

EVALUACIÓN DE LA PLASTINACIÓN COMO TÉCNICA PARA CONSOLIDAR MATERIAL ARQUEOLÓGICO

Evaluation of Plastination as a Technique to Consolidate Archaeological Material

Vera de la Cruz Baltazar¹

RESUMEN

La consolidación es un método básico en la conservación. Los profesionales de esta disciplina requieren de una gama de materiales y técnicas a partir de las cuales puedan seleccionar el tratamiento más adecuado para cada caso.

Entre los consolidantes que han recibido atención durante varias décadas se encuentran los silicones. Este trabajo recupera del archivo una investigación que, desarrollada en el marco de una tesis de maestría, evalúa el uso de la plastinación, que usa silicones para la consolidación de diversos materiales arqueológicos: madera y piel saturadas con agua y hueso, y concluye que la plastinación podría ser considerada como el método de consolidación a seleccionar en algunos casos.

Palabras clave: consolidación, plastinación, madera, piel, hueso.

ABSTRACT

Consolidation is a basic method of conservation. Experts in this field require a range of materials and techniques from which to select the most suitable treatment in each case.

One of the consolidants that has been studied over recent decades is silicones. This work has recuperated an archived investigation that, developed as part of a master's thesis, evaluates the use of plastination. This technique uses silicones to consolidate several archaeological materials –wood and skin saturated with water and bone– and concludes that plastination could be considered to be the chosen method of consolidation in specific cases.

Key words: consolidation, plastination, wood, skin, bone.

¹ Investigadora independiente, México. vera@delacruz.mx

INTRODUCCIÓN

Este trabajo responde al interés observado en la literatura por continuar explorando los usos de silicones (Cabrera 2010, Christensen et al. 2009, Kavvouras 2009, Smith 2003), en particular de la plastinación para la conservación de bienes culturales (Frostick 2012, Bouzas et al. 2008). Se enfoca en la investigación de maestría de la autora: *Plastination as a consolidation technique for archaeological bone, waterlogged leather and waterlogged wood* (De La Cruz 1996), que al parecer fue el primer estudio detallado del uso de la plastinación como tratamiento de consolidación de materiales arqueológicos (Orly 1999).

La plastinación es una técnica que fue desarrollada en 1977 por Gunther von Hagens para preservar especímenes anatómicos y que consiste en la sustitución del agua presente en los tejidos por un polímero que, entre otros, puede ser silicón (Von Hagens 1979). Con los años, un número creciente de instituciones fueron adoptándola y se sumaron observaciones empíricas respecto de la estabilidad dimensional y buen estado de conservación, en general, del material biológico tratado por medio de la plastinación.

En 1994, a iniciativa de Wayne Lyons, el Dr. Jim Hanlan y la autora establecieron una colaboración entre el Departamento de Anatomía y Biología Celular y el Programa de conservación de obras de arte de la Queen's University, en Kingston, Canadá, con la finalidad de explorar la viabilidad de usar la plastinación para consolidar hueso arqueológico, así como piel y madera saturadas con agua. El resultado de dicha colaboración fue la investigación de maestría que acá se retoma, con el fin de darle difusión por considerarla un tema que, aún después de los 20 años que han transcurrido, continúa vigente.

La presente contribución está organizada de la siguiente manera: se inicia con una revisión sobre la consolidación, en particular la consolidación con silicones, para después concentrarse en el trabajo

de investigación, presentando sus objetivos, metodología y resultados. Finaliza con una discusión y conclusiones acerca de la consolidación, en particular con polímeros a base de silicón.

ANTECEDENTES: EL USO DE LOS SILICONES COMO CONSOLIDANTES

Con el paso del tiempo muchos materiales se tornan débiles y frágiles, haciendo pertinente su intervención. La consolidación es un tratamiento de impregnación que tiene como objetivo restablecer, en la medida de lo posible, las características mecánicas del bien y prolongar su permanencia en el tiempo. Para tal efecto se ha usado una variedad de procedimientos que incluyen adhesivos y consolidantes, naturales y sintéticos. Al elegir un consolidante, además de considerar las características del objeto y del ambiente en que estará alojado, es necesario tomar en cuenta una serie de criterios entre ellos están: ser estable, adherirse al material tratado, penetrar en su estructura, tener cohesión fuerte, no afectar su funcionalidad, polimerizar con la menor reducción de volumen posible, no inducir cambios en la apariencia, no afectar investigaciones científicas futuras y ser reversible (Appelbaum 1987, Jedrzejewska 1982), o al menos, permitir que los objetos puedan ser nuevamente tratados (Christensen et al. 2009).

Debido a que el consolidante ideal no existe, es importante continuar con la búsqueda de sustancias y métodos para incorporar nuevos recursos a disposición de quienes se ocupan de la preservación del patrimonio y necesitan elegir un tratamiento que ayude a restablecer, o preservar, la unidad del objeto y en algunos casos sus propiedades mecánicas y su funcionalidad.

Entre la gran lista de los productos sintéticos empleados para consolidar hueso arqueológico se encuentran los polivinil acetatos (Fedak 2006) y las resinas acrílicas, en especial el Paraloid™ B-72 (Johnson 1994, Aberasturi et al. 2009). En el caso de materiales saturados con agua, como piel y madera, el tratamiento de elección ha sido la consolidación con polietilén glicol (PEG), a pesar de que sus desventajas, como la dificultad de penetración, la sensibilidad a la humedad y el deterioro, han sido documentadas (Christensen et al. 2009).

Los silicones son un grupo de polímeros que desde hace más de un siglo han sido propuestos y estudiados como consolidantes. Uno de los compuestos de este grupo fue evaluado como consolidante en esta investigación.

Polímeros a base de silicón

La química del silicón surgió en 1824, cuando Berzelius sintetizó el tetracloruro de silicón. Sin embargo, no fue sino hasta 1930 cuando el desarrollo de esta rama de la química realmente comenzó (Wheeler 1987). El término silicones fue originalmente empleado para denominar a polímeros sintéticos formados por unidades de silicón-oxígeno, con grupos orgánicos unidos por enlaces silicón-carbono, bajo el supuesto de que eran compuestos similares a las cetonas. Con el tiempo el uso del término ha cambiado y ahora se les llama así a los alcoxisilanos, también conocidos como siloxanos, que son ésteres de silicón altamente entrecruzados (Hardman y Torkelson 1989).

Estos polímeros se pueden sintetizar de dos formas. Hay productos de un solo componente cuya polimerización se lleva a cabo por reacciones de condensación que ocurren en presencia de humedad atmosférica. Se trata de silanos tri o tetrafuncionales (en condiciones ácidas) o de alcoxisilanos (cuando se debe evitar el pH bajo). Conforme la condensación

progresas, la velocidad de la polimerización—o curado—disminuye y para el curado final suele emplearse un catalizador, radiación o calor. Los catalizadores pueden ser ácidos, bases, sales solubles de plomo, cobalto, estaño, hierro u otros metales y compuestos orgánicos de estaño. Hay también silicones de dos componentes, que requieren de un catalizador para que la polimerización ocurra. Esta variante involucra la reacción de polímeros de silicón con terminaciones silanol, con silicones con grupos funcionales alcoxi más sales de estaño (Hardman y Torkelson 1989).

Por su viscosidad, los silicones se clasifican en aceites, resinas y elastómeros. En general son muy resistentes a la temperatura, la oxidación, el ozono, las radiaciones ultravioletas y gama y son química y biológicamente inertes. No son 100% hidrofóbicos pero sí tienen un poder altamente repelente contra el agua (Plueddemann 1982).

Silicones como consolidantes

El uso de silicones como consolidantes fue sugerido por primera vez en 1861, cuando A.W. Hoffman recomendó usar un compuesto relacionado al tetraetoxisilano para la conservación de piedra (Cabrera 2010). Sin embargo, no fue hasta alrededor de 1930, con su comercialización para la industria, que recibieron más atención (Wheeler 1987). Los silicones han sido usados como consolidantes en diversos materiales. Su primer uso fue en la madera y se basó en la observación de que este material, con más de 0,5% de sílica (dióxido de silicón), es prácticamente inmune al ataque por barrenadores marinos. Irwin y Wessen (1976) estudiaron el uso de tetraetoxisilano (TEOS) como consolidante para madera saturada con agua, previamente deshidratada con acetona. No obstante, estudios posteriores mostraron que el material tratado con este método se tornaba frágil, con una superficie porosa y decolorada (Grattan 1982, Jespersen 1982).

Se han realizado algunos estudios de otros silicones, entre ellos los dedicados al metiltrietoxisilano (MTS) como posible consolidante para cerámica, piedra y madera seca y saturada con agua (Thorp 1980, Norton 1981); al metiltrimetoxisilano (MTMS) para tratar hueso arqueológico (Daniel 2007), y diversos aceites de silicón derivados principalmente del dimetilsiloxano para el tratamiento de distintos materiales arqueológicos, entre ellos madera, hueso, piel y algunos textiles (Hamilton 1999, Smith 2003). En todos los casos se ha establecido que son consolidantes prometedores. Así mismo, Yashvili (1975) reportó buenos resultados cualitativos al consolidar madera con los siguientes silicones: oligómeros de dimetilsiloxano, polimetilfenilsiloxano, polimetilsiloxano, polifenilsiloxano, poliaminohidrosilano y policiclosiloxano.

En resumen, para 1994 era evidente que los silicones tenían características físicas y químicas que indicaban que podrían ser buenos consolidantes, pero no habían sido objeto de un estudio más estructurado. Fue con estos antecedentes que se decidió realizar la investigación que a continuación se revisa.

PLASTINACIÓN DE MATERIALES ARQUEOLÓGICOS: REVISIÓN DE UNA INVESTIGACIÓN

El estudio tuvo como finalidad evaluar la aplicación de la plastinación para la consolidación de hueso arqueológico, así como piel y madera saturada con agua. En lo específico se planteó: 1. Evaluar los cambios que la plastinación produce en las muestras en términos de peso, dimensiones, color, dureza (hueso y madera), resistencia a la incisión (madera) y flexibilidad (piel); 2. Experimentar con algunas variaciones de la técnica de plastinación estándar con la finalidad de mejorar la apariencia física de las muestras; 3. Comparar el tratamiento de plastinación con secado al aire libre y secado por congelación en vacío; y 4. Explorar la composición química y estabilidad de las sustancias usadas en la técnica de plastinación.

Metodología: material y método

Se estudiaron varias piezas de tibias humanas recuperadas de un enterramiento de aproximadamente 200 años de antigüedad. Los huesos fueron limpiados manualmente y cortados en piezas de 2,5 cm de largo. Las muestras de piel, probablemente curtidas con materiales vegetales, eran fragmentos irregulares, negros, sucios y en buen estado de preservación, que alguna vez formaron parte de objetos militares del siglo XIX y que se encontraban saturados con agua. En cuanto a la madera se utilizaron fragmentos de maple (*Acer* sp.) con un diámetro de 3 a 5 cm, que provenían de un sitio con alto contenido orgánico donde estuvieron enterrados por lo menos cinco años. También fueron cortadas en fragmentos de aproximadamente 2,5 cm de largo y luego colocadas en agua de la llave hasta que se hundieron (un mes), en ese momento se consideraron saturadas de agua.

La consolidación se realizó con productos comerciales: Biodur™ S3, Biodur™ S10 y el gas Biodur™ S6.

Diseño experimental

Se utilizó la técnica de plastinación S10 (Von Hagens 1986) para la preparación de nueve muestras de cada material. En la técnica S10 los especímenes se deshidratan en tres baños sucesivos de acetona, por una semana cada uno en un congelador a prueba de explosiones (-20 °C). A continuación las muestras de piel y hueso son inmersas en un baño de acetona por 24-48 horas a temperatura ambiente para eliminar la grasa. Después se les devuelve al tercer baño de acetona donde permanecen por una noche para ser luego transferidas a una mezcla 1:100 del agente polimerizante Biodur™ S3 y la resina Biodur™ S10 e impregnadas en condiciones de vacío progresivo durante tres semanas. Posteriormente las muestras son curadas, a temperatura ambiente con gas Biodur™ S6, en una cámara para curado por un período de 5 a 10 días. Luego se colocan en bolsas de plástico bien cerradas para asegurar un curado completo.

Se estudiaron además variaciones de la técnica S10, usando juegos de tres especímenes: en el caso de las muestras de hueso un grupo fue plastinado obviando el tratamiento inicial con solventes para deshidratarlas y eliminar la grasa; otro grupo fue tratado con un blanqueador antes de la plastinación (peróxido de hidrógeno al 5%, con pH 8); y otro más fue limpiado con xilenos antes del curado para eliminar el exceso de polímeros. En el caso de los materiales saturados con agua (madera y piel), se prepararon también especímenes secados al aire y por congelación al vacío, sin ser consolidados, para usarlos como punto de comparación. Algunas muestras de piel y madera fueron también secadas por congelación al vacío y posteriormente plastinadas.

Los tratamientos fueron evaluados monitoreando los cambios en el peso, dimensiones, color, dureza (hueso y madera), resistencia a la incisión (solo madera), flexibilidad (solo piel) y limpieza de la superficie.

Los especímenes fueron pesados antes y después de ser tratados en una balanza digital electrónica Acculab (sensibilidad de $\pm 0,005$ g). Las muestras de hueso y madera fueron medidas longitudinal y radialmente usando un vernier Craftsman (exactitud de $\pm 0,0005$ pulgadas). Las muestras de piel fueron medidas en dos direcciones, una perpendicular a la otra.

El color de las muestras de madera y piel fue evaluado con el espectrofotómetro Macbeth Colour-Eye serie 1500 antes y después de ser tratadas. Las lecturas fueron hechas en el sistema CIEL*a*b*. La fuente lumínica fue el estándar D65 y el espectrofotómetro fue calibrado usando un estándar de blanco de sulfato de bario. Se seleccionó el modo de reflectancia con el componente especular (SEC) y la radiación ultravioleta excluidos y usando el visor pequeño. Los resultados que se reportan son los valores de ΔE que representa la diferencia absoluta en claridad-oscuridad y tonalidad. Debido a que las muestras de hueso no presentaban una superficie plana lo suficientemente grande para realizar mediciones con el espectrofotómetro, se usaron las Tablas Centroid del Inter-Society Color Council-National Bureau of Standards (ISCC-NBS), estas permiten registrar los colores por medio de abreviaturas de nombres y números relacionados con las tablas Munsell (Kelly 1965).

La dureza se midió adaptando el método estándar ASTM C661-86. Se utilizó un durómetro tipo D con una graduación de 1 a 100. Las mediciones se realizaron antes y después del tratamiento en la sección transversal del hueso y después del tratamiento en la madera. La dureza de las piezas de madera secadas al aire fue usada como control.

La resistencia a la incisión permitió medir la presión necesaria para que las muestras fallaran. Para esta prueba los especímenes deben ser planos, por lo que solo pudo realizarse en las muestras de madera. La evaluación se realizó usando un instrumento Universal Instron modelo 1122 con un indentor circular y plano de 2,9 mm de diámetro.

Para medir la flexibilidad de la piel se adaptó el estándar ASTM D522-88. La prueba se realizó usando varillas de acero con 25 - 20 - 12,7 - 9,5 - 6,4 y 3,2 mm de diámetro.

Para elegir el método de limpieza superficial de las muestras se realizaron pruebas de solubilidad del polímero antes y después del curado en acetona, con dimetil formaldehído, etil acetato, tetrahidrofurano, tolueno, triclorometil metano y xilenos, siendo elegidos estos últimos: los xilenos.

La resistencia al envejecimiento de las muestras se evaluó por medio de la exposición a la luz. Se eligieron tres muestras de cada uno de los materiales tratados y dos de los no tratados y junto con portaobjetos de cuarzo con una capa del polímero en una de sus caras y un fragmento del silicón de peso y dimensiones conocidas se colocaron junto a una ventana orientada al sur. Después de 150 días se monitorearon los cambios en el color. En el caso del fragmento de polímero se midieron también los cambios en la resistencia a la incisión. Un grupo similar de muestras fue colocado en una cámara de envejecimiento acelerado y expuestas a luces fluorescentes General Electric tipo F40CW/WM por un período de 8 horas al día por 150 días. Los niveles de luz visible, radiación ultravioleta, humedad relativa y temperatura fueron medidos regularmente.

Por último, los tres componentes del consolidante fueron analizados por cromatografía de gases y espectrometría de masas. Se obtuvieron sus espectros de infrarrojo con transformada de Fourier y sus espectros de resonancia magnética nuclear de ^1H y ^{29}Si .

RESULTADOS

Huesos arqueológicos

Los resultados de este y los otros dos materiales se sometieron a un análisis estadístico. La Tabla 1 contiene las medias de los resultados de este material. Todas las variaciones de la técnica de plastinación causaron un incremento en el peso de aproximadamente el 25%, lo que puede ser, o no, demasiado dependiendo de las características que posea el objeto y del uso que se le dará una vez tratado. Los cambios dimensionales fueron mínimos, ya que por su magnitud pueden incluso ser atribuidos al grado de precisión y reproducibilidad de las mediciones. Debido a que las marcas hechas en algunas de las muestras durante la medición inicial desaparecieron durante el tratamiento, su variación en las dimensiones radiales no es reportada en el presente estudio.

En cuanto al cambio de color asociado a la plastinación, fue lo suficientemente significativo como para ser detectado a simple vista, efecto común de muchos consolidantes, y fue prácticamente eliminado al tratar a los especímenes con peróxido de hidrógeno al 5% antes de ser consolidados.

Una superficie brillante es resultado común de la impregnación con consolidantes aplicados en solución. La brillantez puede ser eliminada o

reducida significativamente controlando la cantidad de consolidante o limpiando la superficie del objeto. El uso de xilanos antes del curado ayudó a reducir el brillo.

Turner-Walker y Parry reportaron en 1995 que la medición de las propiedades mecánicas del hueso es complicada, pues además de ser afectadas por la porosidad y el contenido mineral del hueso –no homogéneas en muestras arqueológicas–, varían con la velocidad con que las cargas son aplicadas. En este proyecto se encontró que la dureza de las piezas tratadas disminuyó significativamente después de la consolidación, sin embargo las muestras se veían y sentían más fuertes, menos frágiles. Esta aparente incongruencia podría deberse a que esta propiedad se vio afectada por los orificios originados durante las mediciones iniciales realizadas antes de la impregnación, o bien, a que la medición posterior al tratamiento reflejó la dureza del consolidante. Los resultados además sugieren que la medición de este indicador mediante un indentor con punta no es el método más adecuado para materiales porosos, fibrosos y compuestos.

Tabla 1. Resultados de las pruebas realizadas a los especímenes de hueso.

Results of tests performed on bone specimens.

Indicador	Cambios en peso %	Cambios longitudinales %	Cambios radiales %	Color después de tratamiento	Cambios en dureza
st	25,8 ± 4,1	-0,6 ± 0,3	-0,4 ± 0,2	77.m.yBr	-12 ± 6
nd	25,9 ± 7,8	-0,4 ± 0,4	-0,2 ± 0,1	77.m.yBr	-6 ± 6
bl	27,9 ± 3,9	-0,4 ± 0,3	0,0 ± 0,0	72.d.OY	-2 ± 14
cl	24,6 ± 5,2	-0,3 ± 0,3	----	77.m.yBr	-12 ± 9

Donde: (st) tratamiento estándar; (nd) no deshidratados, plastinados obviando los baños de acetona; (bl) blanqueados; (cl) limpiados con xilenos antes del curado. El color inicial de las muestras fue 76.1.yBr.

Piel saturada en agua

La Tabla 2 muestra una síntesis de los resultados de las pruebas de los especímenes de piel, con la excepción de los datos de flexibilidad, pues la variabilidad entre las muestras de piel no permitió un análisis significativo. Sin embargo se observó que la plastinación reduce la flexibilidad, lo que puede ser una desventaja para algunos objetos.

A pesar de los cambios aparentes en el peso, producidos por cada uno de los tratamientos, no fue posible probar estadísticamente ninguna diferencia. En todos los casos el peso del polímero absorbido por las muestras excedió el peso del agua eliminada.

Los cambios dimensionales producidos por los diferentes tratamientos fueron en todos los casos menores al 10% y el que no hayan sido similares en las dos direcciones medidas refleja el carácter anisotrópico de la piel. Fue imposible evaluar estos datos, pues no se contaba con el registro del estado de la piel al momento de su hallazgo, ni si la piel se expandió al estar saturada en agua, y qué dimensiones debían ser consideradas como óptimas.

Debido a la variabilidad entre muestras y el tamaño reducido de los grupos estudiados no se pudo confirmar estadísticamente que las muestras que solo fueron secadas eran más claras y opacas que aquellas plastinadas. Igual que con los cambios dimensionales, no fue posible evaluar la apariencia física, pues no hay una expectativa que cumplir respecto de cómo debe verse la piel que ha estado saturada de agua. La piel recuperada de ambientes saturados es normalmente negra, pero no se sabe si su color original después del curtido era así o si fue causado por la interacción con los taninos del ambiente (Panter 1986). El uso que se le dé a la piel en cada caso en particular es el que guiará la evaluación de cuál apariencia física es la considerada como deseable.

Madera saturada en agua

La Tabla 3 presenta un resumen de los resultados de este material. La madera perdió mucho peso al secarse (casi el 70%). Las muestras plastinadas, aunque muy pesadas, alcanzaron hasta

Tabla 2. Resultados de las pruebas realizadas a los especímenes de piel.

Results of tests performed on skin specimens.

Indicador	Cambios en peso %	Cambios longitudinales % Dirección 1	Cambios longitudinales % Dirección 2	Cambios en color
ad	-17,7 ± 7,1	-2,9 ± 1,6	-5,1 ± 4,6	8,0 ± 1,6
vf	-38,3 ± 6,2	-7,5 ± 1,2	-11,2 ± 9,2	9,1 ± 3,5
st	18,9 ± 15,9	-5,7 ± 2,0	-6,0 ± 3,2	3,3 ± 0,7
vp	6,9 ± 12,5	-9,5 ± 1,6	-11,2 ± 5,8	4,1 ± 0,3
cl	14,8 ± 7,9	-6,2 ± 1,8	-9,8 ± 8,4	3,1 ± 0,5

Donde: (ad) secados al aire; (vf) secados por congelación al vacío; (st) tratamiento estándar; (vp) secados por congelación al vacío y plastinados; (cl) limpiados con xilenos antes del curado.

casi el 3% menos que al estar saturadas en agua. El encogimiento producido por la plastinación estándar fue menor que el producido solo secando las muestras, ello corrobora que los consolidantes disminuyen la contracción que sufren los materiales saturados con agua respecto de aquellos que son sometidos a un secado no controlado. La teoría indica que los materiales secados por congelación tienden a encoger menos que aquellos secados al aire, sin embargo la aseveración anterior no coincide con los resultados obtenidos. Entre las posibles causas se encuentra la variabilidad entre las muestras y la anisotropía de la madera. Esta última se puede explicar además porque la reducción dimensional de las piezas fue mayor en la dirección radial (perpendicular a las fibras de celulosa de la madera) que en la longitudinal, que sigue la orientación de la celulosa.

Los cambios de color aunque significativos en la estadística, fueron considerados estéticamente aceptables, ya que las muestras impregnadas eran de color similar o más claras que las saturadas en agua y sobre todo porque estas se encontraban en el rango de tonalidades asociadas a la madera de maple. La brillantez de la superficie no fue tan intensa como en los otros dos materiales, probablemente porque la irregularidad que las fibras de madera dan a la superficie redujo la reflexión especular y aumentó la difusa, siendo eliminada con facilidad mediante la limpieza con xilenos.

La resistencia a la incisión corroboró las observaciones de que la plastinación mejora esta cualidad en la madera.

Polímero a base de silicón

Los resultados obtenidos apoyan los reportes de estabilidad de los silicones. Como se indica en la Tabla 4, no se observaron cambios de color en el fragmento de polímero después de la exposición a la luz solar, incluso la resistencia a la incisión en las muestras expuestas a la luz del sol fue la más alta. Una posible explicación para estos cambios es que la energía de la luz y el ambiente sellado en que se mantuvieron habría permitido la continuación del curado del polímero.

Las muestras de los tres materiales sí mostraron una ligera decoloración que era mayor en las muestras no consolidadas. Los cambios producidos por la luz fluorescente fueron mínimos (menores a uno). La flexibilidad de la piel plastinada se incrementó y fue más alta después de la exposición a luz visible que a luz fluorescente.

El análisis químico indicó que los compuestos involucrados son un siloxano disfuncional que actúa como polímero, un silicato tetrafuncional que es el agente catalizador y una sal de estaño que promueve entrecruzamiento.

Tabla 3. Resultados de las pruebas realizadas a los especímenes de madera.

Results of tests performed on wood specimens.

Indicador	Cambios en peso %	Cambios longitudinales %	Cambios radiales %	Cambios de color	Dureza d.t.	Resistencia a indent. d.t. (MPa)
ad	-67,1 ± 1,3	-0,7 ± 0,2	-2,5 ± 0,8	18,8 ± 1,9	38	36,4
vf	-68,9 ± 0,9	-0,7 ± 0,3	-3,4 ± 0,8	21,5 ± 1,2	39	39,1
st	-2,4 ± 5,2	-0,6 ± 0,4	-0,8 ± 0,6	7,4 ± 4,4	40	45,0
vp	0,1 ± 1,6	-0,7 ± 0,2	-2,2 ± 0,3	5,7 ± 0,8	38	46,7
cl	-2,9 ± 5,1	-0,8 ± 1,1	-2,0 ± 0,8	7,7 ± 3,3	38	----

Donde: (d.t.) después de tratamiento; (indent.) indentación; (ad) secados al aire; (vf) secados por congelación al vacío; (st) tratamiento estándar; (vp) secados por congelación al vacío y plastinados; (cl) limpiados con xilenos antes del curado.

Tabla 4. Resultados de la exposición a luz solar y fluorescente.
Results of exposure to sunlight and fluorescent light.

Material	Cambios de color		Resistencia a indentación d.t. (MPa)	
	Luz solar	Luz fluorescente	Luz solar	Luz fluorescente
Polímero	sin cambios	sin cambios	1,1 ± 0,0	1,0 ± 0,1
Hueso nt	sin cambios	sin cambios	no aplica	no aplica
Hueso st	sin cambios	sin cambios	no aplica	no aplica
Piel nt	1,1	0,7	no aplica	no aplica
Piel st	1,1	1,0	no aplica	no aplica
Madera nt	0,6	2,9	7,6 ± 3,1	19,5 ± 5,2
Madera st	0,6	0,6	8,9 ± 1,4	1,7 ± 1,0

Donde: (d.t.) después de tratamiento; (nt) no tratados; (st) tratamiento estándar.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si bien la consolidación es un tratamiento muy invasivo, es en ocasiones la única alternativa para prolongar la vida de algunos materiales. La plastinación cumple solo con algunos de los criterios mencionados al inicio de este texto, en cuanto a lo que un consolidante ideal debe poseer. Sin embargo sus características positivas para la preservación de ciertos materiales arqueológicos han hecho que el interés en ella y en las técnicas que usan materiales relacionados haya continuado a lo largo de algunas décadas.

Los resultados de la investigación son de alcance limitado debido al carácter piloto del estudio y el número reducido de los especímenes. No obstante, se mostró que la técnica de plastinación podría ser una opción viable para la consolidación de los materiales estudiados, cuando estos forman parte de objetos en los que el aumento de peso causado por la plastinación no es un problema y cuando el tratamiento con un consolidante soluble no es posible. Se estableció además que el silicón usado en la plastinación es estable, tiene una buena penetración, causa cambios dimensionales mínimos

y produce especímenes con apariencia visual cercana a la de los materiales no tratados. Debido a que para su síntesis se utilizan generalmente además de silicón productos fósiles derivados del petróleo, es un compuesto que por sí mismo no afecta los fechados por carbono 14, y de acuerdo con Smith (2003) no tiene ningún efecto detrimente sobre las cualidades de los materiales orgánicos.

Lo mencionado en el párrafo anterior puede explicar el interés continuo que han recibido los silicones como consolidantes para diversos materiales arqueológicos. Por un lado, el uso de la plastinación para tratar madera saturada en agua (Bouzas et al. 2008, Kavvouras 2008) y cuerpos recuperados de pantanos (Frostick 2012), y por otro, el surgimiento de nuevos grupos de investigación dedicados al uso de órgano-silicones, entre los cuales se encuentra el dirigido por el Dr. Wayne C. Smith de la Universidad de Texas A&M. Este grupo ha estudiado el uso de silicones para la consolidación de madera, piel, textiles y cuerdas; vidrio y materiales óseos. Smith y su grupo han propuesto una serie de técnicas que permiten que los materiales consolidados con

silicones sean impregnados a temperatura ambiente y mantengan espacios vacíos en su interior, cualidad que se considera importante en caso de requerir nuevas intervenciones (Smith 2003).

La técnica también ha sido propuesta como una opción para tratar objetos de madera que fueron previamente tratados con PEG y que ahora muestran grandes problemas de deterioro, como es el caso del Vasa (Cabrera 2010).

En la actualidad, los nuevos avances en consolidación exploran ya el uso de materiales biomiméticos, por ejemplo, lignina artificial en el caso de madera y

“esqueletos inorgánicos” para materiales óseos (Christensen et al. 2009).

Independiente de los avances tecnológicos, permanece la labor del conservador-restaurador para evaluar cada caso por su unicidad e incorporar los principios de la disciplina en su proceso de diseño de la intervención.

Agradecimientos: La autora agradece a CONACYT y a la Queen’s University por el apoyo recibido y que hizo posible la realización de la investigación que aquí se presenta. Gracias también a los Dres. Jim Hanlan y Alison Murray por su asesoría.

REFERENCIAS CITADAS

ABERASTURI, A., FERRER, R. y COBOS, A. 2009. Preparación de un fémur de dinosaurio (Colorado, EE.UU.). *Kausis. Revista de la Escuela Taller de Restauración de Aragón*, 11(6): 71-78.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1986. *Standard test method for indentation hardness of elastomeric-type sealants by means of a durometer* (ASTM C661-86). Pensilvania, Estados Unidos.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1988. *Standard test methods for Mandrel bend test of attached organic coatings* (ASTM D522-88). Pensilvania, Estados Unidos.

APPELBAUM, B. 1987. Criteria for treatment: reversibility. *Journal of the American Institute for Conservation*, 26(2): 65-73.

BOUZAS, A., DE CASTRO, J.M. y ZAMBRANO, L. 2008. Tratamiento de la madera arqueológica saturada de humedad por el método denominado plastinación. *PH. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 55: 108-119.

CABRERA, C. 2010. *Re-conservation of Wood from the Seventeenth-Century Swedish Warship the Vasa with Alkoxysilanes: A Re-treatments Study Applying Thermosetting Elastomers*. Tesis para optar al grado

de Magíster en Arte, especialidad Antropología, Universidad de Texas A&M, Texas, Estados Unidos. Recuperado de: <http://nautarch.tamu.edu/Theses/pdf-files/Cabrera-Tejedor-MA2010.pdf> [9 abril 2013].

CHRISTENSEN, M., KNUT, F. y KUTZKE H. 2009. New materials used for the consolidation of archaeological wood – past attempts, present struggles, and future requirements. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3): S183-S190.

DANIEL, S.L. 2007. *A Mammoth of a Project: The Conservation of a Columbian Mammoth*. Tesis para optar al grado de Magíster en Arte, especialidad Antropología, Universidad de Texas A&M, Texas, Estados Unidos. Recuperado de: <http://anthropology.tamu.edu/papers/Daniel-MA2007.pdf> [15 abril 2013].

DE LA CRUZ, V. 1996. *Plastination as a Consolidation Technique for Archaeological Bone, Waterlogged Leather and Waterlogged Wood*. Tesis para optar al grado de Magíster en Conservación de Obras de Arte, Universidad de Queen, Ontario, Canadá.

FEDAK, T.J. 2006. Using capillarity for determining and maintaining a polymer consolidant concentration after solution preparation. *Collection Forum*, 20(1-2): 108-112.

- FROSTICK, L. 2012. Plastination. *consdistlist@cool.conservation-us.org* [Lista de correo, 22 de enero]. Recuperado de: <http://cool.conservation-us.org/byform//mailing-lists/cdl/instances/2012/2012-01-22.dst> [10 febrero 2012].
- GRATTAN, D.W. 1982. A practical comparative study of several treatments for waterlogged wood. *Studies in Conservation*, 27(3): 124-136.
- HAMILTON, D.L. 1999. *Methods for Conserving Archaeological Material from Underwater Sites*. Conservation Research Laboratory, Center for Maritime Archaeology and Conservation, Texas A&M University. Disponible en: <http://nautarch.tamu.edu/CRL/conservationmanual/ConservationManual.pdf> [10 abril 2013].
- HARDMAN, B. y TORKELOSON, A. 1989. Silicones. En *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, pp. 205-308. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- IRWIN, H.T. y WESSEN, G. 1976. A new method for the preservation of waterlogged archaeological remains: use of tetraethyl orthosilicate. *Pacific Northwest Wet Site Wood Conservation Conference*, pp. 49-59. Makah Graphic Arts, Washington, Estados Unidos.
- JEDRZEJEWSKA, H. 1982. The concept of reversibility as an ethical problem in conservation. Problems of competition, ethics and scientific investigation in the restoration. *Proceedings of the Third International Restorer Seminar*, pp. 27-32. Institute of Conservation and Methodology of Museums, Veszprem, Hungría.
- JESPERSEN, K. 1982. Some problems of using tetraethoxysilane (tetra ethyl ortho silicate: TEOS) for conservation of waterlogged wood. *Proceedings of the ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference*, pp. 203-207. International Council of Museums, Ottawa, Canada.
- JOHNSON, J.S. 1994. Consolidation of archaeological bone: A conservation perspective. *Journal of Field Archaeology*, 21: 221-33.
- KAVVOURAS, P., MORAITOU, G., KOSTARELOU, C., ZISI, A. y PETROU, M. 2009. Use of silanol-terminated polydimethyl-siloxane in the conservation of waterlogged archaeological Wood. *Studies in Conservation*, 54(2): 65-76.
- KELLY, K.L. 1965. A universal color language. *Color Engineering*, 3(2): 16-21.
- NORTON, R. 1981. *Methyltriethoxysilane as a consolidant for waterlogged Wood*. Informe de proyecto, Programa de Conservación, Departamento de Arte, Universidad de Queen, Ontario, Canadá. Manuscrito no publicado.
- ORLY, R. 1999. Thesis review: Plastination as a consolidation technique for archaeological bone, waterlogged leather and waterlogged wood. *Journal of the International Society for Plastination*, 14(2): 25.
- PANTER, I. 1986. An investigation into improved methods for the conservation of waterlogged leather. *Bulletin of the Scottish Society for Conservation and Restoration*, 7: 2-11.
- PLUEDDEMANN, E.P. 1982. Silicon compounds. En *Encyclopedia of Chemical Technology*, pp. 887-973. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- SMITH, C.W. 2003. *Archaeological Conservation Using Polymers: Practical Applications for Organic Artifact Stabilization*. Texas, Estados Unidos: Texas A&M University Press.
- THORP, V. 1980. *An Investigation into the Use of Silicates as Consolidants for Degraded Wood*. Informe de proyecto, Programa de Conservación, Departamento de Arte, Universidad de Queen, Ontario, Canadá. Manuscrito no publicado.
- TURNER-WALKER, G. y PARRY, T.V. 1995. The tensile strength of archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 22: 185-191.
- VON HAGENS, G. 1979. Impregnation of soft biological specimens with thermosetting resins and elastomers. *The Anatomical Record*, 194: 247-256.
- VON HAGENS, G. 1986. *Heidelberg Plastination Folder: Collection of Technical Leaflets of Plastination* (2a ed.). Heidelberg, Alemania: Biodur Products.

WHEELER, G. 1987. *The Chemistry of Four Alkoxysilanes and Their Potential for Use as Stone Consolidants*. Tesis para optar al grado de Doctor, University Microfilms International, New York, Estados Unidos.

YASHVILI, N.N. 1975. Conservation of the archaeological wood with transparent silicon organic polymers. *4th Triennial Meeting ICOM Committee for Conservation*, pp. 75/8/5-1 – 75/8/5-8. International Council of Museums, Venecia, Italia.