

# **UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS PARA LA REPARACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MARINA**

**Arsenio Cáceres<sup>1</sup>, Robert M. Jamond<sup>2</sup>, Theresa A. Hoffard<sup>2</sup>, L. Javier Malvar<sup>2</sup>**

**Resumen:** El objetivo de este proyecto fue determinar la durabilidad de seis tipos de materiales compuestos sometidos a exposición acelerada de sal y niebla. Estos materiales compuestos utilizados fueron viniléster, poliéster, fenol, y epoxy, todos ellos reforzados con fibras de vidrio. La durabilidad fue medida principalmente como la pérdida del módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión luego de la exposición. Para acelerar el envejecimiento, los especímenes fueron sometidos a temperaturas de 35° C, 49° C y 71° C durante uno, dos y tres meses mientras eran expuestos a un rociado de sal y niebla. Un proyecto anterior había determinado que dentro de las condiciones de exposición marina más comunes, la combinación de sal y niebla eran la principal causa de degradación de materiales compuestos usados en la reparación de la infraestructura portuaria de la Marina de los EEUU. Se realizaron ensayos de flexión, junto con análisis mecánico dinámicos y con microscopio electrónico. Una vez que los efectos de envejecimiento fueron determinados, se realizó un análisis de superposición de tiempo-temperatura. Las predicciones del análisis indicaron pérdidas de 35% o más en resistencia a la flexión en un periodo de cinco años. Para poder hacer predicciones más allá de los cinco años, sería necesario hacer ensayos que duren más tiempo.

## **USE OF COMPOSITE MATERIALS IN THE REPAIR OF WATERFRONT INFRASTRUCTURE**

**Abstract:** The objective of this project was to determine the durability under accelerated salt-fog exposure of six commercially available composites. These composites included glass-reinforced vinylesters, polyesters, phenolics, and an epoxy. Durability was measured mainly in terms of the loss of elastic modulus and flexural strength after exposure. In order to accelerate aging, the specimens were subjected to temperatures of 95°F (35°C), 120°F (49°C), and 160°F (71°C) for one, two and three months each while exposed to a salt-fog spray. A previous project had determined that among the common marine exposures, salt-fog was a major cause for degradation of composites used in the retrofit of the Navy's waterfront infrastructure. Tensile and flexural tests were performed, along with dynamic mechanic analyses and scanning electron microscopy. Once the aging effects were determined, a time-temperature superposition analysis was performed in order to extrapolate the results and estimate the degradation over longer time periods. Analysis predictions indicate losses of 35% or more in flexural strength over a 5-year period. To enable predictions beyond 5 years, additional and longer lasting testing would be necessary.

## **INTRODUCCIÓN**

Una gran parte de la infraestructura portuaria utilizada por la Marina de los EEUU ha entrado en un periodo de deterioro. Numerosos muelles de hormigón fueron construidos durante e inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial y ellos están empezando a mostrar signos de desgaste. Una de las opciones más prometedoras para reparación de estructuras de hormigón son las láminas de material compuesto. Las láminas se colocan principalmente para ayudar a absorber esfuerzos de tensión y limitar la propagación de fisuras. El uso de materiales compuestos presenta varias ventajas: alta resistencia en tensión, bajo peso, fácil adherencia al hormigón, y una superior resistencia a la corrosión cuando se los compara con los materiales de construcción tradicionales, tales como el acero y el aluminio. Sin embargo, para poder evaluar el verdadero costo de algún tipo específico de material compuesto en estructuras marinas, su durabilidad también debe ser evaluada. No existen estudios específicos de la durabilidad de materiales compuestos sometidos a ambiente marino. La infraestructura portuaria está sujeta a varios tipos de exposición ambiental, incluyendo: humedad, sal, altas y bajas temperaturas, y radiación ultravioleta. En un proyecto previo, el Naval Facilities Engineering Service Cen-

<sup>1</sup> Catedrático Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, P. O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041

<sup>2</sup> Naval Facilities Engineering Service Center, 1100 23<sup>rd</sup> Ave. Port Hueneme, CA 93043-4370

ter (NFESC) investigó los efectos en las propiedades mecánicas bajo climas marinos simulados en laboratorio de varios materiales compuestos de tipo comercial (Jamond 2000; Malvar 2002) y halló que, de entre todas las exposiciones listadas anteriormente, la inmersión en agua de mar y la exposición a la sal y la niebla causaban el mayor deterioro en las resistencias en flexión y tensión de los materiales compuestos. Para abordar el tema de la durabilidad a largo plazo bajo condiciones de sal y niebla, se sugirió que se condujeran ensayos acelerados sobre los mismos materiales compuestos (Caceres 2000).

## TRABAJOS PREVIOS

Para poder diseñarlos en forma segura y económica, se requiere un conocimiento del comportamiento a largo plazo de los materiales compuestos. La dificultad en predecir el desempeño a largo plazo de los materiales compuestos resulta del hecho de que en ensayos de laboratorio sólo se pueden obtener resultados a corto plazo. Por lo tanto, es necesario extrapolar datos de ensayos de corta duración para obtener predicciones a largo plazo. Varios procedimientos experimentales se han usado para acelerar el envejecimiento de materiales compuestos bajo una variedad de ambientes agresivos. La mayoría de ellos se basan en aumentar la intensidad del *agente envejeciente*, si así lo pudiéramos llamar, con la esperanza de que ello va a acelerar el envejecimiento del material sin cambiar el mecanismo de degradación. Entre los trabajos anteriores de investigadores que realizaron ensayos acelerados se puede mencionar el de Porter and Barnes (1998) quienes usaron un baño alto en alcalis y elevaron la temperatura para acelerar la corrosión alcalina de materiales compuestos de E-glass/viniléster<sup>3</sup>. También se cita el trabajo de Bank et al. (1998) quienes expusieron barras “pultruded” de vidrio/viniléster a varias condiciones agresivas hasta por 224 días. Estas condiciones incluían agua desionizada con alta temperatura, soluciones de hidróxido de amonio, predeformaciones, y alta humedad. Esta lista no incluye ensayos acelerados realizados bajo deformación a largo plazo o fatiga. Además, Chajes, et al. (1995) estudiaron los efectos de ciclos de hielo/deshielo y seco/húmedo en una solución de cloruro de calcio en materiales compuestos hechos con aramid, E-glass, y fibras de grafito.

Ensayos de durabilidad de polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés) ya se requiere en varios códigos de edificación. Por ejemplo, ese tipo de ensayo se requiere para mejorar sísmicas por el Departamento de Transportación de California (CALTRANS) (Sheng 2001; Sultan 1995) y la Conferencia Internacional de Oficiales de Construcción (ICBO 1997), los cuales requieren exposición a agua salada. Como resultado de esas exposiciones han aparecido factores de reducción en las propiedades mecánicas los cuales están incluidos en los varios códigos internacionales para diseño con materiales compuestos para aplicaciones a la infraestructura, en particular Japón (Sonobe 1997), Canadá (CHBDC 1996; CSA 2001) y los Estados Unidos (ACI 2001; Metcalfe 1972). Por ejemplo, en los Estados Unidos las barras de vidrio en hormigón expuesto al suelo y medio ambiente deben usar un factor de reducción por exposición ambiental de 0.7 (ACI 2001), y los sistemas con FRP bajo exposición externa deben usar un factor de reducción de 0.65 (Metcalfe 1972).

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como ya se mencionó, el programa experimental es una continuación de uno terminado anteriormente por la NFESC en el cual siete especímenes de GFRP fueron ensayados bajo varios tipos de exposición marina (Jamond 2000; Malvar 2002). En este trabajo, sólo se consideró la exposición bajo sal y niebla ya que se encontró que dicha exposición, junto con la inmersión en agua, resultaban en el deterioro más rápido del material compuesto. El principio de superposición tiempo-temperatura (TTS, por sus siglas en inglés) fue utilizado para extraer el comportamiento a corto plazo.

## ESPECÍMENES

Seis materiales compuestos fueron ensayados:

- Dos vinilésteres reforzados con fibras de vidrio (llamados aquí I y II): fórmulas comerciales que contienen viniléster de epoxy con bisfenol-A y estireno.
- Dos poliésteres reforzados con fibras de vidrio (aquí llamados I y II): fórmulas comerciales de resina hechas con ácido isoftálico, anhidrido maleico, y glicoles comunes.
- Una resina fenólica reforzada con fibras de vidrio: resina comercial hecha con fenol y formaldehido (este producto es una resola fenólica, flotante en agua, y sin estireno).
- Un epoxy reforzado con fibras de vidrio (epoxy-poliamida): resina comercial hecha con epoxy bisfenol-A y agentes de curado amino aromáticos.

<sup>3</sup> E-glass/viniléster tiene el significado de viniléster reforzado con fibras de E-glass.

Las dimensiones nominales de cada pieza de material compuesto fueron de 254 x 12.5 x 3.2 mm), excepto el fenólico, que era más fino (2.4 mm). Estos materiales compuestos plásticos de curado térmico, “pultruded” y reforzados con fibras de vidrio, están disponibles para su uso en aplicaciones portuarias. Las tiras de material compuesto estaban todas hechas por una compañía que compró las esterillas de resina y fibra de vidrio y preparó las tiras, mediante el proceso de pultrusión, con un ancho de 152.4. Las tiras tenían 7 láminas de 85 gr y 2 láminas de 14.2 gr, hechos de una esterilla de tendón continuo de E-glass, con 8 láminas de “rovings” de E-glass con fluencia 113 para el diseño de los especímenes de epoxy, poliéster, y viniléster. El contenido de vidrio de los compuestos de epoxy, poliéster, y viniléster era de 42.5% en peso. Sin embargo, los “rovings” hacían el 28% del peso total de los cristales. Los “rovings” eran unidireccionales y corrían en la dirección larga. La esterilla de tendón continuo tenía una orientación aleatoria. La esterilla cosida era una combinación de “rovings” a 0 y 90°. Los laminados fenólicos eran diferentes debido al método químico de preparar los fenoles (condensación). Los cupones del compuesto fenólico tenían un contenido de 60% de vidrio en peso. La hoja se cortó en tiras de 12.7 mm en la dirección longitudinal y los bordes fueron sellados con un velo de barniz UV.

## EQUIPO DE LABORATORIO

La cámara de sal-niebla (hecha por Auto Technology) es una cámara de corrosión cíclica de 0.566 m<sup>3</sup> y se utiliza en la industria automotriz para ensayos cíclicos de sal-niebla, secado y humedad, así como para otros ensayos cíclicos, de acuerdo a la norma ASTM B 117 (1995). En el ciclo de sal-niebla, la solución salina se atomiza en una neblina fina. Se crea un aire caliente y húmedo burbujeando aire comprimido (usualmente a 103.4 KPa) a través de un tubo (torre de burbuja o torre humectante) que está aproximadamente ¾ lleno de agua caliente (usualmente a 48°C) dionizada (ver Figura 1).

La solución salina se mueve del tanque de mantenimiento de 0.227 m<sup>3</sup> a la boquilla mediante un sistema de alimentación a gravedad usando un interruptor flotante y un solenoide plástico. Cuando el aire caliente y húmedo y la solución salina se mezclan en la boquilla, la solución salina se atomiza en una niebla corrosiva. Usualmente la cámara se calienta a 35°C por los calentadores durante este ciclo. La temperatura de la cámara se fija por el usuario y se controla mediante un Ajustador Lógico Programable. La distribución de la niebla se controla por un sistema de dispersión Uni-Fog. La solución salina se puede reemplazar por otras soluciones para crear una niebla corrosiva con distintas propiedades.

Ensayos de análisis mecánico dinámico (DMA, por sus siglas en inglés) se efectuaron utilizando el DMA-2890 de *TA Instruments*. El DMA mide el módulo de almacenamiento en flexión (rigidez) y las propiedades de amortiguamiento (dissipación de energía) de los materiales. Una fuerza de deformación sinusoidal se aplica a la muestra del material al sentarse el mismo en una configuración de abrazadera (por ej.: flexión en tres puntos) dentro de un horno. Se mide la deformación de la muestra que ocurre bajo la fuerza aplicada al pasar el horno por ciclos mediante un programa de temperatura introducido por el operador.

Para los especímenes de compuestos que se probaron, se utilizó el modo de flexión por tres puntos, de acuerdo al ASTM D 4065 (1995) y ASTM D 5023 (1995). Los especímenes de tiras de compuestos sacados de la cámara de sal-niebla en los tiempos especificados se cortaron en longitudes de 60 mm para colocarlos en las abrazaderas del DMA. Cuatro muestras fueron ensayadas para cada tipo de material compuesto y exposición. El horno del DMA fue programado para calentar la muestra de 35°C a aproximadamente 160°C, o hasta donde fue necesario para extenderse más allá de la fase de transición de vidrio del material. La velocidad de calentamiento se fijó en 2°C/minuto. La frecuencia de la fuerza sinusoidal se fijó en 1.0 Hz. El módulo de almacenamiento en flexión (E') y el módulo de perdida en flexión (E'') se graficaron contra la temperatura para cada muestra. La temperatura en el pico de la curva E'' se tomó como la temperatura de transición del vidrio, T<sub>g</sub>. Los datos de los especímenes expuestos fueron comparados con los especímenes de control para cada tipo de compuesto ensayado.

Los especímenes fueron cuidadosamente observados en un microscopio electrónico (SEM) para ver signos de deterioro con sus correspondientes superficies de control. Se hicieron comparaciones entre las superficies de control y



**Figura 1: Cámara sal-niebla de Auto Technology.**

las superficies expuestas por tres meses para poder apreciar señales de deterioro. Las observaciones con el SEM ayudan a asegurar que los mecanismos de degradación sean los mismos durante los tres meses de ensayo, lo cual es una condición necesaria para que el método TTS sea válido.

## TEMPERATURA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO

Cada ensayo para cada específica temperatura se realizó por tres meses, siendo 9 meses la duración total del programa. Dado el rango de temperaturas (35 a 71°C) en que la cámara puede operar, las temperaturas utilizadas para acelerar el envejecimiento fueron:

- 35°C
- 48.9°C
- 71.1°C

Estas temperaturas están por debajo de la temperatura de transición del vidrio de los termosets seleccionados (ver Tabla 1), de esa manera evitando el cambio en el mecanismo de degradación que puede ocurrir en ese punto. Una temperatura máxima de 0.8 T<sub>g</sub> ha sido sugerido para acelerar el proceso de degradación (Gentry 2002). Otros recomiendan que las temperaturas de aceleración se mantengan por los menos de 10 a 15°C por debajo de T<sub>g</sub> de la matriz. Como resultado de ésto, los ensayos generalmente se conducen a 60°C, 80°C y a veces a mayores temperaturas (Gentry 2002; Chin 1997).

**Tabla 1: Temperaturas de transición del vidrio T<sub>g</sub> en grados centígrados. (Pico de E'', Curva de Módulo de Pérdida de Flexión).**

Espécimen	Control	35°C	48.9°C	71.1°C
		3 meses	3 meses	3 meses
Viniléster I (A)	108.4	106.1	101.0	108.6
Viniléster II (B)	105.5	102.1	103.7	111.4
Isopolíéster I (C)	89.8	87.9	87.9	88.5
Isopolíéster II (D)	94.7	88.2	87.9	97.9
Epoxy Amida (F)	144.2	140.4	137.9	145.0

## ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos acelerados están basados en mediciones hechas periodicamente a fin de notar cambios en las propiedades del material. Una serie de ensayos se realizó para cada temperatura mencionada anteriormente. Tres conjuntos de cada tipo de compuesto fueron sacados cada mes durante los tres meses del ensayo y se efectuaron las siguientes pruebas:

- Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad según la norma ASTM D 790 (1995). Los especímenes estaban apoyados en dos puntos distanciados 63.5 mm (vano) y cargados en la configuración convencional llamada “flexión por tres puntos”.
- Los módulos elásticos de depósito y las temperaturas de transición a vidrio fueron obtenidas mediante un análisis termal mecánico-dinámico (DMA) según la norma ASTM D 5203 (1995).

Del proyecto anterior desarrollado por el NFESC (Jamond 2000; Malvar 2002 ) fueron obtenidos las resistencias y los módulos de elasticidad a 35° C a 0 días (control), 28 días y 12 meses. En el mismo proyecto se determinó que la resistencia a flexión fue más afectada que la resistencia en tensión, por lo que este proyecto se limitó a medir resistencias en flexión.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Ensayos De Flexión

La resistencia a flexión y el módulo de elasticidad fueron medidos al finalizar el primer, segundo y tercer meses. Los valores fueron promediados para cada compuesto, duración del ensayo y temperatura. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 5. En la aplicación del método TTS se observó que los factores de traslación no eran constantes para diferentes niveles de esfuerzo, por lo que fue utilizado el método del parámetro esfuerzo-modificado ( $t$ ,  $T$ ).

**Tabla 2: Resumen de resultados experimentales de resistencia en flexión (MPa).**

Material	Control			T = 35°F			T = 48.9°F			T = 71.1°F		
	Meses →	1 m†	2 m	3 m	12 m†	1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m	
Vinylester I	542.3	564.0	550.0	522.8	466.0	490.6	536.4	458.7	492.9	403.1	418.9	
Vinylester II	515.3	496.6	478.4	446.2	390.5	506.5	456.9	412.9	416.2	384.9	332.5	
Polyester I	589.93	520.4	500.9	573.5	396.2	572.2	460.9	439.6	440.2	385.1	362.1	
Polyester II	556.2	483.3	488.1	508.7	419.7	561.7	472.0	373.6	419.6	390.4	360.0	
Phenolic I	326.1	332.9	123.2	128.7	266.0	134.5	162.7	177.8	173.5	93.2	136.3	
Epoxy	651.9	497.0	464.8	464.1	430.0	480.2	425.9	418.5	368.7	316.3	340.7	

† Obtenidos de una investigación previa efectuada en NFESC [0]

**Tabla 3: Resumen de resultados experimentales de resistencia en flexión como porcentaje respecto al de control.**

Material	Control			T = 35°F			T = 48.9°F			T = 71.1°F		
	Meses →	1 m†	2 m	3 m	12 m†	1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m	
Vinylester I	100.0	104.0	101.4	96.4	85.9	90.5	98.9	84.6	90.9	74.3	77.2	
Vinylester II	100.0	96.4	92.9	86.6	75.8	98.3	88.7	80.1	80.8	74.7	64.5	
Polyester I	100.0	88.2	84.9	97.2	67.2	97.0	78.1	74.5	74.6	65.3	61.4	
Polyester II	100.0	86.9	87.8	91.5	75.5	101.0	84.9	67.2	75.4	70.2	64.7	
Phenolic I	100.0	102.1	37.8	39.5	81.6	41.3	49.9	54.5	53.2	28.6	41.8	
Epoxy	100.0	76.2	71.3	71.2	66.0	73.7	65.3	64.2	56.6	48.5	52.3	

**Tabla 4: Resumen de resultados experimentales de módulo de elasticidad (MPa).**

Material	Control			T = 35°F			T = 48.9°F			T = 71.1°F		
	Meses →	1 m†	2 m	3 m	12 m†	1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m	
Vinylester I	18469	19012	17709	16916	16868	16647	16461	15647	15764	13668	14951	
Vinylester II	16724	16433	15213	13895	15082	15488	14971	14557	14185	14151	13461	
Polyester I	16255	14951	15033	15695	13151	14813	14461	14268	15557	13378	12289	
Polyester II	15538	14833	14599	13813	14806	15447	13337	12578	12751	13130	12896	
Phenolic I	13759	15433	7620	8220	12958	7434	11006	10654	10330	8420	10089	
Epoxy	19731	20854	16709	16888	19654	16606	17674	17399	16488	16026	16999	

† Obtenidos de una investigación previa efectuada en NFESC (Jamond 2000).

**Tabla 5: Resumen de resultados experimentales para módulo de elasticidad como porcentaje respecto al de control.**

Material	Control		T = 35°F				T = 48.9°F			T = 71.1°F		
	Meses→	1 m†	2 m	3 m	12 m†	1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m	
Vinylester I	100.0	102.9	95.9	91.6	91.3	90.1	89.1	84.7	85.4	74.0	81.0	
Vinylester II	100.0	98.3	91.0	83.1	90.2	92.6	89.5	87.1	84.8	84.6	80.5	
Polyester I	100.0	92.0	92.5	96.6	80.9	91.1	89.0	87.8	95.7	82.3	75.6	
Polyester II	100.0	95.5	94.0	88.9	95.3	99.4	85.8	81.0	82.1	84.5	83.0	
Phenolic I	100.0	112.2	55.4	59.7	94.2	54.0	80.0	77.4	75.1	61.2	73.3	
Epoxy	100.0	105.7	84.7	85.6	99.6	84.2	89.6	88.2	83.6	81.2	86.2	

Se nota que en algunos casos la resistencia en flexión y la rigidez inicialmente aumentan a pesar de la exposición mayor al agente envejeciente. Probablemente este aumento sea causado por un aumento de la densidad de enlaces cruzados. En el caso del epoxy, las muestras no se curan totalmente en temperatura ambiente y más enlaces cruzados van a verificarse a altas temperaturas. La inmersión en medios líquidos causa la plastificación de la resina con una reducción simultánea del T<sub>g</sub> del polímero.

Para proceder a la aplicación del método TTS de extrapolación, los valores de los esfuerzos y módulos de elasticidad máximos fueron dibujados en una gráfica logarítmica y luego transportados sobre las curvas maestras de cada material. Se verificó que los factores de translación seguían un comportamiento lineal, lo cual es una condición necesaria para que el método de superposición tiempo-temperatura tenga validez. Posteriormente, las curvas maestras así obtenidas fueron transportadas y transformadas a 21°C, el cual es la temperatura de servicio prevista para este tipo de infraestructura. Obviamente, las curvas maestras obtenidas abarcan un periodo mayor de tiempo, aquí llamado Máximo Tiempo Predecible (MTP). Este tiempo no resultó lo suficientemente largo como para abarcar la vida de servicio típica deseada. No se intentó hacer ningún ajuste de curvas más allá del MTP debido a que se desconoce el comportamiento futuro. Los resultados de este proceso están resumidos en la Tabla 6.

**Tabla 6: Tiempos predecibles con la resistencia en flexión y módulo de elasticidad remanentes.**

Material	Resistencia a flexión (MPa)	MPT para resistencia	Resistencia remanente en MPT (%)	Módulo (MPa)	MPT para módulo	Módulo remanente en MPT (%)
Vinylester I	542	4.7 años	65.2	18467	4.2 años	66.4
Vinylester II	515	1.4 años	64.1	16723	2 años	80.4
Polyester I	590	2.5 años	61.4	16254	4.2 años	75.4
Polyester II	557	1.6 años	64.3	15544	0.5 años	80.7
Fenol	326	1.6 años	21.1	13757	rechazado†	rechazado†
Epoxy	652	4.7 años	40.2	19729	0.4 años	80.1

† El comportamiento fue muy errático como para ser considerado.

#### Análisis Termal Dinámico-Mecánico (Dma)

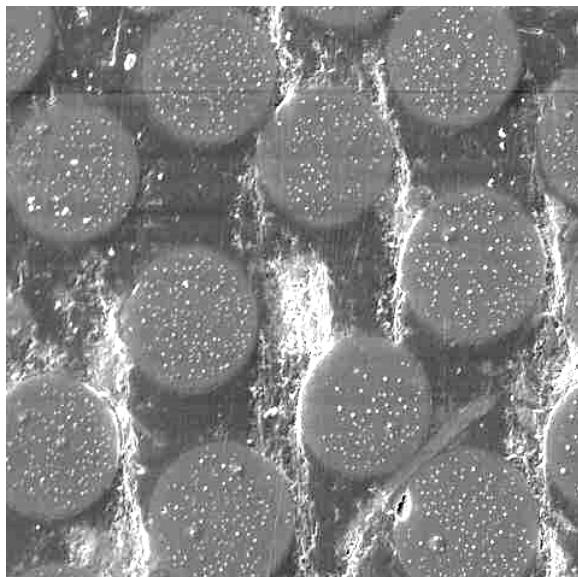
Los resultados del análisis termal dinámico-mecánico, en términos de la variación de la temperatura de transición del vidrio (T<sub>g</sub>) están resumidos en la Tabla 1. En general, donde se observa una caída de T<sub>g</sub>, puede afirmarse que se desarrolló un efecto plastificante sobre las muestras a esas temperaturas. Esto se verificó en todas las muestras expuestas a 35°C y 48.9°C. El aumento de T<sub>g</sub>, por otro lado, indica un actividad residual de enlace cruzado a esas temperaturas. Este comportamiento se verificó a 71.1°C en todos los materiales analizados excepto el isopolíéster I.

#### Inspección Con Microscopio Electrónico

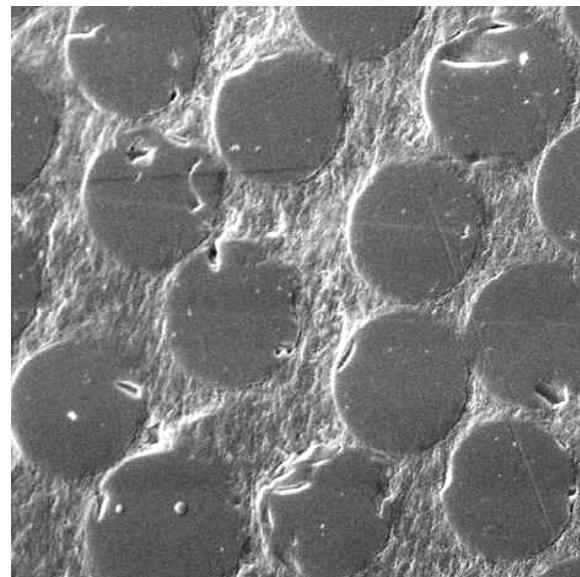
Se obtuvieron fotografías con microscopio electrónico en los especímenes expuestos tres meses a 71.1°C. Estas fotografías, mostradas en la Fig. 2, junto con las superficies de control. El material de la fotografía corresponde a uno que

experimentó una reducción de rigidez del orden del 36%. Antes de la exposición, las muestras fueron pulidas medio micro. Luego fueron bañadas al paladium dorado.

Las fotografías muestran una gran cantidad de degradación en las fibras y daño en la interface, tal como se muestra en los vacíos y fisuras. Este tipo de daño ya fue reportado por Grant y Bradley (Grant 1995). Como ya se mencionó, el mecanismo de daño es una combinación de lixivación y aguafuerte, probablemente causado por la formación de SiOH en la interface entre el vidrio y el agua.



(a)



(b)

**Figura 2: Rastreo con microscopio electrónico de un compuesto de epoxy de control (a) y expuesto (b) (500x).**

## CONCLUSIONES

Un programa experimental de envejecimiento acelerado de GFRP fue conducido bajo exposición de sal-niebla. Los resultados obtenidos levantan serias dudas acerca de la conveniencia de usar estos compuestos para reparación de la infraestructura estructura marina. La degradación experimentada por estos materiales no permitió hacer una extrapolación a periodos más largos. Los resultados a corto plazo fueron, sin embargo, suficientes para justificar investigación adicional sobre estos compuestos.

Otras conclusiones más específicas incluyen:

1. A corto plazo, las degradaciones experimentadas por la mayoría de los materiales fueron suficientemente significantes como para comprometer su resistencia a la flexión (pérdidas de hasta 35% o más) en menos de cinco años en todos los casos.
2. La exposición a sal-niebla aparentemente afecta más a la resistencia a flexión que al módulo de elasticidad, observación que ya fue reportada previamente en la literatura técnica (Bank 1997).
3. Los compuestos fenólicos parecen muy inaptos para este tipo de exposición, teniendo en cuenta la degradación (~60%) en un periodo corto (20 meses). Estos compuestos tuvieron un comportamiento errático, haciendo que las predicciones no fueran confiables.
4. Los compuestos de viniléster reforzados con fibras parecen ser los más convenientes para este tipo de exposición ya que tuvieron menos degradación (~35%) en cinco años. El desempeño superior del viniléster en comparación con la resina de poliéster en típicos ambientes industriales corrosivos está bien documentado (Bank 1993; Gentry 2002).
5. Con los compuestos de viniléster reforzados con fibras de vidrio, la degradación en rigidez también resultó la menor, en el orden de 25% en aproximadamente el mismo tiempo.

6. Las degradaciones experimentadas por las muestras no fueron suficientes como para extrapolar a años esperados de vida útil (50-100 años) de una estructura típica de hormigón. Ensayos adicionales son necesarios para hacer mayores predicciones.
7. Investigación adicional es necesaria para determinar procedimientos de cómo incorporar estos resultados en un factor de seguridad conveniente.

## RECONOCIMIENTOS

Los fondos para este proyecto fueron provistos por la Oficina de Investigación Naval (Office of Naval Research). La investigación se realizó en los laboratorios del NFESC, Port Hueneme, California. Se agradece a todo el personal del laboratorio que colaboró de diversas maneras en este proyecto.

## REFERENCIAS

- Jamond, R.M., Hoffard, T.A., Novinson, T., Malvar, L.J. (2000). "Composites in Simulated Marine Environments." NFESC Special Publication SP-2083-SHR.
- Malvar, L.J., Jamond, R.M., Hoffard T.A., Novinson T. (2002). "GFRP Composites in Simulated Marine Environment." 2<sup>nd</sup> International Conference on Durability of FRP Composites for Construction, CDCC'02, Montreal, Quebec, Canada, 191-202.
- Caceres, A., Jamond, R.M., Hoffard, T.A., Malvar, L.J. (2000). "Accelerated Testing of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites – Test Plan." NFESC Special Publication SP-2091-SHR.
- Porter, M.L., Barnes, B.A. (1998). "Accelerated Aging Degradation of Glass Fiber Composites." *Fiber Composites in Infrastructure, Second International Conference on Composites in Infrastructure*, Tucson, AZ, 446-459.
- Bank, L.C., Gentry, T.R., Barkatt, A., Prian, L., Wang, F., Mangla, S. R. (1998). "Accelerated Aging of Pultruded Glass/Vinylester Rods." *Fiber Composites in Infrastructure, Second International Conference on Composites in Infrastructure*, Tucson, AZ, 423-437.
- Chajes, M.J., Thomson, T.A., Farschman, C.A. (1995). "Durability of Concrete Beams Externally Reinforced with Composite Fabrics." *Journal of Construction and Building Materials*, 9 (3), 141-148.
- Sheng, L. (2001). "Summary of CALTRANS' FRP Composite Pre-Qualification Program." *46<sup>th</sup> International SAMPE Symposium Proceedings*, Vol. 1, 923-930.
- Sultan, M., Hawkins, G., Sheng, L-H. (1995). "CALTRANS Program for the Evaluation of Fiber Reinforced Plastics for Seismic Retrofit and Rehabilitation of Structures." *Proceedings, FHWA National Seismic Conference*, San Diego, CA.
- International Conference of Building Officials, Evaluation Service (1997). "Acceptance Criteria for Concrete and Reinforced and Unreinforced Masonry, Strengthening using Fibre-Reinforced, Composite Systems." AC125, International Conference of Building Officials, Whittier, CA.
- Sonobe, Y., Fukuyama, H., Okamoto, T., Kani, N., Kimura, K., Kobayashi, K., Masuda, Y., Matsuzaki, Y., Mochizuki, S., Nagasaka, T., Shimizu, A., Tanano, H., Tanigaki, M., Teshigawara, M. (1997). "Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures." *Journal of Composites for Construction*, 1(3), 90-113.
- CHBDC Technical Committee 16, (1996). "Design Provisions for Fibre Reinforced Structures in the Canadian Highway Bridge Design Code." *Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Montreal, Quebec, Canada, 391-406.
- Canadian Standards Association, (2001) *Canadian Highway Bridge Design Code, Section 16: Fibre Reinforced Structures, and Commentary*, Canadian Standards Association, 28.
- American Concrete Institute Committee 440, (2001). "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars." ACI 440.1R-01, American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 440, (2002). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures." ACI 440.2R-02, American Concrete Institute.
- Metcalfe, A.G., Schmitz, G.Z., "Mechanism of Stress Corrosion in E-Glass Filaments" *Glass Technology*, 13(1) 5-16.
- ASTM B 117, (1995). "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus." Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 4065 (1995). *Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures*. Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials
- ASTM D 5023 (1995). "Standard Test Method for Measuring the Dynamic Mechanical Properties: In Flexure (Three- Point Bending)." Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials.

- Gentry, T. R., Bank, L. C., Thompson, B. P., Russel, J. S. (2002) "An Accelerated-Test-Based Specification for Fiber Reinforced Plastics for Structural Systems". *Second International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC 02)*, Montreal, Quebec, Canada, 13-24.
- Chin, J.W., Nguyen, T., Aouadi, K. (1997). "Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction." *Journal of Composites Technology & Research, JCTRER*, 19 (4) 205-213.
- ASTM D 790, (1995). "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials." Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials.
- Grant, T.S., Bradley, W.L. (1995). "In-Situ Observations in SEM of Degradation of Graphite/Epoxy Composite Due to Seawater Immersion." *Journal of Composite Materials*, 29 (7), 852-867.
- Bank, L. C., Barkatt, A., Gentry, T. T., and Prian, L. (1997). "Use of Physicochemical, Mechanical and Optical Tests in Accelerated Test Methodology for Determining the Long-Term Behavior of FRP Composites". Report to the Federal Highway Administration contract DTFH61-93-C-00012, 94
- Bank, L. C., (1993). "Properties of FRP Reinforcements for Concrete," *Fiber-Reinforced Plastic (FRP) for Concrete Structures: Properties and Applications*, (A. Nanni, ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 59-86.