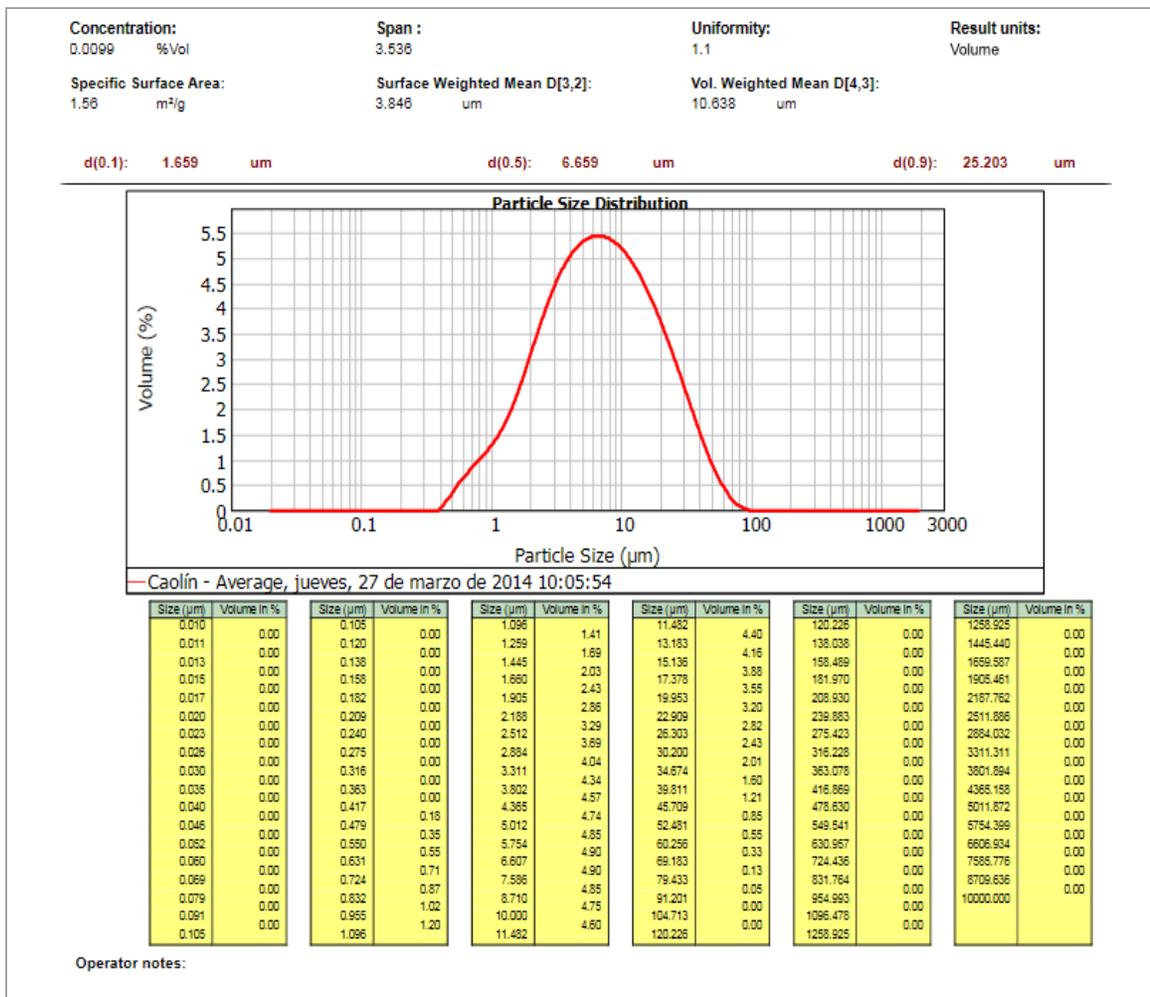


Figura 6-5. Distribución de tamaño de partícula para el caolín

6.4 Límites de Atterberg, moldeo y calcinación de especímenes

Para el cálculo de la cantidad de agua de moldeo, se determinaron los Límites de Atterberg y se graficaron las propiedades de moldeo.



Figura 6-6. Detalle de cuchara de Casagrande para determinación Límites de Atterberg

Tabla 6-1. Resultado de Límites de Atterberg para las especímenes.

Arcilla/ Espécimen de estudio	Límite Plástico (LP)	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)
Caolín	27,7	44,5	16,8
Arcilla	16,26	22,00	5,74
L0	16,26	22,00	5,74
L10	17,05	26,50	9,46
L20	19,57	31,46	11,88

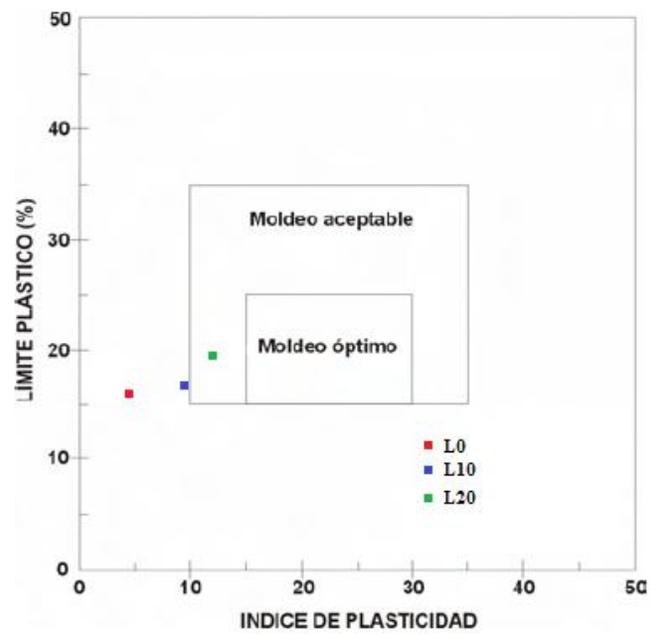


Figura 6-7. Propiedades de moldeo modificado de Bain y Highley (1966).



Figura 6-8. Detalle de moldes utilizados y especímenes moldeadas

6.5 Caracterización química y mineralógica de las arcillas y especímenes fabricados (XRF/XRD)

6.5.1 Caracterización química de arcillas y especímenes fabricados (XRF)

Tabla 6-2. Composición química de arcilla y caolín

Nombre	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO
Arcilla	21,39	56,99	0,12	0,076	0,82	8,65	4,90	2,82	3,68
Caolín	33,50	53,85	----	1,07	0,67	6,67	----	3,51	----

Tabla 6-3. Composición química de ladrillos fabricados

Nombre	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO
L0-900	21,26	57,37	0,12	0,12	0,90	8,39	4,92	2,79	3,74
L10-800	23,29	56,08	0,11	0,25	0,85	8,02	4,47	2,82	3,60
L10-900	23,22	55,70	0,11	0,24	0,79	8,64	4,36	2,84	3,36
L10-1000	22,51	55,81	0,11	0,15	1,04	8,96	4,52	3,00	3,26
L20-900	24,60	56,41	0,11	0,24	0,86	7,85	3,72	2,90	3,03

6.5.2. Caracterización mineralógica de las arcillas y especímenes fabricados (XRD)

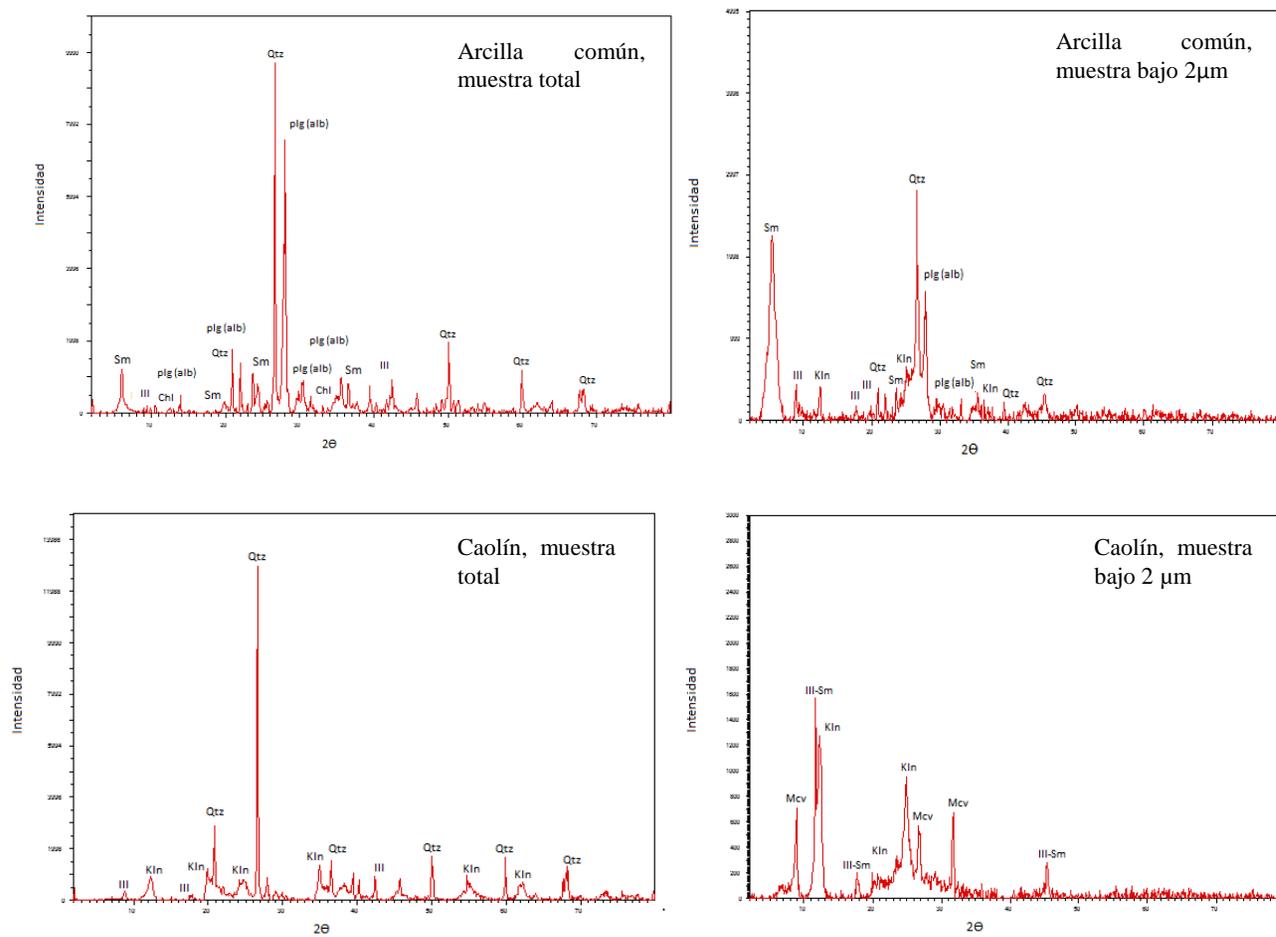


Figura 6-9. Difractogramas de arcilla común y caolín: fracción total y fracción bajo $2\mu\text{m}$

Nomenclatura: Chl: clorita, plg (alb): plagioclasa albita, Ill: Illita, Kln: caolinita, Sm: esmectita, Qtz: cuarzo, Ill-Sm: interestratificado illita-esmectita, Mcv: muscovita

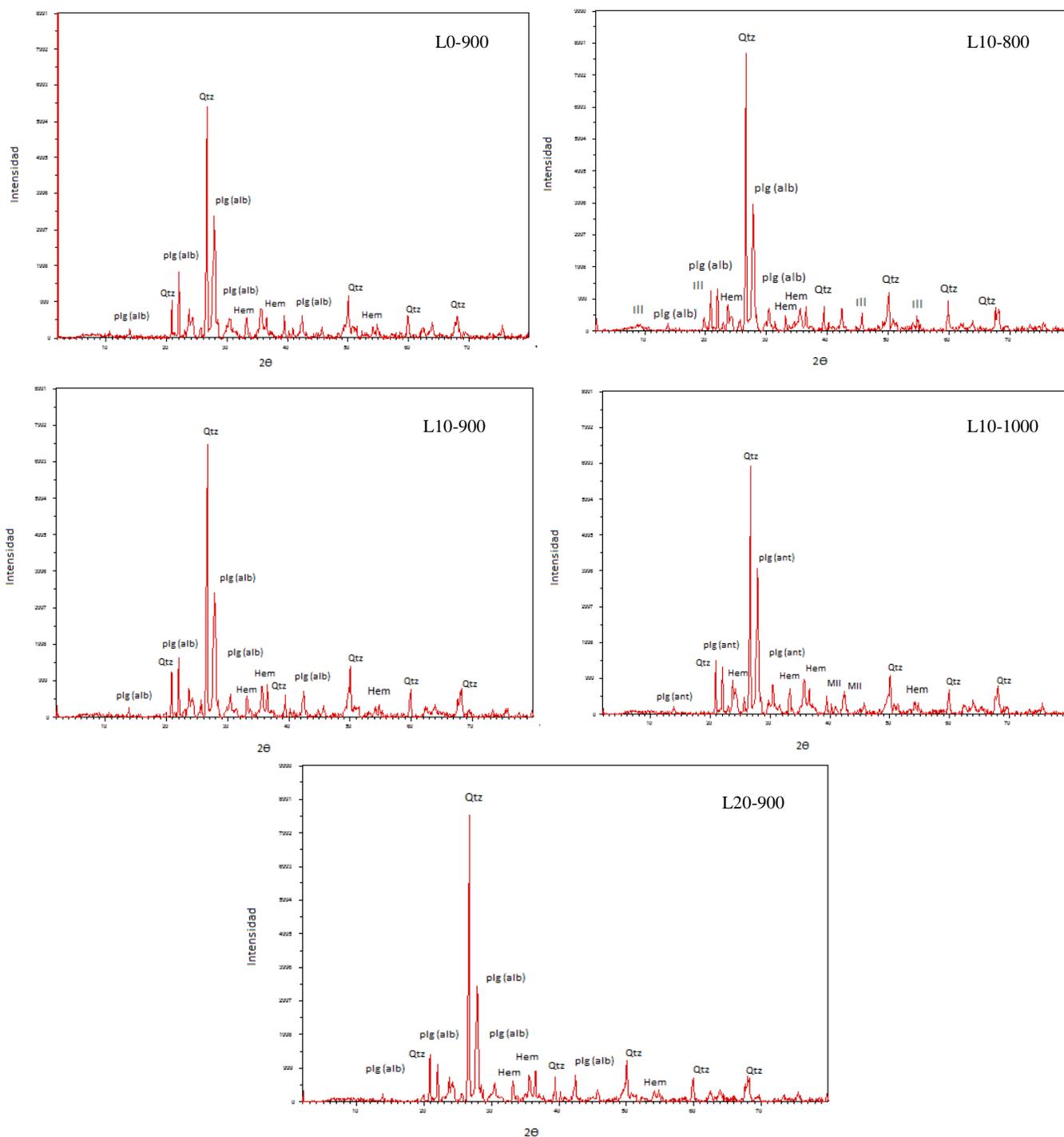


Figura 6-10. Difractogramas de los ladrillos fabricados.

Nomenclatura: Hem: hematita, plg (alb): plagioclasa albita, plg (ant): plagioclasa anortita, Ill: illita, Mll: mullita, Qtz: cuarzo

6.5.3. Caracterización mineralógica de ladrillos de edificaciones históricas

a) Resultados de caracterización de mineralogía de ladrillos de la Catedral de Santiago (año 1730-1800)

Caracterización de muestras de piso y muro de ladrillos de la Catedral de Santiago de Chile. Las muestras fueron suministradas por la arqueóloga Claudia Prado, quien informó que los materiales proporcionados pertenecen a las excavaciones realizadas en el contexto del proyecto FONDECYT N° 1110481 / 2011-2013: “Una ciudad, Dos catedrales.

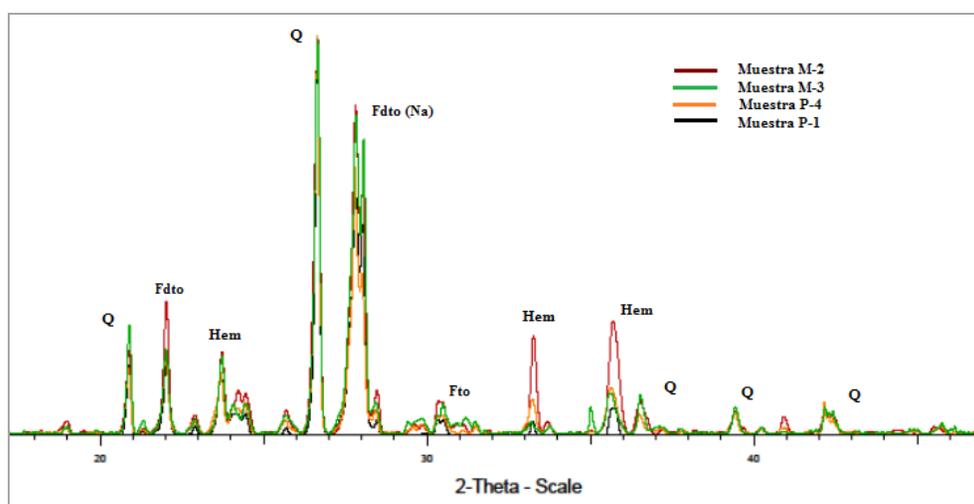


Figura 6-11. Minerales detectados por DRX en muestras de ladrillo de la Catedral de Santiago

Nomenclatura: Fdto: Feldespató; Fdto (na): Feldespató sódico; Hem: Hematita; Q: Cuarzo. Eje Y indica escala cuadrada (sqrt)

b) Resultados de caracterización de mineralogía de ladrillos del Club Fernández Concha (año 1865)

Se realizó una caracterización de ladrillos del Club Fernández Concha que se ubica en Santiago Centro y que cuenta con la categoría de Inmueble de Conservación Histórica, según datos de la Municipalidad de Santiago.

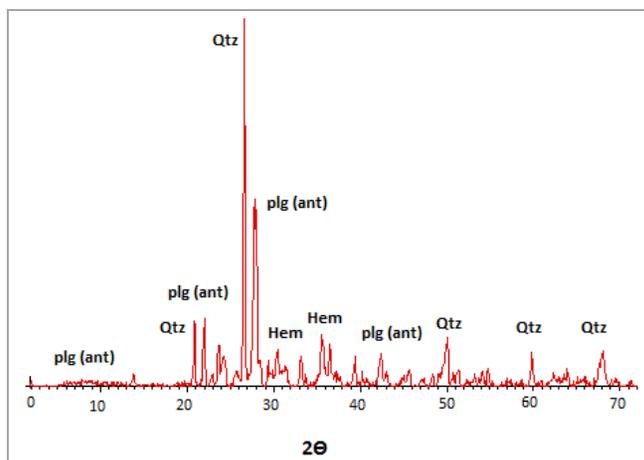


Figura 6-12. Minerales detectados por DRX en muestras de ladrillo del Club Fernández Concha

Nomenclatura: plg (ant): plagioclasa anortita, Hem: Hematita; Q: Cuarzo. Eje Y indica escala cuadrada (sqrt)

6.6. Métodos de aplicación, rendimiento y porcentaje remanente del consolidante

Tabla 6-4. Evaluación del método de aplicación de mayor eficiencia en serie L10-900

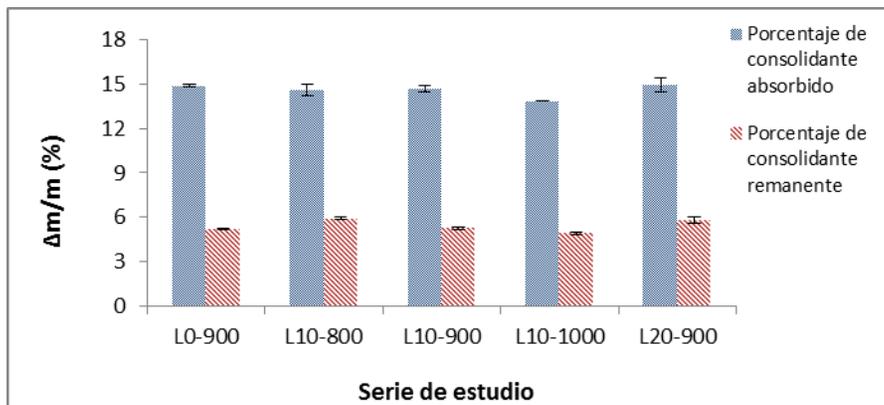
Método de colocación	Volumen remanente/volumen aplicado	Profundidad visual (cm)
Brocha	0,77	1,5
Pulverizador sin presión	0,29	2,5
Pulverizador con presión	0,32	3,5

Tabla 6-5. Desempeño de la impregnación del consolidante, brocha 1^{era} aplicación

Serie	Penetración observada (cm)	Rendimiento (l/m ²)
L0-900	3,70	8,19
L10-800	1,10	5,74
L10-900	3,50	8,19
L10-1000	3,90	10,78
L20-900	3,93	11,56

Tabla 6-6. Desempeño de la re-impregnación del consolidante, brocha 2^{da} aplicación

Serie	Penetración observada (cm)	Rendimiento (l/m ²)
L0-900	1,28	4,95
L10-800	1,27	3,97
L10-900	1,05	3,37
L10-1000	1,60	3,22
L20-900	1,18	6,45



A) Inmersión total 1 hora: todas las especímenes

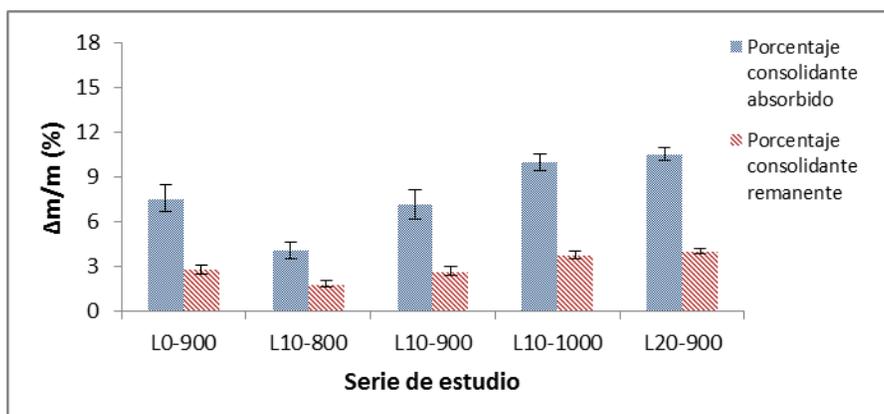
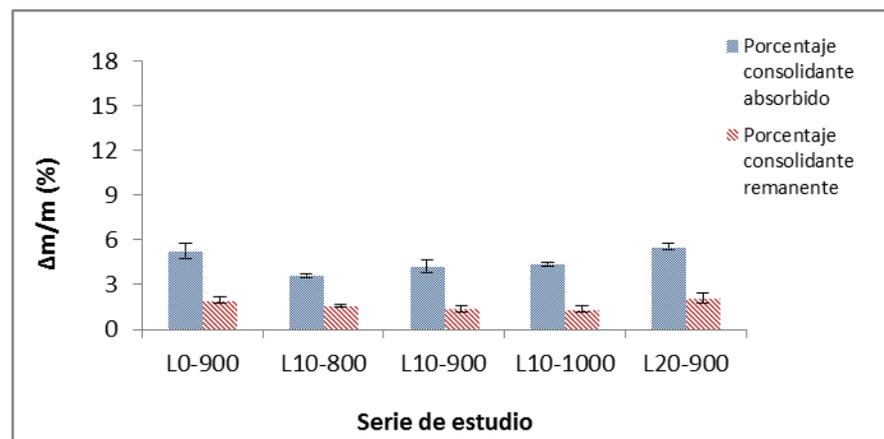
B) Brocha 1^{era} impregnación: todas las especímenesC) Brocha 2^{nda} impregnación: todas las especímenes

Figura 6-13. Porcentajes de consolidante absorbido y remanente en especímenes de estudio

Tabla 6-7. Porcentaje consolidante remanente para L10, a diferentes tiempos de inmersión total

Tiempo de inmersión (h)	Porcentaje de consolidante remanente (%)	Desviación estándar (%)
1	35,83	0,14
6	35,84	0,22
12	36,16	0,23
24	36,16	0,18
48	35,98	0,33

Tabla 6-8. Porcentaje de consolidante remanente: inmersión total a 1 hora y saturación con brocha.

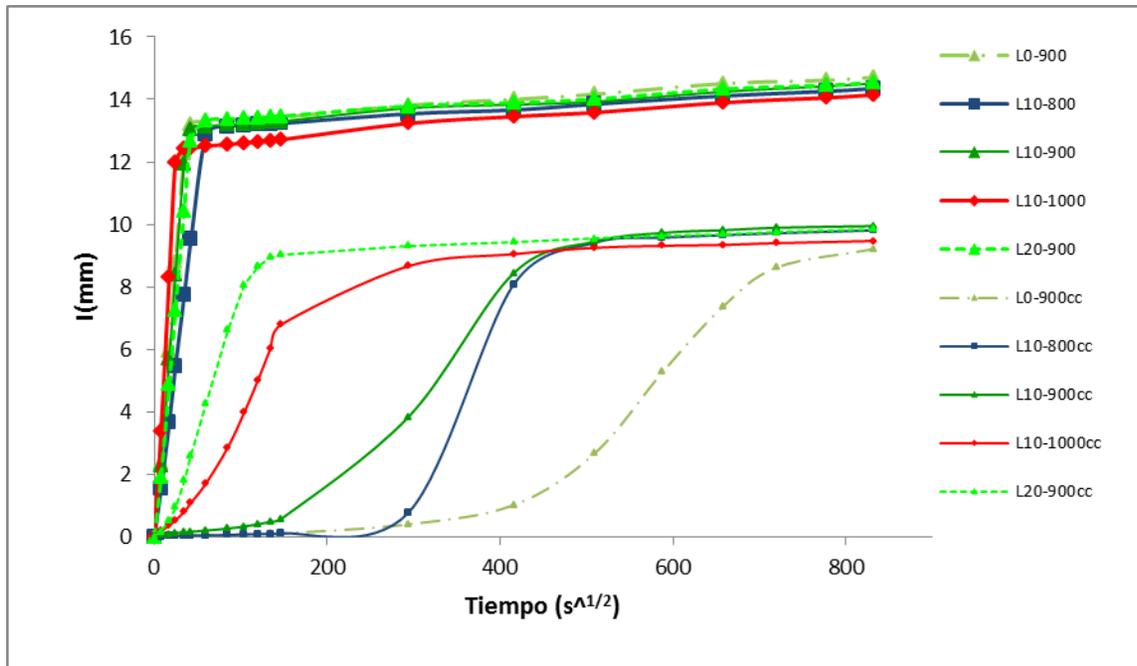
Serie de estudio	Inmersión total 1 h (%)	Desviación estándar (%)	Brocha 1 ^{era} aplicación (%)	Desviación estándar (%)	Brocha 2 ^{nda} aplicación	Desviación estándar (%)
L0-900	34,84	0,046	37,00	0,88	36,83	1,72
L10-800	40,43	0,73	44,67	1,74	44,40	0,75
L10-900	35,83	0,14	37,63	0,97	32,38	1,44
L10-1000	35,39	0,49	37,62	0,42	30,98	3,93
L20-900	38,65	0,42	38,40	0,53	37,86	7,17

6.7. Propiedades físicas obtenidas: inmersión total y brocha en todas las especímenes

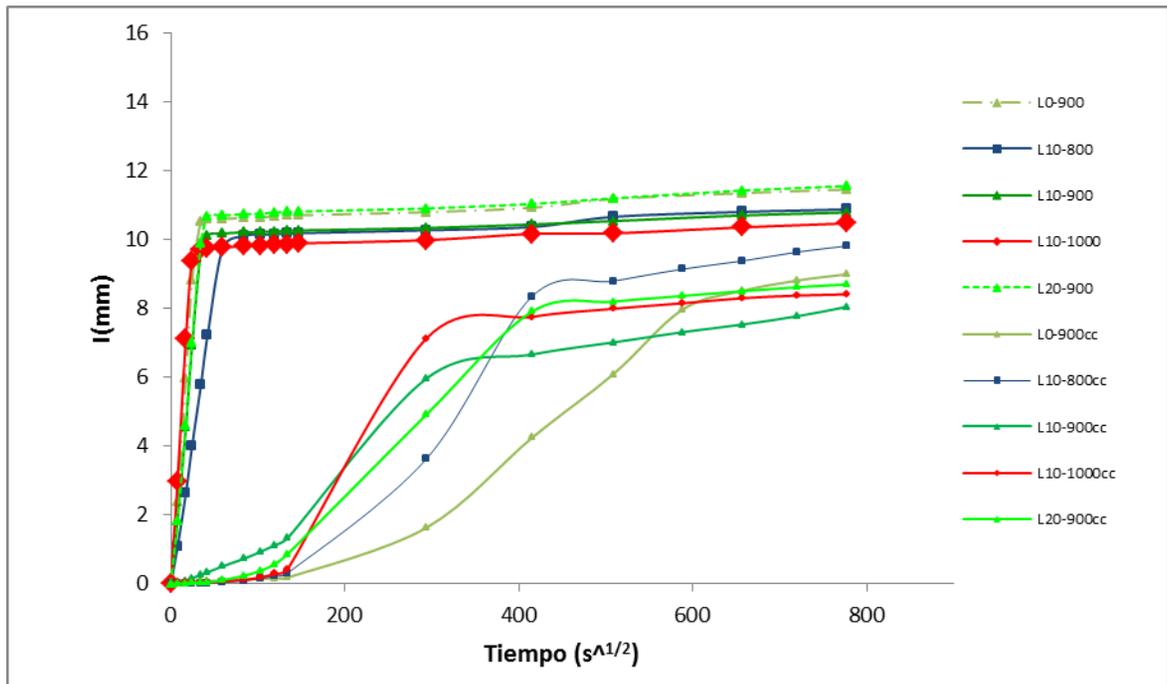
Tabla 6-9. Variación propiedades físicas pre y post consolidación, aplicación brocha

Tipo tratamiento	ρ_{aparente} (g/cm ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	P.a. (%)	Ip (%)	S (%)	Cc	Ladrillo
S.C.	1,80	2,64	31,82	4,18	95,82	0,320	L0-900
B. 1A	1,86	2,61	28,99	10,64	91,00	0,016	
B. 2A	1,89	2,55	26,17	26,53	73,47	0,014	
S.C.	1,82	2,62	30,30	1,85	98,77	0,170	L10-800
B. 1A	1,85	2,60	28,66	2,09	97,91	0,028	
B. 2A	1,88	2,60	27,50	2,10	97,90	0,028	
S.C.	1,80	2,60	30,95	2,84	97,16	0,280	L10-900
B. 1A	1,85	2,55	27,65	7,19	91,27	0,029	
B. 2A	1,89	2,55	25,71	4,77	95,23	0,037	
S.C.	1,84	2,63	29,94	2,64	97,36	0,390	L10-1000
B. 1A	1,90	2,58	26,12	4,58	95,42	0,042	
B. 2A	1,95	2,57	24,22	5,30	95,65	0,029	
S.C.	1,77	2,62	32,23	2,78	97,94	0,270	L20-900
B. 1A	1,87	2,58	27,58	3,62	96,38	0,025	
B. 2A	1,90	2,54	25,28	5,87	94,13	0,0029	

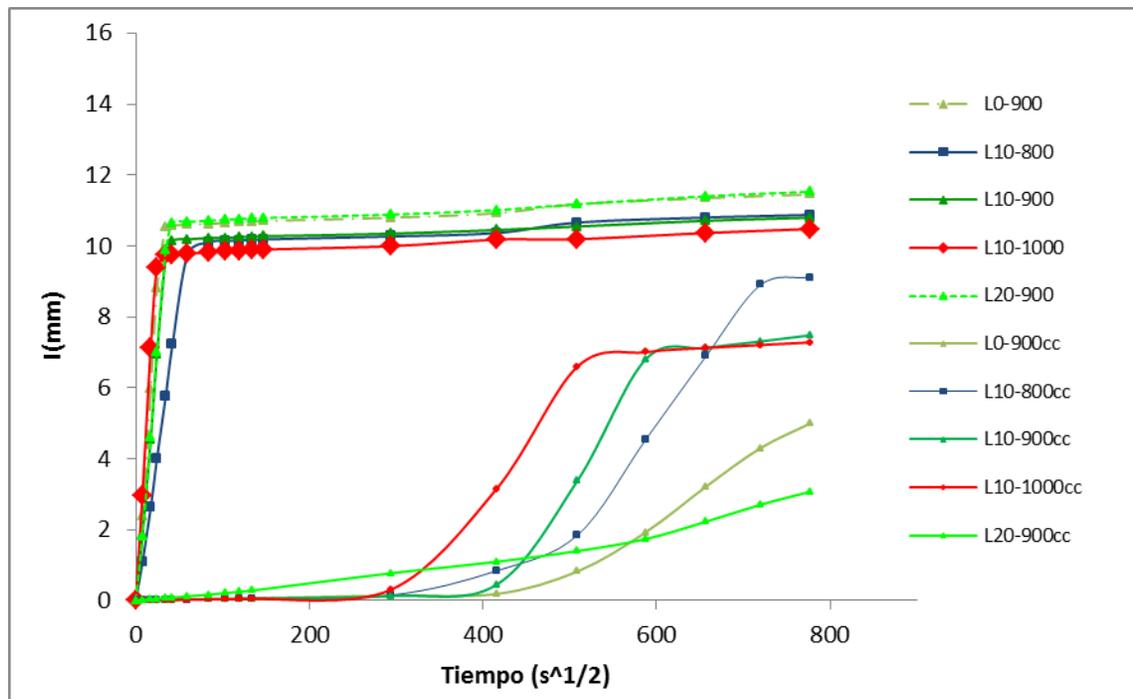
Nomenclatura: S.C. : sin consolidante, B_{1A}: brocha 1^{era} aplicación, B_{2A}: brocha 2^{nda} aplicación



A) Curvas Cc para I_{1H}

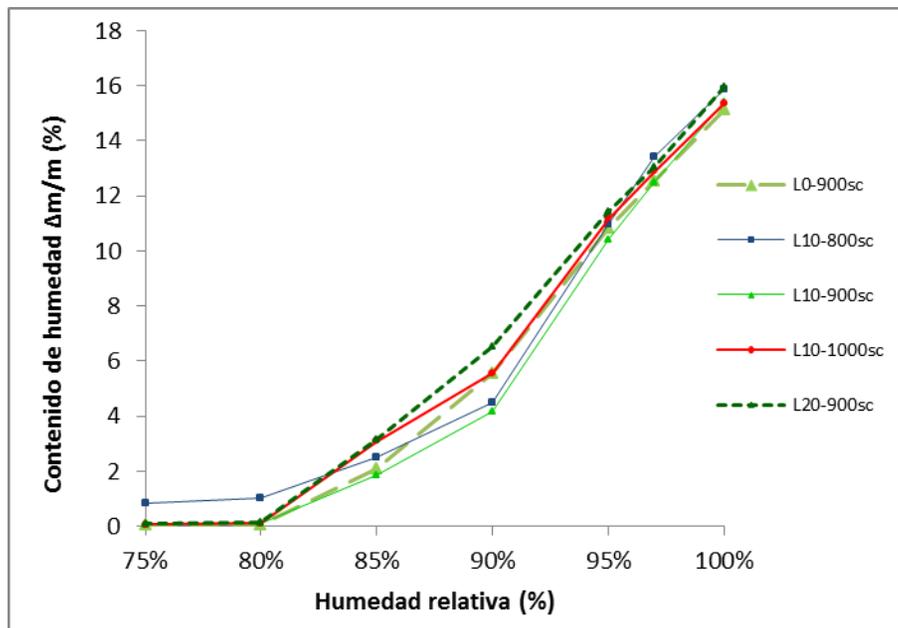


B) Curvas CC para B_{1A}

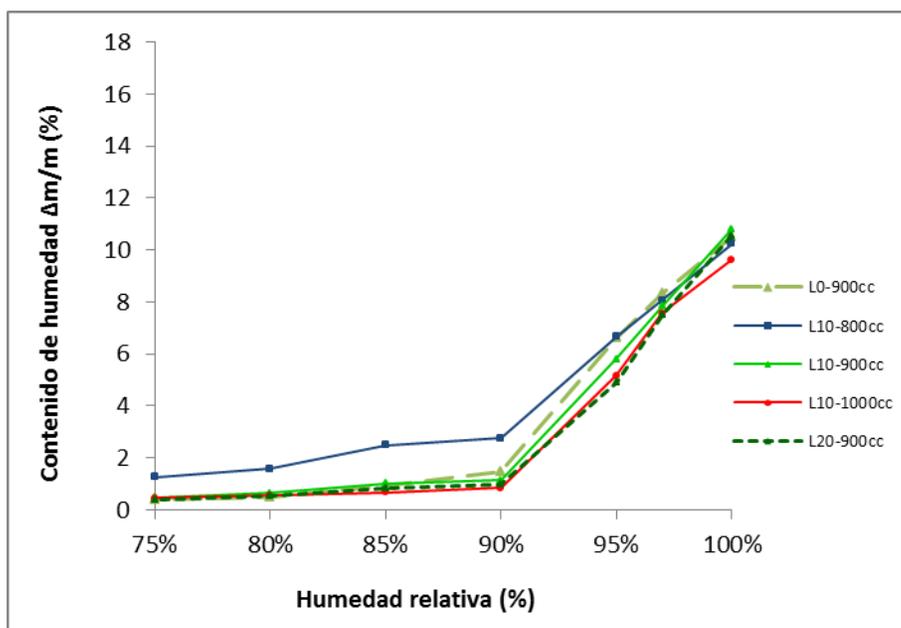


C) Curvas Cc para B_{2A}

Figura 6-14. Absorción capilar para especímenes



A) Sin consolidante



B) Con consolidante

Figura 6-15. Desorción de agua según el tipo de ladrillo para inmersión total

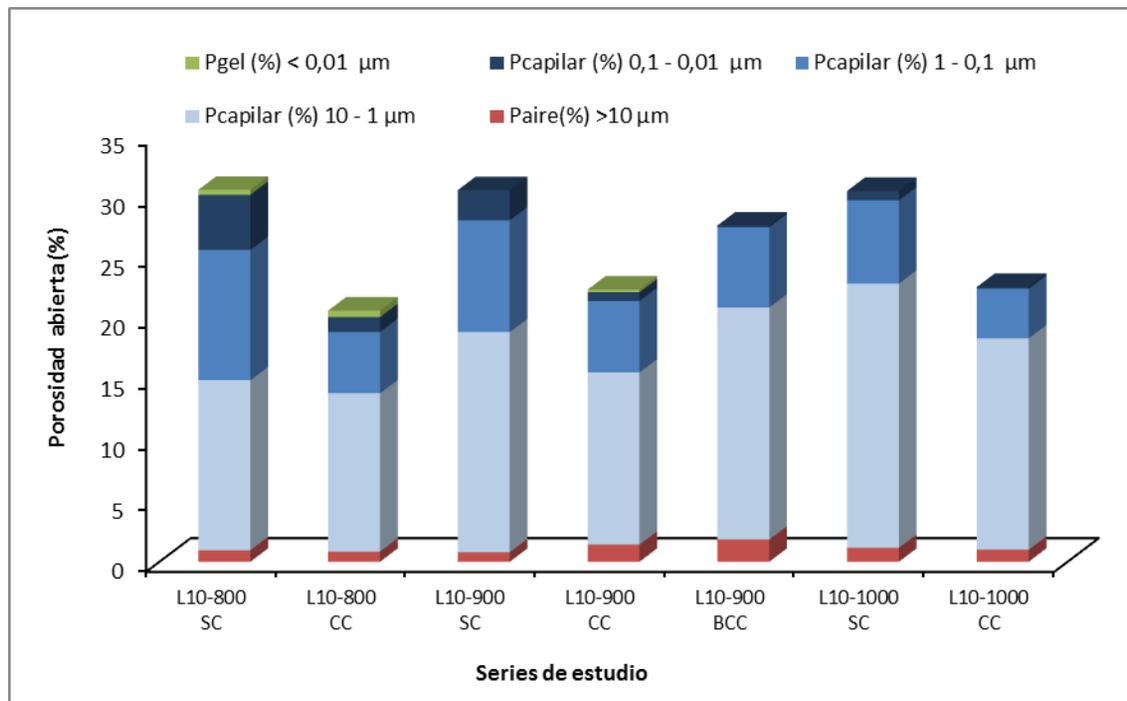


Figura 6-16. Disminución de porosidad en especímenes de estudio

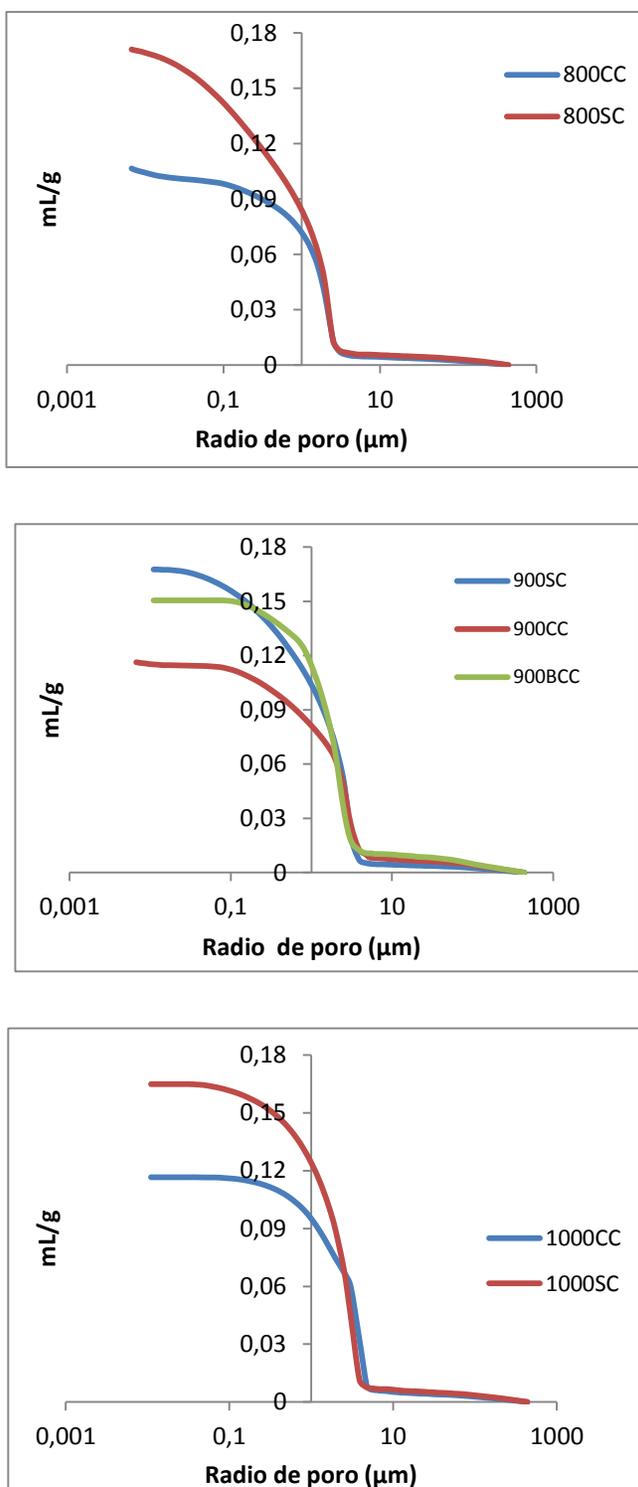


Figura 6-17. Curvas de radio de poro según volumen de mercurio acumulado

6.8. Propiedades mecánicas obtenidas: brocha todas las especímenes

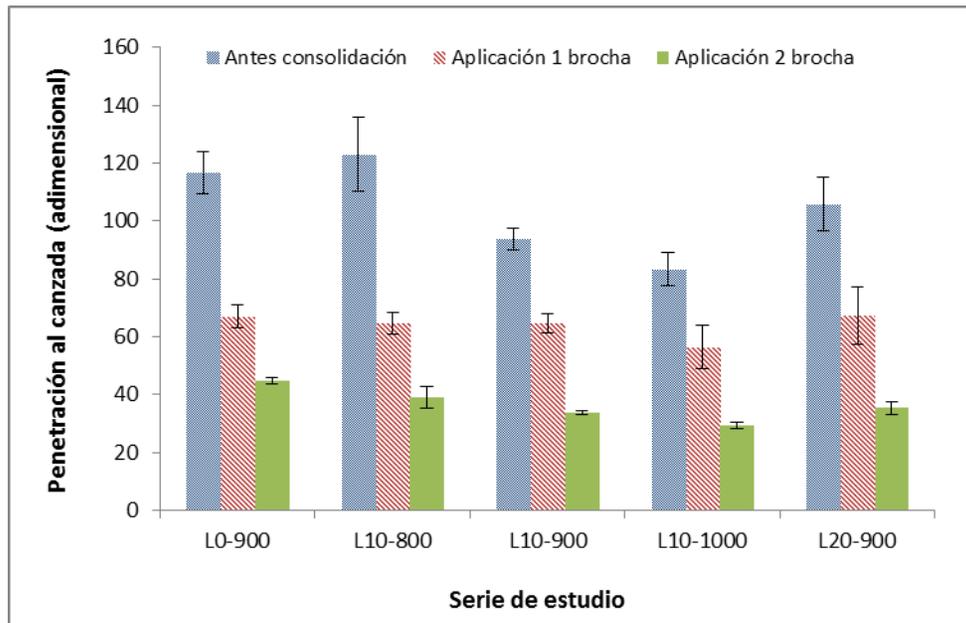


Figura 6-18. Penetración superficial por bola de acero (6mm).

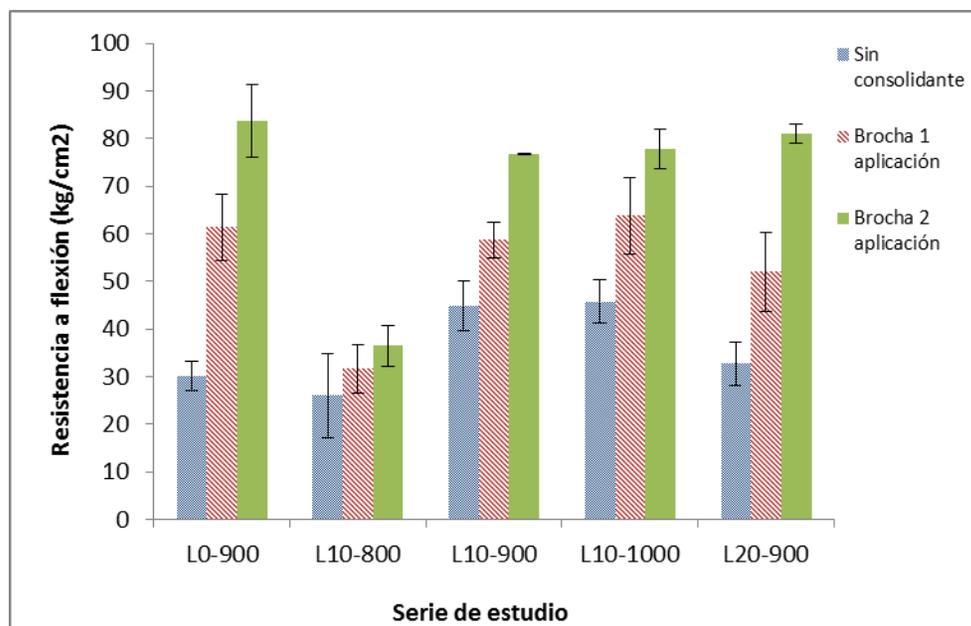


Figura 6-19. Resistencia a flexión, aplicación con brocha

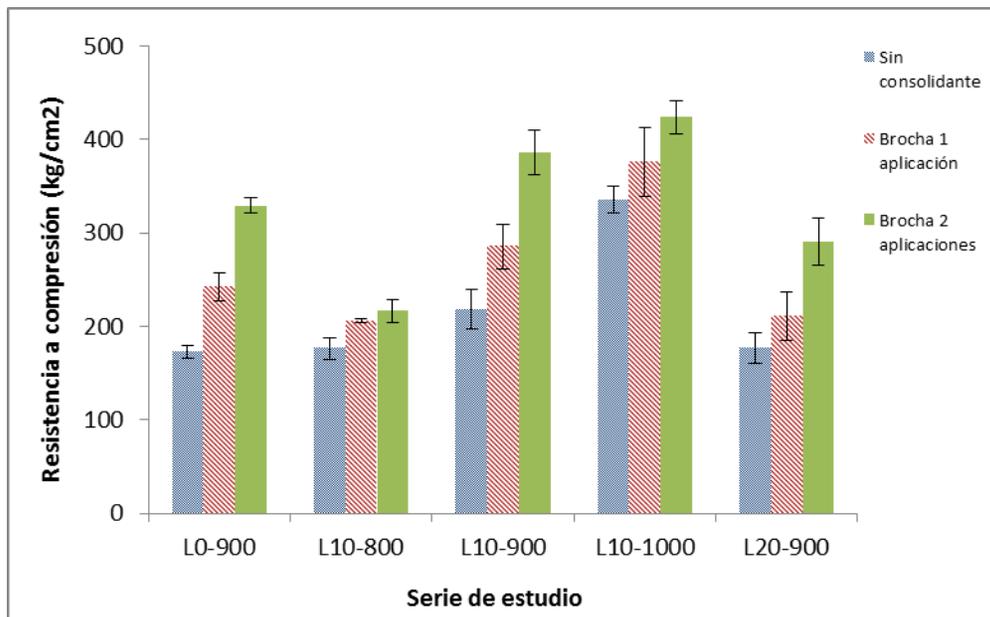


Figura 6-20. Resistencia a compresión de especímenes

6.9. Cálculo de coordenadas de color

Tabla 6-10. Resultados de colorimetría para inmersión 1 hora

Caso: Inmersión 1H	Parámetros de evaluación cromática						
	Antes consolidación			Después consolidación			
Especímenes de estudio	L ₁ *	a ₁ *	b ₁ *	L ₂ *	a ₂ *	b ₂ *	ΔE
L0-900	53,80	19,03	29,42	48,92	19,28	25,79	6,08
L10-800	54,14	14,56	22,74	50,43	13,59	20,54	4,42
L10-900	55,92	18,43	26,98	54,01	16,96	24,10	3,76
L10-1000	54,71	18,46	24,31	48,95	19,98	25,41	6,06
L20-900	56,72	17,94	26,99	53,77	18,06	25,78	3,19

Tabla 6-11. Resultados de colorimetría para brocha 1^{era} aplicación

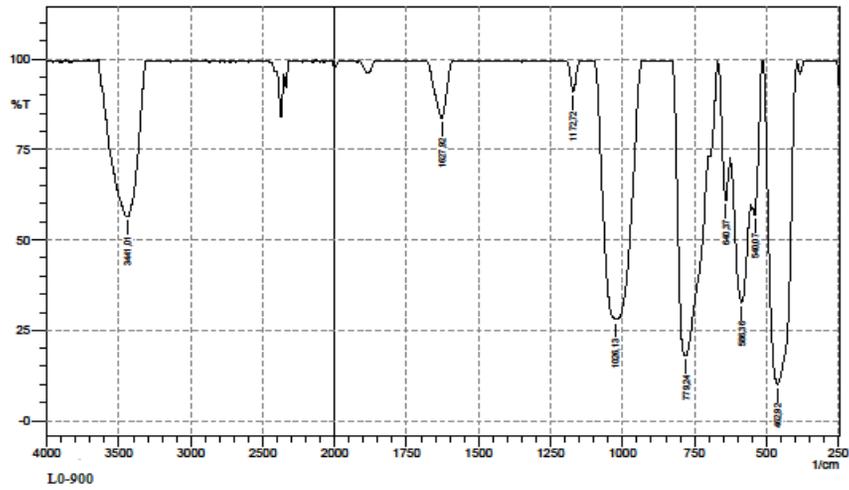
Caso: Brocha 1A	Parámetros de evaluación cromática						
	Antes consolidación			Después consolidación			
Serie de estudio	L ₁ *	a ₁ *	b ₁ *	L ₂ *	a ₂ *	b ₂ *	ΔE
L0-900	53,49	18,23	28,12	51,52	16,20	20,76	7,89
L10-800	53,72	14,52	22,58	54,42	13,60	21,57	1,54
L10-900	55,78	17,29	25,66	55,83	14,60	24,09	3,11
L10-1000	52,70	18,87	24,06	52,58	14,88	20,68	5,23
L20-900	56,95	18,05	26,42	56,23	16,51	24,37	2,66

Tabla 6-12. Resultados de colorimetría para brocha 2^{da} aplicación

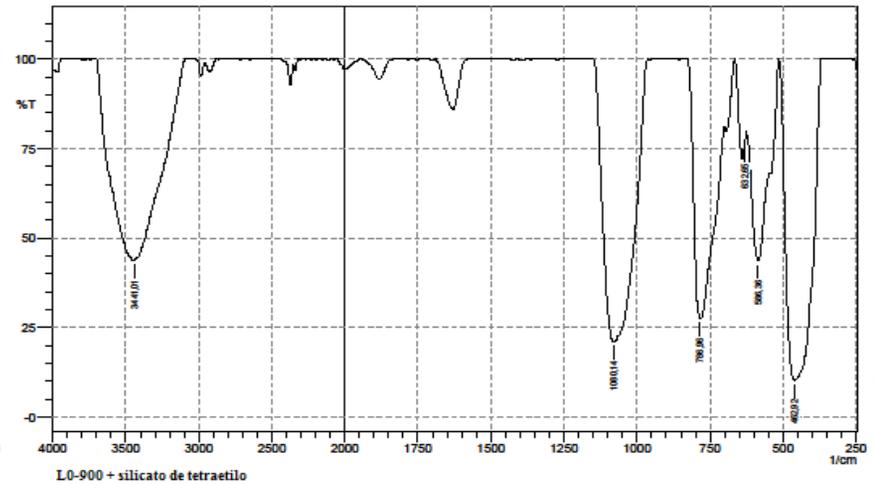
Caso: Brocha 2A	Parámetros de evaluación cromática						
	Antes consolidación			Después consolidación			
Serie de estudio	L ₁ *	a ₁ *	b ₁ *	L ₂ *	a ₂ *	b ₂ *	ΔE
L0-900	53,49	18,23	28,12	51,66	15,14	20,91	8,06
L10-800	53,72	14,52	22,58	52,04	12,37	19,19	4,35
L10-900	55,78	17,29	25,66	52,34	16,25	24,07	3,92
L10-1000	52,70	18,87	24,06	51,28	15,97	19,36	5,70
L20-900	56,95	18,05	26,42	55,88	16,64	24,04	2,96

6.10. Interacción sustrato-consolidante

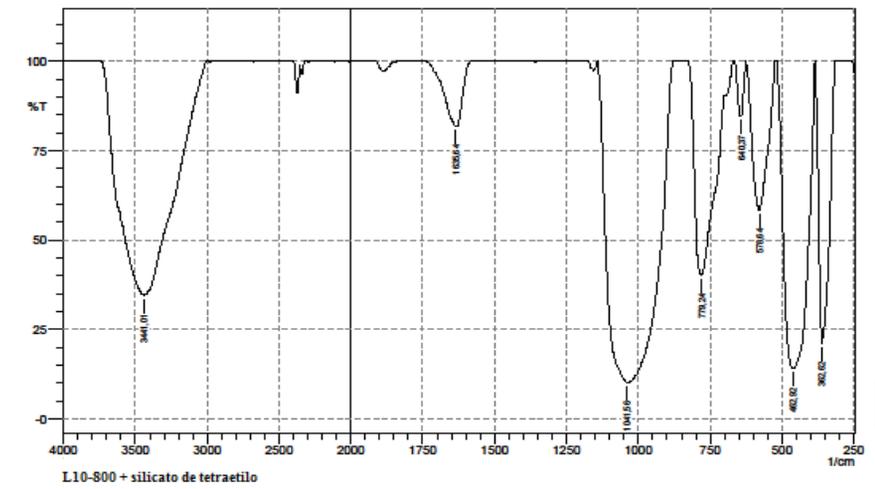
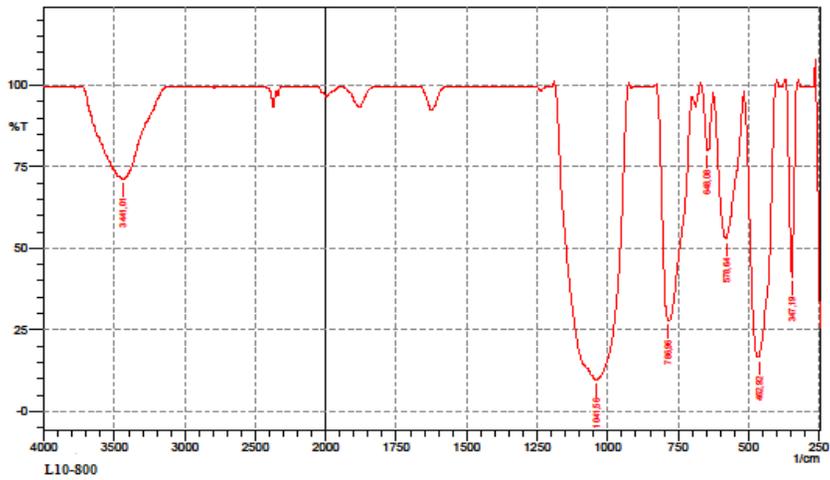
Sin consolidante



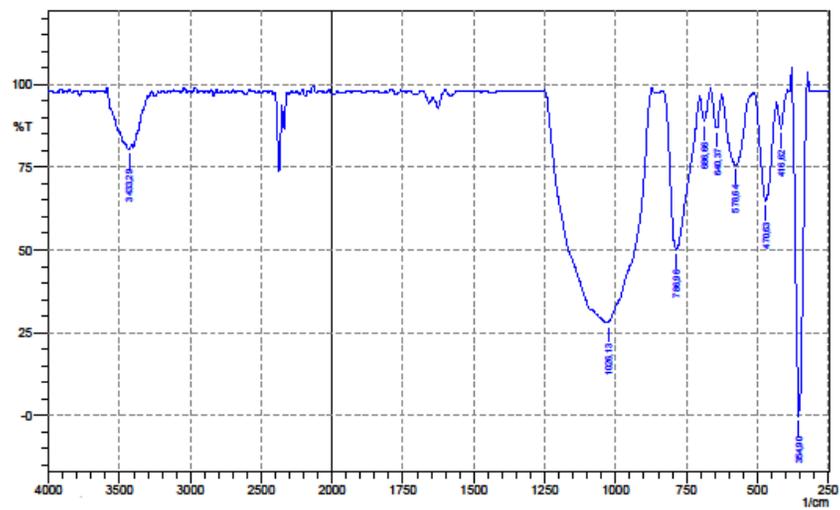
Con consolidante



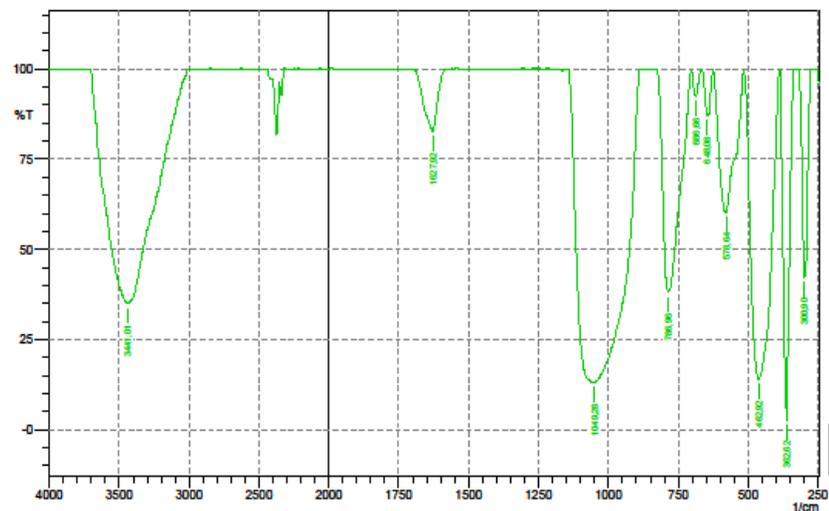
A



B

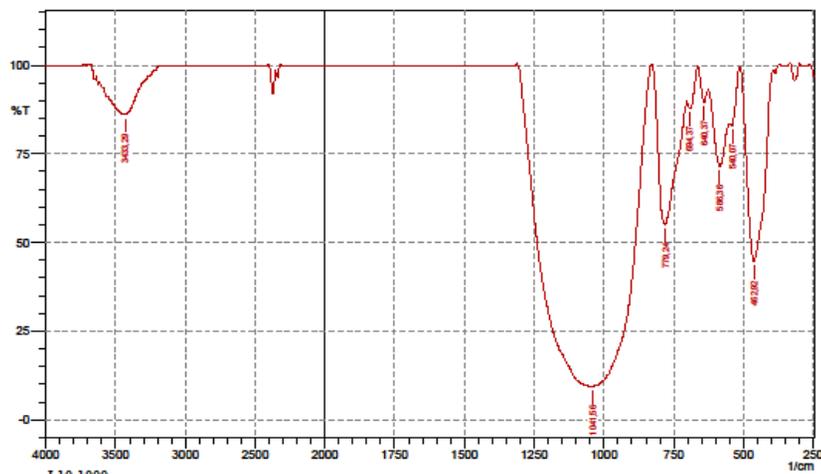


L10-900

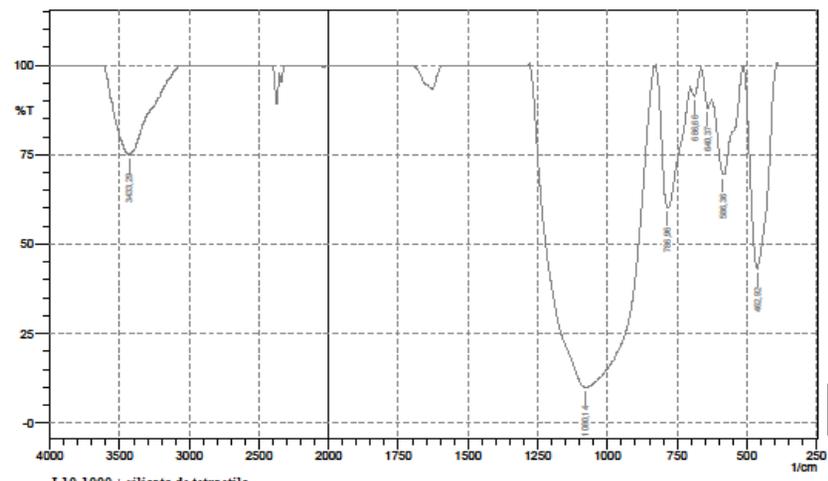


L10-900 + silicato de tetraetilo

C



L10-1000



L10-1000 + silicato de tetraetilo

D

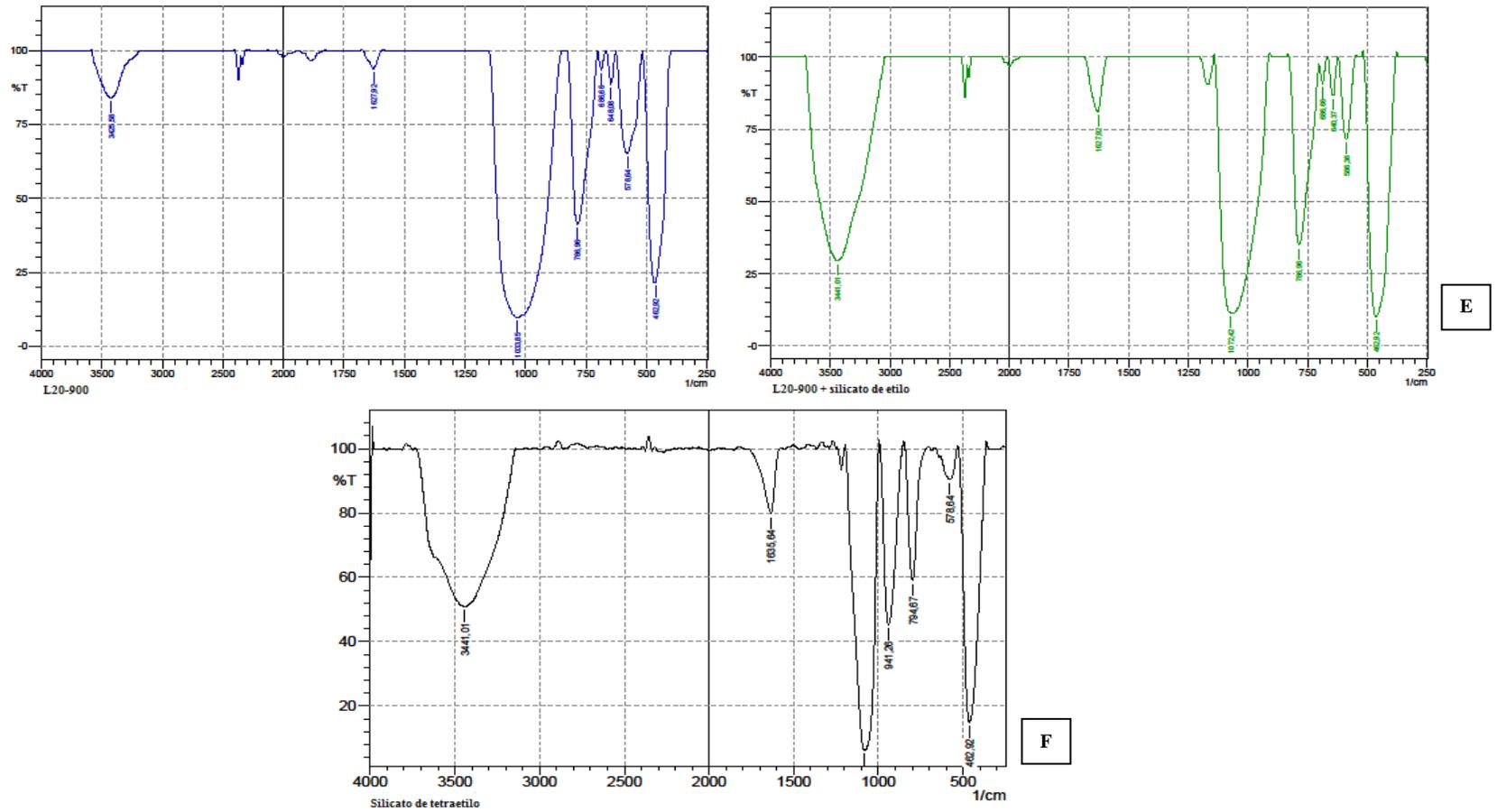


Figura 6-21. Espectros FTIR de sustratos pre y post consolidación.
 A: L0-900 B: L10-800 C: L10-900 D: L10-1000 E: L20-900 F: Silicato de etilo