

01121
66



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL DURMIENTE DE POLIMERO COMO ALTERNATIVA
EN LAS VIAS DEL METRO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A:
PEDRO ANTONIO HERNÁNDEZ TORRES

DIRECTOR DE TESIS:
ING. FRANCISCO DE JESÚS CHACON GARCÍA



MEXICO, D.F. 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCGTG/SEAC/UTIT/162/02

Señor
PEDRO ANTONIO HERNÁNDEZ TORRES
P r e s e n t e

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. FRANCISCO DE JESUS CHACON GARCIA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EL DURMIENTE DE POLIMERO COMO ALTERNATIVA EN LAS VÍAS DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO"

- I INTRODUCCIÓN
- II ANTECEDENTES
- III NORMAS Y CODIGOS UTILIZADOS
- IV DUEMIENTES TRADICIONALES
- V DURMIENTES DE POLIMERO REFORZADO
- VI ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO
- VII CONCLUSIONES
- VIII BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de esta

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 11 Noviembre 2002

EL DIRECTOR

M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg

13

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por apoyarme en todo momento, para lograr esta meta. Con dedicatoria especial a mi madre (q.e.p.d.).

A mis compañeros y amigos, que directa o indirectamente contribuyeron en la obtención de esta meta.

A la FI-UNAM, en especial a los profesores, por su enseñanza invaluable al paso por las aulas.

Al Ing. Francisco de J. Chacón García, por su paciencia y apoyo durante la elaboración de este trabajo.

Al Creador del Universo, por haberme permitido concluir esta carrera.

Índice.

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
I.- ANTECEDENTES.	3
1.1.- El polímero en la industria de la construcción	3
1.2.- El polímero y su utilización en México	5
1.2.1.-Definición	8
1.3.- Propiedades y ventajas	9
1.3.1.- Propiedades mecánicas	10
1.3.2.- Ventajas	11
1.4.- Características de los componentes	13
1.4.1.- Resinas	13
1.4.2.- Fibras	15
1.4.3.- Materiales de relleno	17
1.4.4.- Aditivos	18
1.4.5.- Recubrimientos Gel	19
1.5.- Factores que afectan a las propiedades	19
1.6.- Procesos de manufactura	20
1.7.- Aplicaciones y usos	22
1.8.- Software de diseño	28
II.- NORMAS Y CODIGOS UTILIZADOS.	30
II.1.- Comités Técnicos	31
II.2.- Organizaciones y criterios	31
II.3.- Instituciones y publicaciones	32
II.4.- Métodos de prueba y otros estándares	33
III.- DURMIENTES TRADICIONALES.	36
III.1.- Generalidades	36
III.2.- Definición	37
III.3.- Clasificación	40
III.3.1.- Según el material	40
III.3.2.- Según la función	40
III.4.- Localización y distanciamiento	40
III.5.- Cargas de diseño	41
III.6.- Mediciones y ensayos de verificación	42
III.7.- Realización de pruebas	42
III.8.- Durmientes de Concreto.	45
III.8.1.-Dimensiones	45
III.9.- Durmientes de Madera.	48
III.9.1.- Dimensiones	48
III.9.2.- Tolerancias	49
III.9.3.- Características de la madera	49
III.9.4.- Documentación utilizada	52

IV.- DURMIENTE DE POLIMERO.	53
IV.1.- Generalidades	53
IV.2.- Proceso de fabricación	54
IV.3.- Documentación utilizada	55
IV.4.- Dimensiones y tolerancias	56
IV.5.- Propiedades	57
IV.6.- Hojas Técnicas	59
IV.6.1.- Punto de aplicación de las pruebas	60
IV.6.2.- Pruebas de ciclos acelerados	60
IV.6.3.- Pruebas de intemperie acelerada	68
IV.6.4.- Elementos mecánicos	74
IV.7.- Líneas de ferrocarril de EUA con durmientes de polímero a prueba	78
IV.8.- Tramos del Metro de la Cd. De México con condiciones para la instalación de durmientes de polímero	80
V.- ANÁLISIS DE BENEFICIO-COSTO.	82
V.1.- Evaluación del proyecto	82
V.2.- Relación beneficio-costos	82
V.3.- Método del costo de ciclo de vida	84
V.4.- Clasificación de costos	86
V.5.- Costos por introducción de nuevas tecnologías	86
V.6.- Ventajas	88
V.7.- Cuadro comparativo	89
V.8.- Fórmulas	90
VI.- CONCLUSIONES.	91
APENDICE A	93
GLOSARIO	96
BIBLIOGRAFIA.	98

/

INTRODUCCION.

El Sistema de Transporte Colectivo "Metro" constituye la columna vertebral del transporte público del Distrito Federal y la zona metropolitana, que junto con la red de drenaje forman las dos obras más grandes de la Ciudad, motivo por el cual debe estar a la vanguardia en todas las áreas que lo conforman, tanto en el ámbito operativo como administrativo. En la estructura operacional existen diversos equipos e instalaciones tanto fijas como móviles que son fundamentales para el buen funcionamiento de este importante sistema de transporte. Dentro de los componentes del sistema de vía de la red del Metro se encuentra el durmiente, que sirve de soporte de los perfiles metálicos por los que transitan los trenes.

Actualmente la tecnología en el área de la química está desarrollando, nuevas alternativas con diferentes materiales para la fabricación de durmientes de ferrocarril y trenes urbanos; en varios países se está implementando esta opción con resultados satisfactorios.

En la industria de la construcción sólo se tienen como principales materiales el concreto, acero, aluminio y madera, desconociendo el potencial de otros materiales que pueden satisfacer los requerimientos estructurales igual o en ciertos casos aún mejor. La industria química ha tenido un crecimiento considerable, proporcionando una variedad de materiales, para abastecer a diferentes sectores industriales, entre ellos, la industria de la construcción.

El presente trabajo ofrece una alternativa, utilizando al polímero como material estructural para la fabricación de durmientes, que pueden ser instalados en las vías del Metro de la Ciudad de México y en otros sistemas ferroviarios en sustitución o combinación con los durmientes existentes de concreto y de madera.

El aporte de la química que se tiene es la aplicación de los materiales compuestos o polímeros ya sea reforzados con fibras o sin reforzar como materiales de construcción, es importante para todos los que se encuentran inmersos en proyectos de infraestructura civil conocer los aspectos y propiedades de este material y así poder aprovechar los beneficios que proporciona.

En el capítulo I se describen diferentes proyectos realizados empleando productos fabricados con materiales de polímero. Actualmente en Europa y principalmente en Estados Unidos de Norteamérica el durmiente de polímero está siendo sometido a prueba en diferentes tramos de ferrocarril, teniendo un comportamiento estructural adecuado.

Los materiales compuestos de acuerdo a las pruebas que se les ha realizado poseen propiedades físicas y mecánicas aceptables, teniendo estos datos como base se deduce que son materiales aptos para diseñar elementos estructurales.

El capítulo II presenta la participación de diferentes Organizaciones y Comités a nivel internacional que rigen y establecen los parámetros tanto de fabricación como de ensayos a modelos que tienen que cumplir los materiales fabricados de polímero para ser aceptados y utilizados. Las pruebas que se presentan se llevaron a cabo con las normas ASTM y otros métodos aprobados por las dependencias correspondientes.

En el capítulo III se muestran las características, funciones y propiedades con que cuentan los durmientes fabricados con materiales convencionales instalados actualmente en toda la red del Metro, tanto en vías primarias y secundarias. Esto con el objeto de tener una idea a grandes rasgos sobre el comportamiento estructural de un durmiente.

El capítulo IV muestra la información obtenida sobre los durmientes de polímero ensayados y probados en diferentes laboratorios de los Estados Unidos, en colaboración con importantes instituciones. El material informativo proporcionado por empresas dedicadas a la fabricación de

durmientes de plástico, podría servir de base a las empresas mexicanas para incursionar en el área de la construcción con la fabricación de diversos productos de polímero, incluidos los durmientes para vías férreas.

En nuestro país existen pocas empresas dedicadas a la producción de materiales de polímero para su aplicación en la construcción, esto debido a la falta de información sobre las ventajas que ofrecen estos materiales. La mayoría de las empresas productoras de plásticos, sólo elaboran plásticos no reforzados tales, como envases de refrescos, acrílicos, domos, etc... desconociendo las ventajas que pueden tener con la inclusión del refuerzo de fibras.

Por la versatilidad, baja densidad y alta resistencia al impacto que ofrecen estos materiales pueden emplearse en cualquier tipo de construcción; como elemento de vía férrea presenta varias ventajas que los durmientes de concreto y madera. Representa una buena alternativa por su baja densidad y excelente durabilidad en los tramos elevados que existen en la red del Metro.

En el capítulo V se analizan las posibles ventajas y los costos de inversión que podría generar la introducción de un durmiente fabricado con materiales compuestos, incluyendo todas las etapas por las que tiene que pasar un proyecto de innovación tecnológica, como es la implantación de los durmientes de polímero dentro del vías del Metro.

En la introducción de una nueva tecnología o presentación de un proyecto se tiene que realizar una evaluación exhaustiva en lo que se refiere a costos de inversión y los beneficios a obtener durante la vida útil del proyecto. Existen varios métodos para analizar los costos que puede generar la utilización de materiales fabricados de polímero, los cuáles han sido desarrollados y probados con resultados satisfactorios.

ANTECEDENTES

I.1.- El polímero en la industria de la construcción.

Las innovaciones desarrolladas alrededor de los plásticos han propiciado actualmente que éstos le estén ganando el mercado a algunos de los materiales tradicionalmente empleados en la construcción, puesto que tienen las características idóneas para lograr un equilibrio entre funcionalidad, economía y estética.

Prueba de este fenómeno de sustitución progresiva es que hoy en día artículos fabricados de poliestireno, poliuretano, policloruro de vinilo (PVC), cloruros de polivinilo, poliamida y otros productos de plástico reforzado son indispensables en cualquier obra.

A partir de los años cincuenta las investigaciones científicas propiciaron que ingenieros y arquitectos emplearan los plásticos con mayor frecuencia, pues han demostrado ser durables, económicos, eficientes, maleables y resistentes a la corrosión, al impacto y a las altas temperaturas. Debido a sus características están presentes en cimentaciones, playas artificiales, plantas de reciclaje, depósitos de agua, piscinas, tuberías, ventanas, techos, pisos, cableados, recubrimientos y accesorios en general.

El concepto de polímero, plástico o material compuesto ha existido desde tiempos remotos, sin embargo su aplicación en el área de la construcción tiene sus orígenes a mediados de la década de los 30^ª cuando se fabricó el primer producto con este material que fué el casco de un bote en un experimento; el polímero reforzado con fibras (PRF) es el que tiene mayor demanda en la industria de la construcción por tener mejores propiedades físicas y mecánicas que el polímero natural (sin reforzar).

Actualmente este material está sustituyendo en gran parte al aluminio y acero, su aplicación se centra principalmente en el área automotriz, aeroespacial y la de procesos químicos. Es común la presencia del polímero (plástico simple o no reforzado) en sus diferentes formas en la vida cotidiana, ya que hasta la fecha existen diversos productos elaborados con este material que van desde vasos, envases de refrescos de plástico hasta un billete; a este último le faltaría ser reforzado con alguna fibra para tener más resistencia y mayor durabilidad.

Después de los 40^ª se generaron nuevas y revolucionarias aplicaciones de este material. La Fuerza Aérea y la Marina de los Estados Unidos de Norteamérica aportan un avance importante en materiales compuestos, consiguiendo una gran relación esfuerzo-peso y resistencia al ambiente, así como a los efectos corrosivos de la sal, del aire y del océano. Desde los principios de los 50^ª los polímeros han sido empleados extensivamente para equipamiento de procesos químicos, fabricación de pulpa y papel, tratamiento de aguas residuales, refinación de metales y otras industrias de manufactura.

En los inicios, la aplicación de los materiales compuestos en la arquitectura se realizó en el reforzamiento de estructuras de concreto, empleando productos fabricados de polímero reforzado

con fibras, continuando su utilización en la restauración de edificios históricos. Algunos productos típicos desarrollados fueron los domos, paneles traslúcidos y paneles exteriores.

El gran avance que se desarrolló entre las décadas de los 60^ª y 70^ª en esta materia, fué la tecnología que se produjo en la fabricación de las tolvas de plástico reforzado para el proyecto nuclear Manhattan en la segunda guerra mundial, además se empleó el polímero reforzado con fibra de carbono para la fabricación de cohetes y tanques. La marca automotriz Chevrolet construyó el primer modelo Corvette con carrocería de plástico reforzado con fibra de vidrio en 1953. Actualmente la carrocería de los autos de carreras utilizan polímero con fibra de carbono para tener un mejor rendimiento. Hasta la fecha la NASA sigue aplicando diferentes productos de materiales compuestos en sus experimentos.

A finales de los 70^ª y principios de los 80^ª se realizaron varias construcciones con materiales de polímero particularmente en Asia y Europa. En 1986 fue construido en Alemania, el primer puente del mundo utilizando tendones de compuestos reforzados. En China se construyó el primer puente donde la plataforma fue hecha completamente de materiales compuestos. En 1992 se construyó el primer puente peatonal totalmente de compuestos de polímero, en Escocia. En los Estados Unidos de Norteamérica se construyó la primera plataforma de un puente con materiales de polímero reforzado con fibras, en la actualidad en este país se han instalado innumerables puentes peatonales en varias autopistas y parques nacionales.

La falta de conocimiento de los constructores sobre la existencia de este material es una de las grandes barreras aunado a la falta de información histórica sobre el comportamiento que ofrecen los polímeros, esto hace que el sector de la construcción no los tenga catalogados como aptos para su aplicación.

Los datos obtenidos de organizaciones dedicadas a la construcción, señalan que los países desarrollados principalmente los Estados Unidos, consideran a los compuestos como parte de los elementos o productos que son de uso común en la construcción. Existen normas y códigos que han sido establecidos para la aplicación de los productos fabricados de polímero y que han surgido de los requisitos que cumplen las estructuras fabricadas con materiales convencionales.

Podemos mencionar otra barrera que se puede considerar como la principal, que son los costos iniciales, que pueden ser muy elevados, pero que con un adecuado análisis de costo de ciclo de vida resultaría más efectiva la utilización de los productos fabricados con polímero, en ciertas necesidades estructurales.

De acuerdo a las estadísticas las asociaciones y empresas dedicadas a la fabricación de los materiales compuestos han clasificado sus productos en los siguientes mercados:

MERCADO	VENTAS (%)
Aeroespacial-aviación	0.6
Equipos para dispositivos y aparatos	5.5
Construcción	20.8
Productos de consumo	6.3
Equipo anticorrosión	11.8
Eléctrico-electrónico	10.0
Marítimo	10.1
Transportación	31.6
Otros	3.3
TOTAL	100.0

Tabla 1.1.- Clasificación del mercado de los materiales compuestos.

Fuente: SPI Composites Institute, Mayo 1999

1.2.- El polímero y su utilización en México.

En nuestro país la utilización de los materiales compuestos en el sector de la construcción ha sido en términos generales muy baja, debido a diferentes factores, uno de ellos es el desconocimiento de las propiedades y ventajas que ofrece este material sobre los materiales convencionales.

Aunque el avance tecnológico que se tiene en nuestro país en el área de la química es alto en comparación con los demás países, sólo se fabrican productos que son más usuales en la población, faltaría darle un giro para voltear a ver otras áreas del sector productivo, donde se encuentra el sector de la construcción que bien podría significar un mercado potencial para la venta y utilización de los materiales de polímero.

La introducción de los materiales compuestos (polímeros reforzados con fibras) a nuestro país se produce a principios de 1998 y desde esa fecha ha tenido una buena aceptación para su utilización en las diferentes áreas de la industria, incluida la de la construcción. Su aplicación ha sido más notoria en el área de rehabilitación y reforzamiento de estructuras de concreto.

El desarrollo e implementación de nuevas tecnologías representa una alternativa que probablemente proporcionará mayores oportunidades en el campo de la ingeniería civil.

Existen hasta la fecha tres grandes empresas transnacionales ubicadas en México que manejan y distribuyen este material y que han contribuido de manera importante en el área de la construcción con sus productos.

Masters Builders Technologies (MBT) México inició trabajos en el área de los compuestos en 1998 con la inclusión de láminas de fibra de carbono con un sistema llamado "MBrace" de adherencia externa. Además participó en la rehabilitación de dos columnas de concreto en un restaurante. Actualmente esta empresa desarrolla una tecnología enfocada a las barras fabricadas de polímero reforzado con fibras con la colaboración de la empresa Norteamericana Hughes Brothers.

Otra de las empresas que se dedica a la utilización de estos productos es Sika Mexicana que cuenta con los sistemas Sika Carbodur y SikaWrap; en el primero se encuentran las tiras o platinas que consisten en fibras de carbono, en el segundo son fibras de vidrio y también de carbono donde se encuentran los tejidos y se aplican en forma seca o húmeda.

Además se encuentra la empresa Freyssenet México, que su ramo es el rehabilitamiento y/o reparación con el sistema de adhesión externa con fibra de carbono, esta empresa trabaja en conjunto con el despacho de Ingeniería Estructural Euroestudios. Han realizado trabajos de reforzamiento del puente Pozuelos en la carretera México-Acapulco, reforzamiento del tablero del puente Peñon-Textoco entre otros.

PROPIETARIO	LUGAR	FECHA	ELEMENTO	AREA (m ²)	DEFICIENCIA	DESCRIPCIÓN
Restaurante	Cd de México	Feb 98	Columna de concreto	3 08	Confinamiento	Reforzamiento de 2 columnas
Mercado de La Merced	Cd de México	1999	Losas	20	Confinamiento	Reforzamiento de losas a flexión del acero superior, después de incendio.
CAPUFE	Puente Polotitlan	Mar 99	Losa	109	Flexión	Reforzamiento a flexión en determinadas áreas del puente.
Bancomer	Cd de México	Jun 99	Viga	5 6	Cortante	Reforzamiento a cortante de la viga.
Médica Sur	Cd de México	Jun 99	Viga	11 63	Flexión	Reforzamiento de una viga a flexión.
Hipódromo de las Américas	Cd. de México	Jul 99	Columna de concreto	15 82	Confinamiento	4 columnas en gradas de la pista de carreras.

PROPIETARIO	LUGAR	FECHA	ELEMENTO	AREA (m ²)	DEFICIENCIA	DESCRIPCIÓN
Embajada de EUA en México	Cd. de México	Jul 99	Viga	4.24	Flexión	Reforzamiento de una viga a flexión
Cushman & Wakefield/GCI	Cd. de México	Jul 99	Viga	3.4	Flexión	Reforzamiento de una viga.
Hospital San Alejandro Sabritas	Puebla, Puebla	Dic 99	Columna de concreto	19	Restauración	Reforzamiento de la sección superior de las columnas después del sismo.
	Onzaba, Veracruz	Abr 2000	Muro de concreto y viga	96.25	Flexión y servicialidad	Reparación de un muro en un tanque de tratamiento de aguas residuales y de una viga
CAPUFE	Puerto Ocotlan	2000	Viga ASIFITTO	—	Flexión	
Plaza de las Américas	Cancun, Qroo	2000	Columnas de concreto	—	Confinamiento	
Mueblería	Cd. Obregón, Sonora	2000	Columnas de concreto	—	Confinamiento	
Puente "La Quebrada"	Acapulco, Gro	2002	Vigas	—	Flexión	

Tabla I.2.- Trabajos realizados en México por MBT.

Fuente: MBT Mexico, 2002

PROYECTO	LUGAR	PROBLEMA	SOLUCIÓN
Templo	Querétaro	Insuficiencia de resistencia a flexión en traves	Reforzamiento con Sika Carbodur 5S12
Puente	Michoacán	Insuficiencia de refuerzo a flexión en traves	Reforzamiento con Sika Carbodur 10S12
Edificio oficinas	Cd. de México	Baja resistencia sísmica en columnas	Reforzamiento con SikaWrap Hex 103C para lograr un incremento de resistencia por confinamiento
Edificio de usos múltiples	Cd. de México	Agnatamiento de traves e insuficiencia de resistencia sísmica	Reforzamiento con Sika Carbodur 5S12 y SikaWrap Hex 103C
Estacionamiento	Monterrey, Nuevo León	Acero de refuerzo insuficiente en zonas de momento negativo en losas de entrepiso	Reforzamiento con placa Sika Carbodur 5S12 y 10S12
Viviendas de interés social	Texcoco, Edo. Méx.	Acero insuficiente en losas de entrepiso y azotea de 60 viviendas	Reforzamiento con placa Sika Carbodur 5S12, 8S12 y 10S12 en tiras de 4 y 5 cm. de ancho

Tabla I.3.- Trabajos realizados en México por Sika Mexicana.

Fuente: Sika Mexicana, 2002

La situación que prevalece en varios países de Latinoamérica es parecida a la de México, respecto a la utilización de los productos de materiales compuestos. En Sudamérica el país que presenta una ligera ventaja en la aplicación de estos materiales es Colombia, ya que las estadísticas registran un mayor número de proyectos realizados en este país con compuestos de polímero, sobre todo en el reforzamiento y rehabilitación de estructuras de concreto. En la tabla siguiente se muestran algunas de las obras realizadas en los países de Sudamérica:

AÑO	PAIS	LOCALIZACION	OBRA	TIPO DE REFUERZO	CANTIDAD (m)
1996	Colombia	Puente Cocomá, Antioquia	Reforzamiento de los claros y voladizos de concreto reforzado por sobrecarga	Tiras PRFC	183
1996	Colombia	Puente Consuelo, Purificación-Tolima	Reforzamiento de las vigas longitudinales de concreto por sobrecarga	Tiras PRFC	55
1997	Colombia	Puente Caracas, Bogotá	Reforzamiento a flexión de vigas postensadas por sobrecarga	Tiras PRFC	484
1997	Colombia	Edificio de Enfermería de la Universidad Nacional, Bogotá	Reforzamiento de vigas de concreto por modificación de la estructura	Tiras PRFC	52
1998	Bolivia	Edificio Cervecería Boliviana Nacional	Reforzamiento a flexión de losa por incremento de carga de servicio	Tiras PRFC	80
1998	Bolivia	Central Eléctrica, Valle Hermoso	Reforzamiento a flexión de losa	Tiras PRFC	100
1998	Colombia	Puente Sotaman, Bogotá	Reforzamiento a flexión de vigas por sobrecarga	Tiras PRFC	54
1998	Colombia	Centro Comercial, Barranquilla	Reforzamiento de viguetas de losa de concreto por deficiencia de refuerzo	Tiras PRFC	652
1998	Colombia	Edificio Morros, Cartagena	Reforzamiento de losa y vigas por aumento de carga debido a colocación de piscina sobre la losa	Tiras PRFC	84
1998	Colombia	Puente Coquitos, Magdalena	Reforzamiento de vigas a flexión	Tiras PRFC	234
1998	Colombia	Edificio Comcel, Bogotá	Reforzamiento de vigas por acción sísmica	Tiras PRFC	185
1998	Colombia	Centro Polifuncional San Gil, Barranquilla	Reforzamiento a flexión de soporte de gradas por deficiencia de refuerzo	Tiras PRFC	84
1999	Colombia	Universidad Popular César, Valledupar	Reforzamiento de flexión de vigas por deficiencia de refuerzo	Tiras PRFC	68
1999	Colombia	Edificio Planta Procaps	Reforzamiento a flexión de viguetas	Tiras PRFC	216
1998	Chile	Universidad del Bio, Biblioteca Central	Reforzamiento de vigas y losas	Tiras PRFC	230
1997	Panamá	Edificio Hong Kong Bank, Panamá	Reforzamiento a flexión de losa reticular de concreto reforzado	Tiras PRFC	238
1997	Perú	Puente Aguaytillo	Reforzamiento a flexión de vigas longitudinales	Tiras PRFC	140
1997	Perú	Centro Comercial Jockey, Lima	Reforzamiento a flexión de losa postensada	Tiras PRFC	700
1997	Perú	Puente Huipoca	Reforzamiento a flexión de vigas longitudinales	Tiras PRFC	140
1997	Perú	Cementos Lima	Reforzamiento a cortante de vigas de estructura de soporte de silos	Tiras PRFC	100
1999	Uruguay	Conjunto de viviendas, San José	Refuerzo de cimentación por armadura insuficiente	Tiras PRFC	11
1999	Uruguay	Edificio Rambia, Montevideo	Refuerzo de losa enervada afectada por fuego	Tiras PRFC	18

Tabla I.4.- Trabajos realizados en Latinoamérica por Sika Colombia hasta el 2000.
Fuente: Sika Colombia, 2000

1.2.1.- Definición.

El polímero o material compuesto es conocido comúnmente como plástico, éste puede estar reforzado con fibras o sin reforzar; el primero contiene solamente resinas y aditivos, en contraste los componentes del polímero reforzado son además de la resina, el refuerzo (fibras) y aditivos. Entre los reforzados podemos encontrar las carrocerías de camiones, cascos de botes, paneles, etc, mientras que en los polímeros simples (sin reforzar) se encuentran los envases de refrescos, vasos desechables, plafones de unice!, etc.. Los aditivos y materiales de relleno son usados en el proceso de manufacturación para dar propiedades especiales, color y acabado final de la pieza.

Químicamente un polímero se define como una gran cadena molecular de una o más unidades repetidas de átomos unidos por un covalente fuerte.

Por su composición química los materiales compuestos se diferencian en termoplásticos y termofijos; los primeros como el Nylon, policarbonato, poliestireno, etc..., poseen la característica de ablandarse a temperaturas elevadas, por lo que pueden fundirse varias veces hasta adquirir la forma del molde en donde se enfriarán finalmente, éstos además son colocados en bajas viscosidades en estado líquido durante el proceso de fabricación, mientras que los termofijos (Epoxi, Vinilester, etc.) como su nombre lo indica, una vez que se ha llevado a cabo la reacción de polimerización o curado de la resina el cambio del estado líquido al sólido es ya permanente.

Los productos más utilizados en la construcción son los plásticos reforzados con fibras (PRF); la resina es el pegamento (cementante) que mantiene unido al compuesto y proporciona las propiedades de acabado del producto final, con propiedades físicas y mecánicas inferiores a la de una resina reforzada con fibras. El refuerzo (fibra) provee el esfuerzo mecánico, aumentando con esto las propiedades estructurales del elemento.

Para alcanzar las propiedades mecánicas y composición de los materiales de polímero deseadas, se tienen que cumplir con todos los procesos de calidad durante su manufacturación. La cantidad y calidad de los materiales seleccionados, además del proceso de fabricación afectan a las propiedades mecánicas. En la siguiente figura se muestra la composición de un elemento microscópico

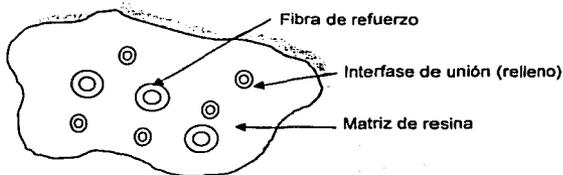


Figura 1.1.- Estructura de un material compuesto a nivel micro-mecánico.

Fuente: SPI Composites Institute, 1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las resinas (plásticos) que son más usadas en la industria química para la fabricación de diferentes productos poliméricos son:

- ✓ Resina-Poliéster
- ✓ Resina Epóxica
- ✓ Resina Viniléster
- ✓ Resina Fenólica
- ✓ Poliuretano

Los refuerzos que se emplean comúnmente en los polímeros son los siguientes:

- ✓ Fibra de vidrio
- ✓ Fibra de carbono
- ✓ Fibra de aramida

La combinación de estos dos elementos (resina y fibra) forman el polímero reforzado con fibras (PRF). De acuerdo a las necesidades estructurales de un proyecto, se pueden fabricar diversos elementos con características físicas y mecánicas particulares.

Las matrices poliméricas reforzadas combinan la resistencia mecánica y la rigidez de las fibras reforzantes (por ejemplo fibra de vidrio o de carbono), con la buena resistencia al impacto proporcionada por la matriz plástica original.

Las fibras por sí solas, generalmente son muy frágiles y sus propiedades de resistencia y rigidez no pueden ser aprovechadas completamente. La matriz protege estas fibras y les transfiere la carga, esto origina un material que combina una resistencia mecánica mejor, mayor rigidez y resistencia estructural satisfactoria que la de la matriz original.

El desempeño de los plásticos reforzados con fibras es muy superior al de los no reforzados.

Para comprender mejor estos conceptos a continuación se presenta una tabla, donde se muestran los elementos y las características de los polímeros simples y las que adquieren cuando se les adiciona una fibra de refuerzo:

POLÍMERO SIMPLE (RESINA)	POLÍMERO REFORZADO CON FIBRAS (PRF)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resistencia química ✓ Protección de las fibras ✓ Mantener consistencia ✓ Color 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Además de tener las propiedades de un polímero simple ✓ Soporte Estructural ✓ Resistencia mecánica

Tabla 1.5.- Comparación de las propiedades de un polímero simple contra uno reforzado.

Fuente: Vitrofibras S.A.

1.3.- Propiedades y ventajas.

En todo tipo de diseño de elementos estructurales, es muy importante tener el conocimiento de las propiedades que poseen los materiales que formarán parte de dicho elemento. Los materiales compuestos como son las barras, tendones, placas y láminas al igual que los materiales tradicionales cuentan con altas propiedades mecánicas y que también son afectadas por los diversos factores que alteran el comportamiento estructural del elemento.

I.3.1.- Propiedades Mecánicas.

Las propiedades físicas y mecánicas de un material son la parte más importante para el Ingeniero Estructurista, ya que de esto, dependerán las dimensiones y cantidad de material a utilizar para obtener un elemento con comportamiento dúctil. En las siguientes tablas se muestran las diferentes propiedades que poseen algunos materiales compuestos:

RESINA	RESISTENCIA A TENSION (kg/cm ²)	MÓDULO DE TENSION (kg/cm ²)	ELONGACIÓN A LA FALLA (%)	RESISTENCIA A LA FLEXION (kg/cm ²)	MÓDULO A FLEXION (kg/cm ²)	TEMPERATURA DE DISTORSION (°C)
Isopropiléster	802	33752	2.9	1'280	35'159	109
Viniléster						
980-35	894	33'752	4.2	1'526	34'466	133
D-1618	914	32'344	5.2	1'526	34'466	119
D-1222	809	33'058	3.9	1'160	37'771	141

Tabla 1.6.- Propiedades mecánicas de resinas netas (sin refuerzo).

Fuente: Ashland Chemical Inc., 1993

FIBRA	DENSIDAD (Um ³)	RESISTENCIA A TENSION (kg/cm ²)	MÓDULO A TENSION (kg/cm ²)
Vidrio E	2.54	35'190	7'38'480
Vidrio S-2	2.48	43'656	877'200
Vidrio ECR	2.68	36'975	739'500
Aramida K-49	1.44	36'924	1'338'200
Carbono AS4	1.80	38'658	2'388'800

Tabla 1.7.- Propiedades de las fibras en forma natural.

Fuente: Owens Corning Corp 1993

FIBRA	DIÁMETRO (Micrones)	DENSIDAD (Um ³)	MÓDULO DE TENSION (kg/cm ²)	RESISTENCIA A TENSION (kg/cm ²)	DEFORMACION A LA FALLA (%)	COEF. DE EXPANSION TERMICA (10 ⁻⁶ /°C)
VIDRIO						
Vidrio E	10	2.54	738'480	35'190	4.8	5
Vidrio S-2	10	2.48	886'380	43'656	5.0	2.9
CARBONO						
T-300	7	1.76	2'356'200	37'230	1.4	-0.1 a -0.5 longitudinal 7 a 12 radial
AS	7	1.77	2'244'000	31'620	1.2	-0.5 a -1.2 longitudinal 7 a 12 radial
I-40	6	1.81	2'815'200	57'630	2.0	-
HSB	7	1.85	3'513'900	23'868	0.6	-
Fortafil 3	7	1.80	2'315'400	38'760	1.7	-0.1
Fortafil 5	7	1.80	3'519'000	28'152	0.8	-
P-555	10	2.00	3'876'000	19'380	0.5	-0.9
P-100	10	2.16	7'731'600	24'582	0.3	longitudinal +1.6
ARAMIDA						
Kevlar 49	11.9	1.45	13'336'200	36'924	2.0	longitudinal -2.0 longitudinal +59 radial
Twaron1055	12.0	1.45	1'295'400	36'720	2.5	-2.0 longitudinal +59 radial

Tabla 1.8.- Propiedades típicas de las fibras de refuerzo comerciales.

Fuente: Akzo-Nobel, 1994

RELACION CARBONO/VIDRIO (%)	DENSIDAD (t/m ³)	RESISTENCIA A TENSION (kg/cm ²)	MÓDULO DE ELASTICIDAD A TENSION (kg/cm ²)	RESISTENCIA A FLEXION (kg/cm ²)	MÓDULO DE FLEXION (kg/cm ²)	RESISTENCIA A CORTANTE (kg/cm ²)
0-100	1.91	6'168	409'020	9'635	361'080	668
25-75	1.85	6'540	651'780	10'830	646'680	760
50-50	1.80	7'033	913'920	12'448	801'720	773
75-25	1.66	8'228	1'258'680	12'869	843'540	843

Tabla 1.9.- Propiedades de compuestos híbridos de Carbono/Vidrio- Poliéster

Fuente: Composite Materials Handbook, Schwartz M., 1992

* El contenido de fibra es por volumen. La resina (poliéster termofijo) representa 48% más un 52% de las fibras continuas orientadas unidireccionalmente, esto equivale a 30% de resina y 70% de fibra por peso, ya que la resina tiene menor densidad. Estas propiedades aplican sólo en la dirección de la fibra.

1.3.2.- Ventajas.

Las características principales de la fibra, que la hacen tan atractiva como refuerzo de los plásticos son las siguientes:

- ✓ Bajo coeficiente de dilatación térmica
- ✓ Elevadas propiedades mecánicas
- ✓ Retención de las propiedades mecánicas aún a elevadas temperaturas
- ✓ Facilidad de procesamiento
- ✓ Bajo costo en mantenimiento

El aumento de las propiedades mecánicas, sobre todo a temperaturas muy elevadas, es muy significativo. También es muy importante el aumento de la resistencia al impacto y la reducción del coeficiente de dilatación térmica que es resultado de la incorporación de la fibra.

Además poseen ventajas tales como la resistencia a la corrosión, flexibilidad en el diseño de elementos, algunas de éstas se enlistan a continuación:

a).- Elevadas propiedades mecánicas.

Tienen una alta resistencia a la compresión, flexión e impacto y son muy utilizados en aplicaciones estructurales.

b).- Bajo peso específico.

Los productos de polímero tienen un peso específico muy bajo, teniendo con esto una reducción del peso total del elemento.

c).- Alta rigidez dieléctrica.

Los materiales compuestos son excelentes aislantes de energía eléctrica, por lo que comúnmente son utilizados para aislar diversos elementos estructurales, sobre todo en la industria eléctrica.

d).- Flexibilidad de diseño.

Estos materiales permiten una amplia flexibilidad de diseño, haciendo posible el moldeo de piezas complejas en su geometría, grandes o pequeñas, sin uniones, tornillos o remaches y con un gran valor funcional estético.

e).- Estabilidad dimensional.

Las piezas de polímero mantienen inalteradas sus formas y dimensiones en condiciones extremas de uso. Su bajo coeficiente de dilatación térmica aunado a la reducida absorción de agua permiten su utilización en combinación con piezas metálicas en aplicaciones sujetas a grandes variaciones de temperatura y humedad.

f).- Resistencia a la corrosión.

Los elementos de polímero no se oxidan y poseen una resistencia excepcional a los ambientes muy agresivos. Es una propiedad de suma importancia debido a que existen lugares donde se necesita que la estructura no sufra daños por corrosión como sucede con los metales.

g).- Bajo costo de producción y acabado.

Los moldes son sencillos y económicos lo que hace factible la comercialización de partes considerables, con bajos volúmenes de producción. Se puede fácilmente, realizar modificaciones de diseño en los moldes de producción, lo cual evita la construcción de moldes nuevos. Los productos de polímero son moldeados con el color deseado o con Gel Coat que es un aditivo, ahorrando la pintura de acabado.

h).- Bajo costo de mantenimiento.

Los materiales compuestos presentan un costo de mantenimiento muy bajo, debido a su buena resistencia a la intemperie, que es inherente a este material.

i).- Durabilidad.

Una de las propiedades de gran importancia es la durabilidad de los materiales a emplear en la construcción de una obra. Esta puede ser definida como la capacidad a resistir el agrietamiento, oxidación, degradación química, deterioro por causa de las condiciones ambientales existentes para un período específico de tiempo (vida útil).

La industria química ha desarrollado una base de datos comprensiva acerca de la durabilidad de los compuestos, los datos son de materiales y productos usados en la infraestructura civil pública así como en proyectos relevantes. Por lo general, en las aplicaciones que están en contacto directo con el agua, soluciones alcalinas y químicas agresivas se utiliza una protección contra la humedad.

Este concepto depende principalmente de la calidad de su superficie en exposición. En consecuencia, es necesario proteger esta superficie y en particular cualquier fibra expuesta que puede ser atacada por la humedad.

1.4.- Características y funciones de los componentes.

Es fundamental para el Ingeniero Estructurista el conocimiento completo del comportamiento de un elemento para su adecuado diseño, de acuerdo a los requerimientos y necesidades a los cuales estará sometido dicho elemento. Más adelante se detallan las características y funciones que desempeñan los componentes dentro de un material compuesto.

Algunos tipos de refuerzo independientemente del material, se encuentran disponibles en formas prefabricadas para su utilización o fabricación de un compuesto, con sólo adicionarle la resina; estos satisfacen una gran gama de procedimientos y requerimientos de producto final. Los refuerzos prefabricados más comunes en el mercado son: hilo itinerante, colchonetas, telas trenzadas, tejido 3D y tapetes cortados y continuos o tapetes cortados o termoformables.

Existen además otros productos que pueden ser utilizados de forma simple o en combinación con otros materiales. Estos elementos han sido empleados en diferentes estructuras con resultados satisfactorios. Algunos de estos productos se enlistan a continuación:

- ✓ Materiales Centrales para Estructura Sándwich
- ✓ Barras y tendones
- ✓ Láminas y tiras (platinas)

En el caso de materiales sándwich son materiales relativamente delgados, sus partes se encuentran adheridas a una más delgada y los materiales centrales son muy ligeros, esto ha permitido construir estructuras rígidas, ligeras y durables. Las hojas de la superficie exterior puede ser de cualquier material, en el mercado los más comunes son de vidrio y de carbono, esto por su bajo costo. Los materiales del núcleo más comunes son hule-espuma, espuma, panal (honeycomb) y madera balsa, éste último muy resistente a la corrosión.

Las barras y tendones son productos que poseen excelentes propiedades tanto mecánicas como químicas, en general estos materiales son empleados como refuerzos, tanto en compuestos de materiales plásticos como refuerzo en estructuras de concreto. Estos materiales alcanzan su resistencia última a tensión sin exhibir ninguna fluencia, su debilidad es el esfuerzo a compresión.

Las láminas y tiras fabricadas con materiales compuestos, son productos que se han aplicado de forma más frecuente; el proceso de manufacturación se realiza apilando varias capas delgadas de fibras y de una resina con el espesor de acuerdo a los requerimientos de proyecto. Estos productos pueden estar conformados por varios tipos de refuerzo de fibra, que comúnmente en la presentación comercial están hechos a base de colchonetas y telas. Son excelentes elementos para absorber los esfuerzos de tensión en comparación con el acero.

1.4.1.- Resinas.

La resina o también llamada "matriz", químicamente es un compuesto orgánico de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes materiales de base.

La resina actúa como cementante para mantener las fibras unidas y proteger a las mismas de posibles daños ambientales y mecánicos. La función principal de la resina es transferir la carga entre las fibras de refuerzo; de acuerdo a la fabricación y tratamiento final estas se dividen en dos grandes grupos conocidos como plásticos "termofijos" y "termoplásticos".

Los polímeros termoplásticos son aquellos que se funden o plastifican con un incremento de temperatura. Las macromoléculas que conforman la resina pueden estar unidas entre sí, mediante fuerzas de diferente intensidad; así cuando sean de baja intensidad, se pueden separar con un simple calentamiento, dando lugar al plástico fundido. En este grupo se encuentran las siguientes resinas: policloruro de vinilo, copolímeros de estireno, polietileno, polipropileno, poliestireno, poliaramida, nylon, entre otros.

Los polímeros termofijos son aquellos que después de fundición, aunque sean sometidos a temperaturas elevadas ya no es posible su retroceso al estado líquido, estos permanecen sólidos indefinidamente. En este grupo están las resinas: epoxi, viniléster, poliéster, fenólica, poliimidaz, polieteramida, etc.

a).- Resina Poliéster.

Esta resina se considera como el pilar de la industria de los compuestos y representa aproximadamente el 75% de las resinas que actualmente son utilizadas en este ramo. El poliéster es elaborado con la polimerización condensada de ácidos dicarboxílicos y alcoholes difuncionales (glicoles). Los poliéster se clasifican en clases dependiendo de su estructura básica, es decir, de acuerdo a los arreglos químicos a emplear. Además, existe otra clasificación de las resinas poliéster de acuerdo a las aplicaciones de uso final, a esta clasificación se le conoce como "Propósito General", que define principalmente al producto terminado como relativamente de bajo costo.

Debido a que los poliéster pueden ser tratados químicamente con diferentes procesos para cumplir con los requerimientos de aplicación, en el mercado se encuentra disponible un gran número de poliéster especiales, estos son: poliéster flexibilizados, de grado eléctrico, de resistencia a la corrosión, de resistencia al calor, retardante de fuego y translúcidos.

b).- Resina Epóxica.

La mayor aplicación de este tipo de resina se concentra en la reparación de estructuras de concreto y estructuras pequeñas, ya que con la flexibilidad que presenta permite construir productos con diversos niveles de perfil. Las resinas epóxicas son empleadas principalmente para la fabricación de compuestos de alta resistencia con propiedades mecánicas superiores, resistencia a los líquidos corrosivos y ambientales, poseen excelentes propiedades eléctricas y un adecuado desempeño a temperaturas elevadas. Adicionalmente proporcionan una buena resistencia a los rayos ultravioleta.

Las resinas epóxicas son usadas frecuentemente con un gran número de fibras de refuerzo, incluyendo vidrio, carbono y aramida. Las fibras que más se emplean con esta resina son las de vidrio, debido a que la inclusión de fibras de carbono y aramida representan un alto costo de fabricación.

c).- Resinas Viniléster.

Estas son producidas por resinas epóxicas reactivas con acrílico o ácido metacrílico. El material resultante es disuelto posteriormente en estireno para alcanzar un líquido que es muy similar a la resina poliéster; éstas también ofrecen un buen comportamiento mecánico y excelente resistencia a la corrosión.

d).- Resinas Fenólicas.

Estas resinas pertenecen al grupo de los plásticos termofijos y son comúnmente elaborados con fenol (ácido carbólico) y formaldehído. Los compuestos fenólicos poseen muchas propiedades deseables como resistencia a altas temperaturas, resistencia a la degradación, excelente aislamiento térmico, resistencia a la corrosión y propiedades aceptables contra el fuego y baja emisión de humos tóxicos. Regularmente se emplean como pegamento en la unión de cimbras, sólo por nombrar alguna aplicación.

e).- Poliuretano.

El poliuretano es una resina que se produce en diferentes variedades y formas, su elaboración está basada fundamentalmente en la reacción exotérmica de un polisocianato con un polyols (alcohol especial). La gran versatilidad del poliuretano permite diseñar una resina con propiedades particulares de aplicación.

El poliuretano se emplea en recubrimientos, como adhesivo o espuma, cuando se utiliza como recubrimiento en acabados exteriores e interiores, éste es duro, flexible, resistente a químicos y de rápido curado. Otro tipo de poliuretano como el elastómero, su aplicación se centra en la fabricación de llantas y aislantes.

1.4.2.- Fibras

El refuerzo de fibra realiza las funciones del acero en un elemento de concreto, recibe la carga y la distribuye longitudinalmente a lo largo de la misma fibra para dar resistencia y rigidez a la estructura. El refuerzo puede ser orientado para dar las propiedades requeridas en la dirección de la carga, éstos pueden ser artificiales o naturales; dentro de los naturales se encuentra la celulosa de madera, pero son más usados los artificiales. De los artificiales más utilizados hasta la fecha es la fibra de vidrio y en menor escala, la fibra de carbono, aramida, polietileno (de muy alto peso molecular), polipropileno, poliéster y nylon. Se están desarrollando actualmente refuerzos más especializados para altas resistencias y altas temperaturas, éstos se fabrican con metales y óxidos de metales como los usados para la industria aeronáutica y espacial.

A la mayoría de los refuerzos se les da un tratamiento de acabado tanto en la fabricación de la misma fibra como en los procesos de inclusión en las resinas.

a).- Fibras de vidrio.

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de productos de polímero, sobre todo en aplicaciones industriales, esto se debe a su moldeabilidad, excelentes características mecánicas y bajo costo.

El vidrio es considerado generalmente una fibra de excelente resistencia al impacto, pero con la desventaja de que posee un peso específico mayor que el carbono y la aramida. Las fibras de vidrio usualmente se producen en diámetros que van de 0.009 a los 0.023 mm. Son fabricadas a altas velocidades (a 320 km/h aproximadamente), introducidas a través de pequeños orificios

en donde se establece el diámetro y son a la vez calentadas eléctricamente. Después de pasar por los orificios se van formando filamentos individuales que posteriormente son recubiertos por un cementante químico para protegerlos y aumentar las propiedades del compuesto.

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estos materiales. En la práctica los vidrios más utilizados son aquellos que tienen como base el sílice en disolución con 2 silicatos, uno alcalino y otro alcalinotérreo.

Posee una alta adherencia de sus componentes principales (fibra-resina). Alta resistencia mecánica a la tensión que es superior a la del acero. Es excelente aislante eléctrico, incluso en espesores reducidos. Es permeable a las ondas electromagnéticas. Cuenta con la propiedad de ser inflamable, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad. Tiene buena estabilidad dimensional, es decir no varía geoméricamente con la temperatura, debido a que cuenta con un bajo coeficiente de dilatación. Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos, ya que se ha comprobado que no sufre ninguna alteración ante el ataque de estos animales. Ofrece una adecuada adherencia con el concreto. Bajo costo de fabricación.

b).- Fibra de carbono.

El refuerzo elaborado con esta fibra tiene diferentes presentaciones, que van desde filamentos continuos de hilos estirados hasta fibras cortadas y tapetes. Los refuerzos continuos unidireccionales proporcionan el alto módulo de flexión y alta resistencia. Las fibras de carbono son más costosas que las de vidrio.

Los compuestos de fibra de carbono son más frágiles, es decir que presentan menor deformación antes de colapsarse que la fibra de vidrio y aramida. Las fibras de carbono pueden causar corrosión galvánica cuando son usadas cerca de los metales; para evitar este fenómeno se recomienda utilizar una protección puede ser de vidrio o resina. Las fibras de carbono se fabrican utilizando poliacrilonitrilo (PAN), precursores de la brea y las fibras de rayón.

c).- Fibras de aramida (poliamidas).

Estas son fibras de origen orgánico y sintético, se obtienen por hilado de poliamidas aromáticas. Este tipo de fibra se fabrica por procesos de extrusión e hilado y a partir de esto se clasifican en fibras de bajo módulo ($E = 714 \text{ kg/cm}^2$) y de alto módulo ($E = 1326 \text{ kg/cm}^2$). Los compuestos elaborados con estas fibras son considerados de altas propiedades, ya que sus características son muy elevadas, especialmente la resistencia al impacto. Su punto débil es la resistencia a la compresión. Comercialmente se dividen en continua y discontinua; en la primera están las "mechas", los rovings y los tejidos, los tejidos son la principal forma utilizada en materiales compuestos con fibra de aramida; mientras que en la segunda se encuentran los "mats", "fieltros", "pulp" y "nomex".

Su utilización se centra principalmente en la fabricación de cables, sistemas balísticos y de armamento y estructuras sándwich.

Las fibras de aramida tienen una alta resistencia al impacto y a la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico con excepción de ácidos fuertes y bases de altas concentraciones. Para minimizar el problema de la fotodegradación, se puede emplear un recubrimiento con algún material absorbente de luz.

Estas fibras presentan una elevada resistencia a la tensión, debido a su alto grado de cristalinidad, es decir que sus cadenas moleculares están alineadas y rígidas con uniones de hidrógeno. Es 5 veces más resistente que el acero. Posee buena estabilidad mecánica en el rango térmico (-30 °C a 200 °C). Cuenta con alto módulo de elasticidad y una baja elongación a la falla. Son químicamente estables al ataque de ácidos y resistentes al fuego y autoextinguibles.

Presentan una baja resistencia a compresión y flexión a diferencia de las demás fibras que tienen valores similares para la resistencia a la compresión y tensión. La afectación de humedad puede provocar pérdidas de resistencia hasta de un 10%.

d).- Compuestos híbridos.

Este tipo de compuestos resulta de la combinación de dos fibras de refuerzo (por ejemplo vidrio-carbono o carbono-aramida). Constituyen un material de gran utilidad para el diseñador de estructuras de polímeros reforzados en aplicaciones aeronáuticas y de alta resistencia. En la fabricación de elementos para la infraestructura civil, cada vez se emplean más los híbridos de vidrio-carbono. Otro material híbrido resistente al impacto, a la fatiga y resistente estáticamente es el carbono-aramida. Tienen una desventaja en la manufacturación de las piezas ya que se eleva el costo.

1.4.3.- Materiales de relleno o "cargas".

En la industria de los materiales compuestos es frecuente encontrar productos incorporados al polímero reforzado (fibra-resina) para aportar al material características particulares o reducir el costo del mismo. La cantidad de productos añadidos es variable a las características finales requeridas del producto.

Las ventajas adquiridas al añadir la combinación de estos productos al polímero reforzado son las siguientes:

- ✓ Mejorar el acabado del producto (con colorantes y pigmentos fímes)
- ✓ Aligerar la pieza (con espumas sintéticas)
- ✓ Reducir el costo de fabricación
- ✓ Proporcionar agentes anti-retracción y anti-ultravioleta
- ✓ Mejorar el proceso de manufacturación

Además las cargas en su aplicación individual, introducen los siguientes efectos sobre las resinas:

- ✓ Aumentan la viscosidad de la mezcla
- ✓ Aumentan la densidad
- ✓ Aumentan el módulo de elasticidad a compresión
- ✓ Aumentan la dureza y estabilidad dimensional
- ✓ Reducen la resistencia a la tensión y a la flexión
- ✓ La resistencia a la compresión permanece invariable

Las cargas a su vez se dividen en dos grupos, reforzantes y no reforzantes, en las que se busca sobre todo la disminución del costo final del compuesto.

Entre las cargas reforzantes, las más utilizadas son las microesferas de vidrio, cuyo objetivo principal reside en su geometría que reparte regularmente los esfuerzos en las piezas, evitando con esto las concentraciones de tensiones; por el hecho de que las microesferas de vidrio presentan una mínima relación superficie/volumen, no afecta a la viscosidad de la resina y por ello se pueden incluir en porcentajes altos. Estas microesferas pueden ser huecas o macizas y su diámetro está comprendido generalmente entre 10 y 150 micras, con la facilidad de que pueden recibir un tratamiento para aumentar la adhesión con la resina.

Entre las cargas no reforzantes, las más utilizadas son en general de origen mineral y se incorporan a la resina en proporciones compatibles con las características y el precio para el producto final, por lo general el precio es bajo, debido a que son simplemente extractos de rocas o minerales.

1.4.4.- Aditivos.

Existe una amplia variedad de aditivos que son utilizados para modificar y mejorar las propiedades de los compuestos, y con ello tener un perfil flexible en el momento de su elaboración hasta el acabado. Las cantidades de aditivos suministrados a las resinas son siempre bajas en comparación a las cantidades de las cargas.

Algunas de las características y propiedades que poseen los aditivos son las siguientes:

- ✓ Resistencia al fuego: existen aditivos que son retardantes al fuego, que son los que contienen trióxido de antimonio, bromo, cloro y borato.
- ✓ Capacidad para expulsar el aire acumulado dentro del compuesto durante el proceso de manufacturado.
- ✓ Control de la viscosidad: estos aditivos facilitan el rociado y la dispersión de los materiales de relleno, teniendo como resultado una baja viscosidad en el compuesto.
- ✓ Dureza: esta propiedad se obtiene mediante la inclusión de un aditivo, que puede ser cierta-goma u otro material elastómero.
- ✓ Antioxidante: produce el retraso o inhibición de la oxidación del polímero y el deterioro de éste.
- ✓ Plastificante: con este aditivo se proporciona flexibilidad en la etapa de procesamiento y ofrece una gama de propiedades mecánicas y físicas.
- ✓ Estabilizador o absorbedor ultravioleta: este aditivo es especialmente utilizado para productos que estarán expuestos a los rayos solares, ya que previenen la pérdida de brillo, decoloración, cambios en las características eléctricas y la desintegración debido a la radiación ultravioleta. Este aditivo puede ser empleado en compuestos tanto termofijos como termoplásticos.

1.4.5.- Recubrimientos Gel.

El diseño y el color de los elementos de polímero son dos conceptos que están ligados estrechamente, igualmente sucede con la protección de la superficie. Normalmente los recubrimientos Gel Coats o capas superficiales de resina son suficientes para resolver la mayoría de los problemas presentados por los ataques del medio ambiente. Sin embargo cuando existen condiciones de abrasión o de altas temperaturas, lo más recomendable es incluir a la pieza un recubrimiento.

Estos recubrimientos se utilizan principalmente para tener un contacto directo con el molde y usualmente proporciona el acabado del producto, además funciona como protección que es resistente al ambiente y al desgaste y finalmente es el colorante que fijará el tono de la pieza.

Estructuralmente los recubrimientos no ofrecen ninguna resistencia, aunque poseen propiedades mínimas de elasticidad que son el módulo de flexión y la elongación, adicionalmente protegen al elemento de los rayos ultravioleta.

Su aplicación es ideal para la fabricación de piezas que en las especificaciones exijan una o varias de las siguientes características:

- ✓ Resistencia a los productos químicos
- ✓ Resistencia a la intemperie y a la humedad
- ✓ Resistencia al calor
- ✓ Resistencia a la abrasión
- ✓ Ausencia de porosidad en la superficie
- ✓ Calidad y estabilidad de color
- ✓ Brillo adecuado y permanente

1.5.- Factores que afectan a las propiedades mecánicas.

Como en la mayoría de los materiales para la construcción, las propiedades mecánicas suelen verse afectadas, por los diversos factores que presenta el medio ambiente. Generalmente los elementos estructurales son sometidos a pruebas en laboratorios para determinar sus capacidades frente a las diferentes condiciones ambientales.

a).-Fatiga.

La fatiga se define como el número total de ciclos de esfuerzos necesarios para llevar al elemento al colapso. Es un concepto de mucha importancia que se debe considerar en el diseño de estructuras.

Los factores que afectan a la vida de fatiga a los polímeros son varios, pero pueden resumirse en 3 categorías diferentes: los mecánicos, microestructurales y medioambientales. Los primeros comprenden la tensión aplicada y la concentración de esfuerzos. Los microestructurales tratan sobre todo la orientación de los componentes del elemento, es decir, la orientación de las fibras y los medioambientales, pueden considerarse como casos especiales de fatiga, incluyendo efectos térmicos.

b).- Humedad.

En los materiales compuestos la absorción excesiva de agua puede disminuir significativamente la resistencia y la rigidez. La absorción de agua produce cambios en las propiedades de las resinas, por lo que el elemento puede sufrir ensanchamiento y alabeo. Este fenómeno se puede reducir con la inclusión de aditivos.

Las características de absorción de humedad así como las propiedades de los materiales de polímeros, pueden cambiar cuando el material se expone a cambios ambientales, ya sea a cambios lentos durante períodos largos o rápidos en períodos cortos de tiempo. Sin embargo la relación entre los ciclos y el comportamiento mecánico no se entienden claramente todavía, actualmente se siguen desarrollando investigaciones a este respecto, para posteriormente tener un parámetro más exacto.

c).- Temperatura y fuego.

Existen varios compuestos que ofrecen un comportamiento adecuado en situaciones de temperaturas elevadas. Esto dependerá en gran magnitud de la selección y calidad de los materiales. El efecto del calor es más considerable en la resina que en la fibra. Las resinas contienen grandes cantidades de carbón e hidrógeno, los cuales son inflamables.

d).- Corrosión.

Las pruebas realizadas a los productos de polímero muestran que tienen gran resistencia a los ácidos, mientras que en situaciones de alcalinidad se presentan reducciones en sus propiedades. Por lo que se recomienda usar un recubrimiento para evitar este fenómeno que puede dañar considerablemente al elemento.

e).- Rayos Ultravioleta.

La presencia de rayos ultravioleta en la luz solar puede dañar a los materiales compuestos, ya que este tipo de rayos solares causan reacciones químicas en la matriz del polímero teniendo con esto una reducción en las propiedades.

1.6.- Procesos de Manufactura.

En la fabricación de los productos de polímero, existe una gran variedad de procesos, que son eficientes y algunos de bajo costo. Cada proceso tiene la característica que define el tipo de producto a fabricar. En el siguiente listado se detallan a grandes rasgos los procesos más comunes:

a).- Pultrusión.

Es un proceso de modelado continuo que combina las fibras de refuerzo y resina termofija. Es empleado en la fabricación de compuestos que tiene una sección transversal constante, por ejemplo barras, escalerillas de trenes, vigas y viguetas, sólo por mencionar algunos.

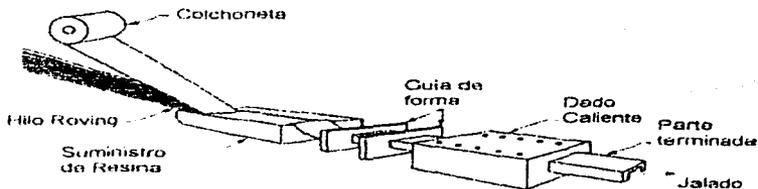


Figura 1.2.- Proceso de pultrusión.

b).- Moldeo por transferencia de resina.

Llamado también como proceso de molde cerrado en el cuál el material de refuerzo es colocado entre dos moldes (macho y hembra). El juego de moldes es cerrado y atomillado, posteriormente una resina de baja viscosidad es inyectada a bajas presiones (3.5 a 7.0 Kg/cm²) que pasa a llenar todos los huecos y humedecer toda la superficie de los materiales de refuerzo. El producto es curado por calor.

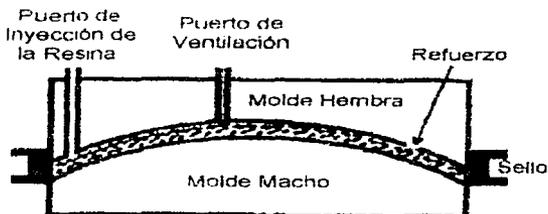


Figura 1.3.- Moldes empleados en el proceso Moldeo por transferencia de resina.

c).- Moldeo a mano.

Este método de fabricación consiste en que las capas de refuerzo son preimpregnadas o recubiertas de resina y colocadas en el molde a mano, después son curadas en la forma colocada. Los moldes pueden fabricarse de madera, láminas de metal y del mismo material de polímero. El capital de inversión es relativamente bajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

d).- Moldeo por compresión.

Este es el más común para moldear materiales termofijos. Esta técnica involucra materiales de compresión que contienen un catalizador activado por temperatura (175 a 200 °C) y un juego de cajas de metal usadas con una prensa vertical.

e).- Moldeo por rotación de filamentos.

Este proceso es usado en la fabricación de compuestos axisimétricos o tubulares, por lo general son tubos, conductos eléctricos o tanques. La inversión en este método es alto comparado con los procesos de molde abierto.



Figura 1.4.- Proceso por Rotación de Filamentos.

1.7.- Aplicaciones y usos.

Por la flexibilidad en su fabricación, los productos de polímero han sido utilizados en diferentes campos de la construcción, en tiempos remotos eran considerados como de la "era del espacio" por su uso en transbordadores espaciales y aviones. En nuestro país actualmente es el material que predomina en la industria automotriz

Como se mencionó anteriormente, en las aplicaciones de los materiales compuestos en la industria de la construcción los componentes principales son las fibras, que comúnmente son: las fibras de vidrio, de carbono y de aramida. Las resinas que envuelven a estos refuerzos generalmente son poliéster, epóxicos, viniléster, poliuretanos y fenólicos. Así mismo las formas de refuerzo tradicionales son las barras, las placas y platinas, colchonetas, telas y tejidos.

a).- Rellenos sanitarios.

En pro de la conservación del medio ambiente, las membranas de polietileno constituyen un elemento capaz de impermeabilizar rellenos sanitarios de basura, con lo que resulta imposible la filtración de contaminantes al subsuelo durante 5,000 años. La misma técnica es usada en lagos artificiales, cimientos y azoteas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto I.1.- Colocación de una membrana en un relleno sanitario (Vinmar de México).

b).- Tuberías de Gas.

Actualmente la Compañía "Gas Natural" está instalando tuberías de polietileno en la Ciudad de México porque tienen ventaja sobre las de metal, debido a que no sufren de oxidación ni de fisuras. Este tipo de ductos se han empleado en la Delegación Coyoacán, en sustitución de los de asbesto con concreto, material que con el paso del agua se desgasta considerablemente.

Una de las ventajas que ofrecen los tubos de polietileno es que son ligeros, se ha observado que entre dos personas pueden cargar un ducto, mientras que para hacerlo con uno de asbesto-cemento se necesita un montacargas.

c).- Carreteras.

Otros de los sectores beneficiados por los polímeros es el de la infraestructura, sobre todo en el ramo carretero, ya que su uso conlleva ahorros en tiempo y economía, así como resistencias cada vez mayores en las áreas de rodaje.

Con productos hechos a base de polipropileno es posible solucionar la destrucción provocada por el estancamiento de las aguas, lo que constituye uno de los más grandes problemas que aquejan a las carreteras: en el sistema de drenaje existente debajo de la pista, mediante un tejido se hace una estructura rellena de grava, la cual filtra el agua para, posteriormente, introducir en la caja un tubo perforado (que puede ser de polietileno) por donde drena el líquido.

El mismo material sintético, acompañado con superficies de poliéster y nylon, puede ser aplicado en las diversas superficies de la pista. Al añadir el geotextil a una capa de rodamiento es posible reducir la cantidad de asfalto, ya que es una estructura que le da mayor dimensión, y con este método se aumenta la capacidad de carga, por lo que la superficie adquiere mayor dureza, evitando el hundimiento del pavimento. En lugar de 8 cm de carpeta asfáltica, con estos materiales se aplican 4 o 5 cm. Se ahorra una cantidad importante de dinero al invertir 50 centavos de dólar por metro cuadrado.

La mayor cualidad de estos hilos delgados es que dan mayor resistencia a superficies de mucho uso. Además, el producto no se deteriora ni oxida, soporta el ciclo de hielo/deshielo, resiste los impactos y los ambientes alcalinos o ácidos, no absorbe la humedad y tiene un fácil manejo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

d).- Ganando terreno al mar.

Los polímeros también son utilizados en ingeniería costa afuera para ganarle terreno al mar. Actualmente se está empleando un material que consiste en bolsas de plástico a prueba de presiones altas, estas bolsas gigantes, rellenas de arena, constituyen una solución para controlar la erosión que provocan las olas, característica que las hace útiles en la construcción de islas artificiales, rompeolas y diques.

En el puerto de embarque situado entre Cancún e Isla Mujeres existe un muelle en el que será colocado un geotubo (bolsa de plástico) de 32 m de largo. Todo lo que está atrás formará una playa de un metro de profundidad. Con esto se evitará que las olas continúen arrastrando la arena. De hecho en Cancún y la Riviera Maya tienen este sistema.



Foto I.2.- Colocación de bolsas de plástico (geotubos) a la orilla del mar Riviera Maya, Estrategia en Ventas Industriales (EVI).

e).- Plataformas para puentes.

e.1).- Puentes vehiculares.

La mayoría de los sistemas de plataformas de polímero reforzado para puentes que se encuentran disponibles en el mercado están enfocadas a plataformas con claros considerables entre vigas. Estos claros son típicos en los pasos superiores o puentes en las carreteras que tienen plataformas de concreto y que necesitan reemplazo de las mismas. --

**SEBIS CON
FALLA DE ORIGEN**

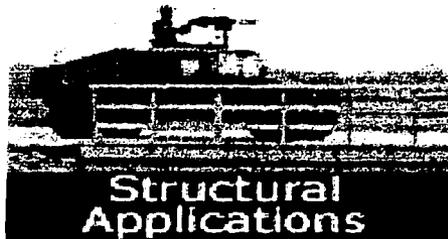


Foto 1.3.- Puente construido con materiales de polímero (Armada de los EUA).

f).- Puentes peatonales.

La tecnología de puentes peatonales con materiales compuestos dan al sistema que conforma el puente una relación resistencia-peso mayor que el acero, ofreciendo significativas ventajas en el diseño e instalación. Los sistemas de puentes incluyen perfiles estructurales como vigas, secciones de canal, ángulos y tubos. La empresa Tectonics Inc. ha desarrollado procedimientos y especificaciones para este tipo de estructuras que abarcan puentes peatonales, para bicicletas, vehículos ligeros y pasarelas.

g).- Sistemas de refuerzo externo.

Los procedimientos de rehabilitación mediante el refuerzo externo fueron desarrollados principalmente en Japón y Europa. Hoy en día existen más de 1000 puentes con vigas y losas de concreto que han sido reforzados con la adhesión de placas de polímero reforzado a las losas. Además esta aplicación se ha extendido a columnas en puentes, que han sido mejoradas sísmicamente con los mismos materiales. Los sistemas de polímero reforzado han sido utilizados también para estabilizar aberturas en muros de ladrillo y otro tipo de muros de mampostería ligera no reforzados. Los materiales compuestos han sido empleados también en la rehabilitación de estructuras circulares como chimeneas, tubos de diámetros considerables para abastecimiento de agua potable y alcantarillado y silos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto I.4.- Reforzamiento de silos con productos de polímero reforzado (Sika)



Foto I.5.- Reforzamiento de tanques con productos fabricados de polímero (Sika).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

h).- Otras aplicaciones de los polimeros.



Foto 1.6.- Instalación de pisos de polimero (Owens Corning, Co.)

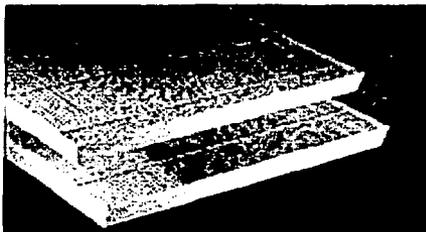


Foto 1.7.- Plataforma para muelle fabricada de polimero reforzado (Owens Corning, Co.).

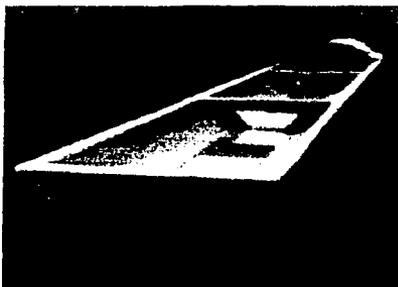


Foto 1.8.- Bebedero fabricado con polimero reforzado (Owens Corning, Co.).

HECHO CON
FALTA DE ORIGEN

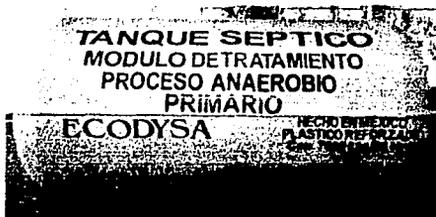


Foto I.9.- Tanque séptico fabricado con plástico reforzado (ECODYSA).



Foto I.10.- Colocación de un plástico impermeabilizante sobre un cajón de cimentación (Vinmar de México).

I.8.- Software de diseño.

En la actualidad ya se cuentan con diversos programas avanzados de computadora para diseñar elementos fabricados con materiales de polímero. Es importante señalar que para hacer uso de estos programas, se deben tener las bases y conocimiento fundamentales del diseño de materiales para su correcto funcionamiento.

El más utilizado por los fabricantes de materiales compuestos es el llamado S&P FRP Lamella que calcula los esfuerzos de placa de Polímero Reforzado con Fibras (PRF) para el rehabilitamiento o reforzamiento de elementos de concreto reforzado. Este programa proporciona las dimensiones de la sección transversal de la placa, área, tipo y resistencia, la información que solicita para su ejecución son datos de la barra de refuerzo, las cargas y propiedades del polímero a emplear.

Este programa sólo funciona para los códigos Eurocode 2 y British Estándar 8110.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

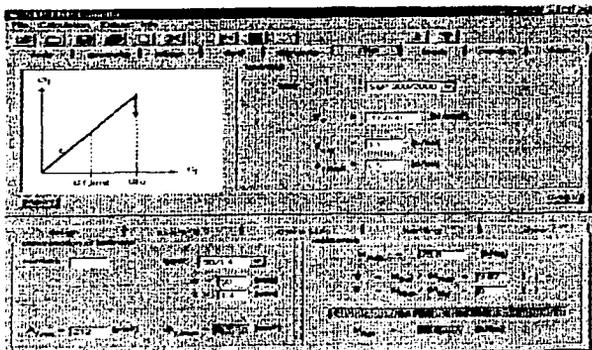


Figura 1.5.- Software de diseño para materiales de polímero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NORMAS Y CODIGOS UTILIZADOS

En la actualidad a nivel internacional existen varias instituciones profesionales dedicadas a la investigación y desarrollo de esta tecnología y que son las que emiten los métodos, reglamentos y especificaciones para el diseño de elementos estructurales para los materiales compuestos. En general deben cumplir con los requisitos establecidos para los materiales convencionales de construcción (concreto, acero, aluminio y madera).

II.1.- Comités Técnicos.

En este aspecto el Instituto Americano del Concreto (ACI) y su comité 440 conformado por 10 subcomités han llevado a los polímeros a diversas áreas de investigación, educación profesional y estudiantil y rehabilitación de estructuras dañadas

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) en coordinación con sus comités se encuentra trabajando y desarrollando métodos de prueba para el uso de barras, materiales de reparación y perfiles estructurales con productos de polímero. El Comité de Puentes y Estructuras de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficialía de Transportes (ASSHTO) estableció un Comité Técnico para Materiales Compuestos en 1997.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) por más de veinte años ha operado un Comité Técnico llamado Compuestos y Plásticos Estructurales que incluye el diseño y aplicaciones de los materiales compuestos

En México se han publicado varias normas que rigen los estándares tanto para los procesos de fabricación como para los ensayos y métodos de prueba de laboratorio. A continuación se muestran en la siguiente tabla las diferentes instituciones y sus respectivos comités que desarrollan diversas investigaciones sobre los materiales compuestos para su aceptación y aplicación en la construcción como elementos estructurales:

INSTITUCIÓN	COMITÉ
Instituto Americano del Concreto (ACI)	440 Compuestos para Concreto 440C Reporte del Estado del Arte 440D Investigación 440E Educación Profesional 440F Reparación 440G Educación Estudiantil 440H Concreto Reforzado (barras) 440I Concreto Pretensado (tendones) 440J Moldes Estructurales Permanentes 440K Durabilidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INSTITUCION	COMITÉ
Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)	Compuestos y Plásticos Estructurales
Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM)	D20.18.01 Materiales de Polímero Reforzado con Fibras para Concreto D20.18.02 Perfiles Pultruidos D30.30.01 Compuestos para Ingeniería Civil
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficialia de Transportes (AASHTO)	Puentes y Estructuras T-21 Compuestos de Polímero Reforzado con Fibras
Federación Internacional de Concreto Estructural (FIB)	Grupo de Trabajo en Polímero Reforzado con Fibras
Sociedad Canadiense de Ingenieros Civiles (CSCE)	Materiales Compuestos Avanzados para Puentes y Estructuras
Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE)	Comité de Investigación en Estructuras de Concreto
Buró de Investigación de Transportación (TRB)	A2C-07 Compuestos de Polímero Reforzado con Fibras

Tabla II.1.- Instituciones y sus respectivos comités que emiten códigos para los compuestos de Polímero.

Fuente: PRF Composites Products for Bridge Applications, Market Development Alliance, 2001.

II.2.- Organizaciones y Criterios.

Los productos de polímero han sido tema que han involucrado a varias organizaciones inmersas en la construcción. El Centro de Inteligencia para Estructuras Innovadoras (ISIS) de la Red Canadiense de Centros de Excelencia (CNCE) fue establecido para llevar a la Ingeniería Civil a un liderazgo a nivel mundial a través de los materiales compuestos, también este Centro de Excelencia a través de sus universidades ha coordinado un equipo de profesionales para mejorar esta tecnología en la construcción de caminos edificios y puentes. ISIS Canadá tiene el crédito de haber construido el primer sensor inteligente con productos de polímero en un puente y continúa haciendo mejoras en las áreas de rehabilitación estructuras de concreto, puentes con barras y tendones de polímero reforzado.

La Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles ha publicado reglamentos que especifican las recomendaciones de diseño para el uso de barras y tendones de polímero. En Europa, el programa Eurocrete ha publicado un reglamento para barras de polímero reforzado con fibras.

En el año de 1997 la Conferencia Internacional de Oficiales de Construcción (ICBO, Internacional Conference of Building Officials) publicó el AC-125 Criterio para reforzamiento de Concreto y Mampostería no Reforzada empleando Sistemas de Compuestos Reforzados con Fibras.

La tabla siguiente muestra los criterios y códigos empleados para la fabricación de productos de materiales compuestos:

CRITERIO/CODIGO	REFERENCIA
Código de Construcción Canadiense	Diseño y construcción de Componentes con Plásticos Reforzados con Fibras.
Código de Diseño Canadiense para Puentes (CHBDC)	Estructuras Reforzadas con Fibras.
Conferencia Internacional de Oficialías de Construcción (ICBO)	AC-125 Criterio para Reforzamiento de Concreto y Mampostería no Reforzada usando Sistemas de Compuestos de Polímero Reforzado con Fibras.
Especificación para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE)	Recomendación para el diseño y Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado empleando Materiales Continuos de Polímero.

Tabla II.2.- Criterios/Códigos con sus respectivas referencias en la utilización de materiales compuestos.

II.3.- Instituciones y publicaciones.

Hasta la fecha, diversas Instituciones académicas y Organizaciones han emitido varias publicaciones y revistas sobre la tecnología de los materiales compuestos y que han sido la base para el uso de este material y continúan desarrollando investigaciones en esta área.

En el listado siguiente se muestran las instituciones académicas que están llevando a cabo diversos estudios para mejorar las propiedades de los productos de polímero para su aplicación en la infraestructura civil:

a).- Instituciones.

1. Universidad Estatal de Iowa
2. Universidad de Kansas
3. Universidad Estatal de Oregon
4. Universidad Estatal de Pensilvania
5. Universidad Tecnológica Lawrence
6. Universidad de California en San Diego
7. Real Colegio Militar de Canadá
8. Centro Nacional de Compuestos de EUA
9. Centro de servicio para la Ingeniería Naval de EUA
10. Departamento de Transporte de EUA
11. UNAM-Facultad de Ingeniería (Capítulo Estudiantil del ACI)
12. Asociación Nacional de las Industrias de los Compuestos Moldeables y Plásticos Reforzados A.C.

c).- Publicaciones.

ORGANIZACIÓN	PUBLICACION/ACTIVIDAD
Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)	Revista de Compuestos para la Construcción empleando Materiales de Polímero Reforzado con Fibras.
Instituto Americano del Concreto (ACI)	Revista de Materiales. Estructural
Administración Federal de Carreteras (FHWA)	TEA-21 Programa de Construcción e Investigación de Puentes (IBRC)
ISIS Canadá	Investigación y Colaboración entre Gobiernos, Academias e Industrias en Canadá.
Alianza para el Desarrollo del Mercado de los Compuestos de polímeros Reforzados (MDA)	Equipos y Programas de Proyecto.
SAMPE	Revista de Materiales Avanzados

Tabla II.3.- Publicaciones emitidas que facilitan la transmisión de tecnología.

II.4.- Métodos de prueba y otros estándares.

Las principales instituciones a nivel internacional dedicadas al desarrollo de la tecnología de los materiales han emitido diversos métodos de prueba y parámetros, que deben cumplir los compuestos de polímero, para ser considerados como elementos estructurales. En el siguiente listado se muestran los métodos más comunes aplicados a los materiales compuestos:

INSTITUCION	CODIGO	METODO
American Society for Testing and Materials (ASTM)	C393-62	Prueba Estándar para determinar las Propiedades a Flexión de Construcciones Sándwich Planas.
	C581	Prueba Estándar para determinar la Resistencia Química de las Resinas Termofijas Projectadas para Estructuras.
	D256	Prueba Estándar para determinar la Resistencia al Impacto de Plásticos y Materiales para Aislamiento Eléctrico.
	D638	Prueba para Propiedades de Tensión de los Plásticos.
	D648	Prueba para determinar la Temperatura de Deflexión de Plásticos bajo Carga a Flexión.
	D696	Prueba Estándar para determinar el Coeficiente de Expansión Térmica Lineal de los Plásticos (-30 °C a 30 °C).

	D732	Prueba para determinar el Esfuerzo Cortante de los Plásticos mediante un martillo.
	D790	Prueba para determinar las Propiedades a Flexión de Plásticos Reforzados y No Reforzados y Materiales para Aislamiento Eléctrico.
	D792	Prueba para determinar la Gravedad Específica y la Densidad de los Plásticos mediante Desplazamiento.
	D953	Prueba para determinar el Esfuerzo de Carga de los Plásticos
	D2563	Prueba recomendada para la Clasificación Visual de Defectos en Láminas Reforzada con fibra de Vidrio.
	D3039	Prueba para determinar las Propiedades de Tensión de los Compuestos de Fibras con Resinas
	D3165	Prueba para determinar las Propiedades de Esfuerzo de los Adhesivos a Cortante mediante Carga a Tensión.
	D3418	Prueba Estándar para determinar las Temperaturas de Transición de los Polímeros mediante Análisis Térmico.
	D3528	Prueba para determinar las Propiedades de Esfuerzo de los Adhesivos a Cortante mediante Carga a Tensión.
	D4065	Prueba Estándar para determinar y reportar las Propiedades Mecánicas Dinámicas de los Plásticos.
	D4541	Prueba Estándar para determinar el esfuerzo de los Recubrimiento mediante el Equipo de Prueba de adhesión Portátil
Internacional Conference of Building Officials (ICBO)	AC125	Criterio para el reforzamiento de concreto y Mampostería no Reforzada utilizando Sistemas de Compuestos Reforzados con fibras (Abril, 1997)
ISIS Canadá	-----	Prueba Estándar para Barras y Láminas de Polímero Reforzado con Fibras (Universidad de Manitoba, 1994)
Asociación de Distribuidores de Materiales PRF (SACMA)	-----	Recomendaciones para el empleo de Materiales de Polímero Reforzado con Fibras. (1994).

Tabla II.4.- Métodos de prueba establecidas por las diversas organizaciones.

A continuación se presenta un listado donde se muestran los factores de reducción a emplear en el diseño de estructuras concreto reforzadas con materiales de polímero, basado en un consenso del Comité 440 del ACI:

CONDICION DE EXPOSICION	TIPO DE FIBRA	FACTOR
Concreto no expuesto a la tierra y clima	Carbono	1.0
	Vidrio	0.8
	Aramida	0.9
Concreto expuesto a la tierra y clima	Carbono	0.9
	Vidrio	0.7
	Aramida	0.8

Tabla II.5.- Factor de reducción ambiental por tipos de fibra y condición de exposición.
Fuente: Guide for the Design and Construction of CR with FRP Bars, ACI 2001.

Adicionalmente en el diseño de una estructura fabricada con material de polímero reforzado o sin reforzar, habrá que considerar los respectivos factores de carga, para tener un margen de seguridad, similar al análisis que se desarrolla con los materiales convencionales.

DURMIENTES TRADICIONALES

III.1.- Generalidades.

El concreto y la madera como elementos convencionales de la construcción, han sido utilizados también desde tiempos remotos en el área de la transportación. Desde los inicios de la era de los ferrocarriles, el material que se empleó para la fabricación de durmientes fué la madera, posteriormente se introdujo el concreto para elaboración de estos elementos. Los durmientes instalados en las diferentes vías de ferrocarril o tren urbano en nuestro país son tradicionalmente de estos materiales.

En todas las vías principales y secundarias de la red del Metro, se encuentran instalados durmientes de madera y concreto (monoblock y biblock). En cuanto a la implantación del sistema de vía, existen tres tipos de fijación, éstos están en función principalmente de las condiciones del terreno, así como de las diferentes soluciones estructurales utilizadas, tales como: superficial, elevada, subterránea en cajón y en túnel.

El análisis que se realiza para el diseño de un durmiente como elemento estructural, se basa principalmente en considerar que esta pieza funciona como una contralabe o también llamada trabe ahogada, considerando dos cargas concentradas en los extremos de cada durmiente, que es el peso de cada eje de tren dividido entre dos, teniendo un apoyo a todo lo largo de su base, que se encuentra en contacto directo con el balasto. El balasto a su vez distribuirá todo el peso transmitido por el tren a su paso y el de todos los componentes que conforman el sistema de vía hacia la losa de cimentación. Cabe hacer mención que la compactación del balasto se realiza al 100% en los dos tercios extremos, dejando el tercio central sin compactar, por lo que se considera sin apoyo en la parte central del elemento, sin considerar que con el movimiento que provoca el paso de los trenes en corto tiempo esta zona se compacta también.

De acuerdo a la experiencia obtenida de los especialistas en los sistemas de vías férreas, es recomendable la utilización de durmientes como elementos de fijación de la vía sobre balasto, ya que este proporciona varias ventajas, como son: permitir una rápida y fácil renivelación de la vía en tramos cortos, cambio de los mismos durmientes que se encuentren deteriorados por cualquier causa, entre otras. En comparación con un sistema de vía alojado directamente sobre un elemento fijo, como puede ser una losa de concreto, este puede presentar diversas desventajas, tales como la dificultad para realizar un trabajo de renivelación y el tiempo de ejecución, hundimientos diferenciales de la estructura en general, agrietamiento de la losa, entre otras, ya que esto implicaría retirar el tramo de todos los componentes, trayendo como consecuencia la interrupción del servicio por un periodo determinado.

El Sistema de Transporte Colectivo a través del área de construcción de obras se encarga de establecer las especificaciones técnicas que deben satisfacer los durmientes a instalar en las vías del Metro. Teniendo como base los parámetros asentados en las especificaciones de los durmientes tanto de concreto como de madera, se pueden incluir durmientes fabricados de diversos materiales cumpliendo con los requisitos establecidos para tal fin.

Para entender las funciones que realizan los durmientes instalados en las vías del Metro de la Ciudad de México, a continuación se presentan las características generales de los materiales, las dimensiones, componentes, funcionamiento y pruebas a los que son sometidos estos elementos; para obtener mayor información sobre detalles de fabricación y otras especificaciones, acudir directamente a las oficinas centrales del Metro.

III.2- Definición.

Los durmientes son elementos estructurales de sección transversal rectangular o trapezoidal uniforme o variable longitudinalmente, que soportan y fijan los rieles, las pistas de rodamiento y los aisladores para sujetar la barra guía, los cuáles transmiten al balasto las cargas verticales y horizontales impuestas por los trenes sobre los rieles a su paso y mantener la alineación, ancho de la vía, nivelación y constituyen el soporte directo de los perfiles metálicos que conforman el sistema de vía. Los durmientes son colocados sobre balasto (material pétreo), que cumplen con cierta granulometría para tener una adecuada interacción con los durmientes.

Los componentes del sistema de vías en general son los mismos para todos los tipos de durmiente, tanto el fabricado de madera como el de concreto.

A continuación se muestran los principales componentes que conforman un sistema de vía sobre balasto del Metro de la Ciudad de México.

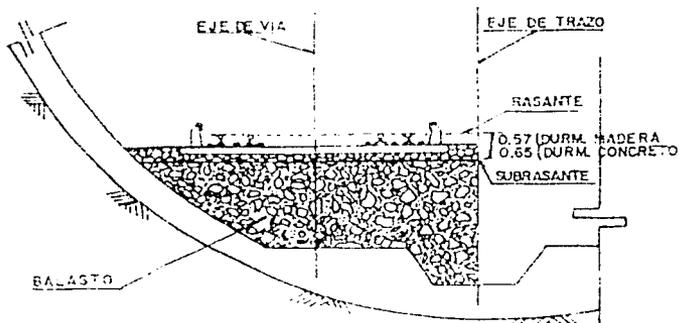
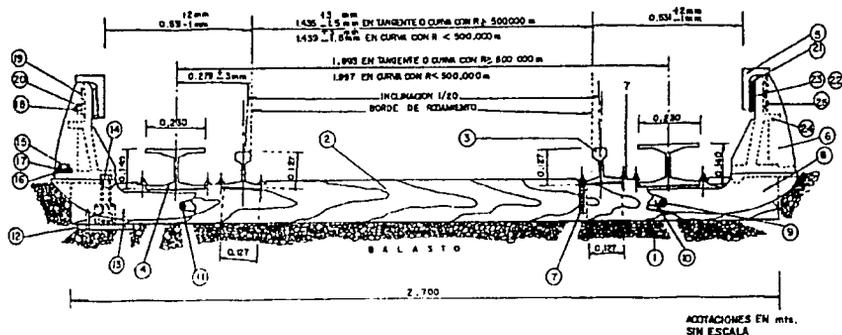


Figura III.1.- Instalación del durmiente sobre balasto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- | | |
|------------------------------------|--|
| 1 - Balasto | 14 - Tornillo de candilero |
| 2 - Durmiente de madera | 15 - Tornillo de fijacion HM 22 x 1/2 |
| 3 - Riel de seguridad | 16 - Rotula de palanca |
| 4 - Pista de rodamiento | 17 - Rotula de Crower VA 22 |
| 5 - Berra girie | 18 - Perno Neelson |
| 6 - Anclador | 19 - Rotula L 100 |
| 7 - Trafonjio | 20 - Tuerca autofrenada HM 16 |
| 8 - Zodo de bridas laterales | 21 - Calza de montaje de 3 perforaciones |
| 9 - Perno para fijacion de candado | 22 - Mocha calza de ajuste |
| 10 - Candado para fijacion de zodo | 23 - Calza de ajuste tipo Arpa |
| 11 - Chaveta M5 3-50 | 24 - Calza permanente de lateral |
| 12 - Candilero | 25 - Calza exterior |
| 13 - Clavo Helt | |

Figura III.2.- Elementos del sistema de via sobre balasto con durmientes de madera.

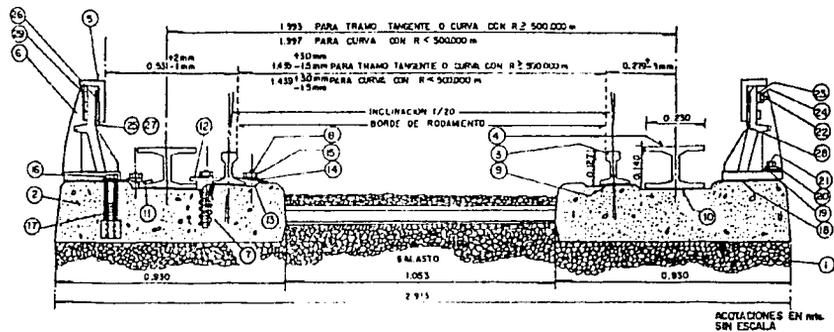


Figura III.3.- Elementos del sistema de via sobre balasto con durmientes de concreto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.3.- Clasificación.

La clasificación que se muestra a continuación se fundamenta principalmente en el tipo de material del cual están fabricados y las funciones que realizan, ya que podría haber más subgrupos de esta clasificación que son más específicos.

III.3.1.- Según el material:

MATERIAL	DESCRIPCION
De concreto.	Están contruidos de concreto reforzado, que puede ser monoblock o biblock; los primeros son de una sección transversal constante a lo largo de ellos., mientras que los segundos son dos bloques unidos con un tirante metálico.
De madera.	Estos están fabricados de una sección transversal uniforme longitudinalmente, de madera Azobé.

Tabla III.2.- Clasificación de los durmientes según el material.

III.3.2.- Según la función.

DURMIENTE	DESCRIPCION
Tipo "O"	A estos se les conoce con este nombre por ser "Ordinarios", porque solamente soportan los rieles y las pistas de rodamiento, la separación entre ejes es de 60 cm. en curva y 75 cm. en recta. Colocándose 3 de este tipo por uno de tipo "S" y así sucesivamente.
Tipo "S"	Estos sirven de "Soporte" de la barra guía, por esta función que realiza son más largos que los tipo "O".
Tipo "OS"	Es la combinación de los dos anteriores, en un extremo puede ser de soporte de barra guía y en el otro permanecer libre. Estos se colocan principalmente donde se tiene una barra guía en zona de cruzeta

Tabla III.3.- Clasificación de los durmientes según la función que realizan.

III.4.- Localización y distanciamiento.

Los siguientes valores indican la distancia que deben guardar los durmientes entre sus ejes para tener un funcionamiento adecuado dentro del sistema de vía:

SEPARACION ENTRE EJES		
TIPO	(cm)	
	CURVA	RECTA
"S"- "S" (a)	180	300
"S"- "O" (b)	60	75
"O"- "O" (c)	60	75

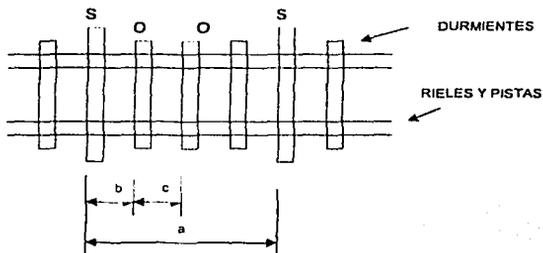


Figura III.5.- Distanciamiento entre durmientes.

III.5.- Cargas de diseño.

En el diseño de los durmientes es importante conocer las cargas que soportarán durante la vida útil, las cargas máximas por eje de los trenes de operación y mantenimiento que actúan sobre pista y rieles son las siguientes:

a).- Cargas verticales.

CONDICIÓN DE CARGA	PESO MÁXIMO POR EJE (Ton)	FACTOR DE IMPACTO	FUERZA VERTICAL MÁXIMA CON IMPACTO POR EJE (Ton)
OPERACIÓN	12.20	1.30	15.86
MANTENIMIENTO	20.00	1.25	25.00

Tabla III.4.- Condición de carga para diseño de durmientes.

b).- Cargas horizontales.

Las cargas horizontales que actúan sobre los elementos de vía se presentan a manera enunciativa son las siguientes: fuerza centrífuga no compensada, fuerza centrípeta (tren parado), fuerza sísmica, fuerza de balanceo, de frenaje y arranque.

c).- Cargas adicionales.

Las cargas máximas y combinaciones más desfavorables de cargas verticales y horizontales, se determinan considerando las rigideces de los rieles, pistas, barras guía y sus discontinuidades, así como la deformabilidad de los durmientes con el balasto y la distribución de los diferentes tipos de durmientes.

III.6.- Mediciones y ensayos de verificación.

Todos los durmientes son verificados y controlados por el fabricante, el cual también es responsable de la calidad de los materiales componentes y del durmiente como producto terminado, por lo tanto para asegurarse de esta calidad, realiza a su cargo, todas las pruebas y verificaciones que marcan las especificaciones y las normas correspondientes debiendo tener los resultados a la disposición en todo momento de el STC. El fabricante debe permitir al STC presenciar las pruebas que juzgue convenientes.

La verificación de estos elementos de vía incluye:

- 1.- Exámen visual del aspecto exterior.
- 2.- Revisión de cotas y tolerancias (control geométrico).
- 3.- Control de calidad.
- 4.- Las pruebas dinámicas.
- 5.- Las pruebas de carga vertical en asientos de rieles y pistas, al derecho y al revés.
- 6.- Pruebas de torque en pernos tirafondo (para concreto).
- 7.- Pruebas de extracción en fijaciones de aislador.
- 8.- Pruebas físicas del tirante metálico (para concreto).
- 9.- Verificación geométrica de la sección del tirante metálico (para concreto).

III.7.-Realización de pruebas.

Los durmientes se colocan en una prensa según las indicaciones anotadas en las especificaciones. La prensa se instala en un lugar convenientemente alumbrado para la rápida y efectiva visualización de la aparición de eventuales fisuras. Estas pruebas se efectúan tanto a los durmientes de concreto como a los de madera.

a).- Pruebas dinámicas sobre rieles.

Las pruebas dinámicas consisten en la aplicación de 300'000 ciclos con una fuerza (F) simultánea aplicada en los dos hongos de riel. El elemento no debe presentar desprendimientos ni

agrietamientos que no cierran después de la descarga total. La verificación de la aparición de fisuras se realiza con una lupa de 5 aumentos con alumbrado.

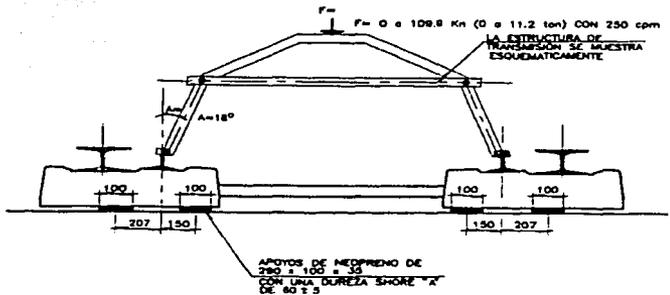


Figura III.6.- Pruebas sobre rieles.

b).- Pruebas dinámicas sobre pistas.

En esta prueba se aplican 2.6 millones de ciclos continuos con una carga (F) simultánea aplicada sobre las pistas de rodamiento. El durmiente no debe presentar desprendimientos ni agrietamientos que no cierran después de la descarga total. Esta prueba también se realiza con una lupa de 5 aumentos con alumbrado.

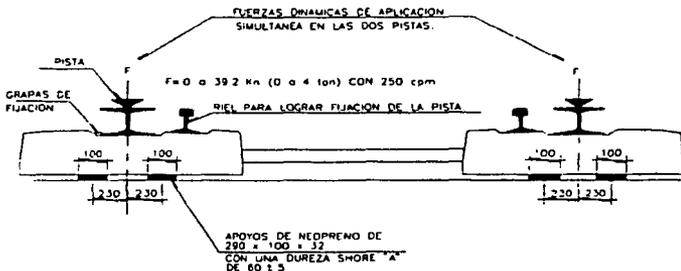


Figura III.7.- Pruebas sobre pistas de rodamiento.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

c).- Pruebas dinámicas sobre aisladores.

Se aplican 2.6 millones de ciclos continuos con una carga (F) simultánea aplicada sobre los aisladores. El elemento no debe presentar desprendimientos ni agrietamientos que no cierren después de la descarga total. La verificación de la aparición de fisuras se realiza con una lupa de 5 aumentos con alumbrado.

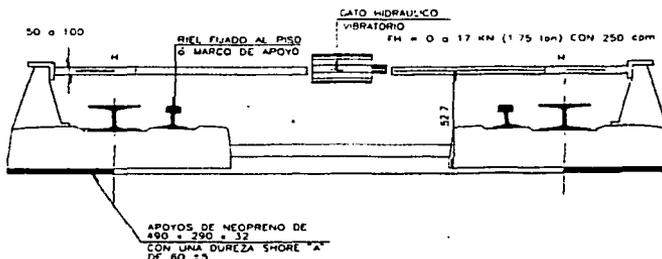


Figura III.8.- Pruebas sobre la barra guía.

d).- Pruebas de carga vertical en asientos de rieles y pistas.

Estas pruebas se realizan a cada durmiente seleccionado aleatoriamente, bajo 3 condiciones distintas de carga que más adelante se detallan. La aplicación de la carga se lleva a cabo progresivamente y regulada a una velocidad no superior a 1 ton/seg.

PUNTO DE APLICACIÓN	FUERZA (ton)	CONDICION DE CARGA
Al derecho sobre pista de rodamiento	7.0	Detener 1 minuto
	9.0	Detener 1 minuto
	10.8	Detener 1 minuto
	12.5	Detener 1 minuto
	14.6	Mantener 3 minutos y descargar completamente.
Al derecho sobre riel	10.0	Detener 1 minuto
	13.0	Detener 1 minuto
	15.3	Detener 1 minuto
	17.0	Detener 1 minuto
	18.9	Mantener 3 minutos y descargar completamente.
Al revés sobre pista y riel	7.0	Detener 1 minuto
	9.4	Detener 1 minuto
	11.7	Mantener la carga por 3 minutos y descargar completamente.

Tabla III.5.- Condiciones de aplicación de carga.

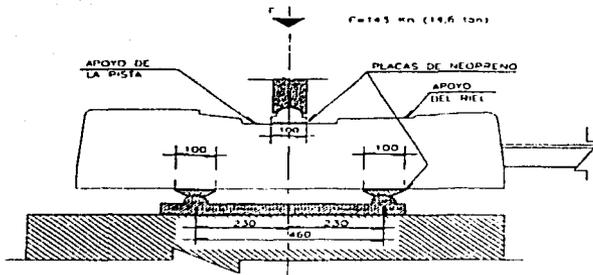


Figura III.9.- Prueba de carga en asientos de riel y pista.

e).- Pruebas de torque en fijaciones de rieles, pistas y aisladores y de extracción en las fijaciones de los aisladores.

Los pernos trefando para la sujeción de los rieles y las pistas, deberán probarse utilizando un torquímetro con el cual se aplicará un par de 20 kg-m en el sentido de afloje de los pernos y para los aisladores en el sentido de apriete el par deberá ser resistido sin daño alguno por el producto utilizado para la fijación de los pernos y no deberán aflojarse.

Las pruebas de extracción para los aisladores se realiza en ambos bloques, en forma simultánea para las dos fijaciones internas y externas de cada aislador con una fuerza total de 9 ton., es decir 4.5 para cada fijación, no debe presentar ningún daño en la fijación, ni fisuras o desprendimiento de concreto

III.8.- Durmientes de concreto.

En la actualidad los durmientes de concreto están desplazando a los de madera, se ha observado que los elementos de madera expuestos a condiciones ambientales extremas, pierden sus propiedades afectando su durabilidad, funcionalidad y comportamiento estructural. A continuación se indican las principales características de los durmientes de concreto instalados en las vías del Metro de la Ciudad de México.

III.8.1.- Dimensiones.

Los durmientes terminados cumplen con las dimensiones y tolerancias aprobadas por el STC. que es la dependencia encargada de establecer las especificaciones. en las tablas siguientes se muestran estas tolerancias.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a).- Dimensiones y tolerancias.

En las siguientes figuras se muestran las dimensiones y pesos de los durmientes de concreto:

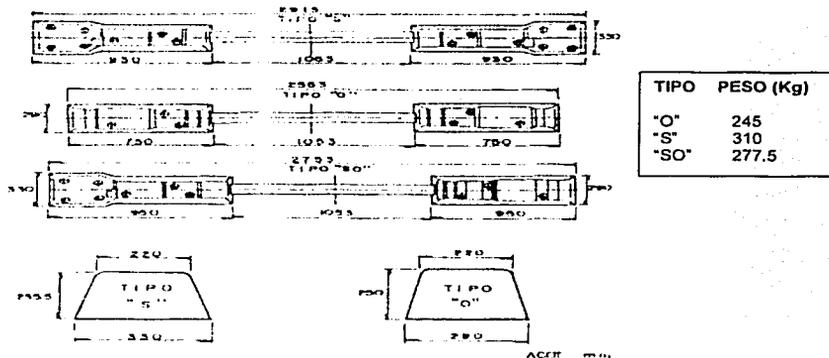


Figura III.10.- Durmientes de concreto Biblock.

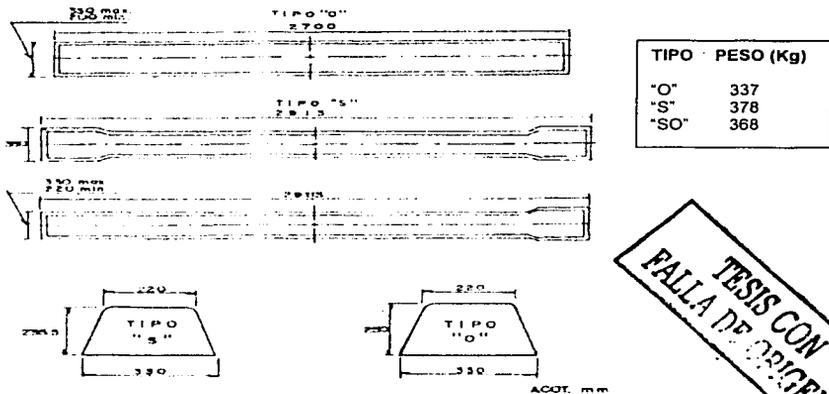


Figura III.11.- Durmientes de concreto Monoblock.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

b).- Tolerancias geométricas en la instalación.

LOCALIZACION	TOLERANCIA
Correspondencia entre las superficies de apoyo del riel y la pista.	Altura relativa: ± 1 mm. Alabeo: ± 2.0 mm.
Correspondencia de las superficies de apoyo del aislador y la pista	Altura relativa: 5 ± 0.5 mm. Alabeo: 5 ± 0.5 mm.
Uniformidad de las superficies de apoyo del riel, pista y aislador.	Se comprueba con una regla de 300 mm. de largo y 38 mm. de ancho o más; la desviación de las superficies de apoyo con respecto a la regla que no excede de 1 mm. para riel y pista y de 0.5 mm. para el aislador.
Topes.	Distancia entre topes extremos: ± 1 mm. Distancia entre topes de un mismo bloque: ± 1 mm. Los topes deben ser perpendiculares al eje longitudinal del durmiente.
Huecos que alojarán a los pernos-tirafondo.	Las tolerancias interiores de los huecos deberán ser las especificadas en los planos autorizados por el S.T.C., de acuerdo a los pernos-tirafondo a utilizar.
Vanaciones geométricas entre bloques.	Distancia entre caras exteriores de un bloque con respecto al otro: + 5 mm.
Dimensiones de un bloque.	Longitud, (sentido perpendicular a la vía): ± 5 mm. Ancho, (sentido paralelo a la vía): ± 2 mm., de 330 mm. en la zona de apoyo del aislador y 290 mm. en el resto del bloque. Altura: +6 mm. a -2 mm. sin exceder la altura máxima de 250 mm.

Tabla III.6.- Tolerancias geométricas del sistema de vía del Metro.

c).- Etapas del proceso de fabricación.

En el proceso de fabricación de los durmientes el fabricante propone y garantiza el cumplimiento estricto de los procedimientos empleados, que el STC aprueba previamente. El primero, está obligado a dar el libre acceso a todas sus instalaciones a los representantes del STC, durante el período que dura este proceso

A continuación se enlistan las etapas comúnmente utilizadas:

- 1 - Limpieza y aceitado de los moldes, estos son metálicos, impermeables e indeformables.
- 2 - Preparación y colocación del acero de refuerzo.
- 3 - Colocación de las guarniciones helicoidales, éstas sirven para sujetar los pernos-tirafondo.

- 4.- Colocación del concreto en los moldes.
- 5.- Desmoldeado o extracción de la pieza del molde.
- 6.- Acabados exteriores.
- 7.- Curado.
- 8.- Colocación de los pernos tirafondo en las guarniciones helicoidales.
- 9.- Colocación de las almohadillas sobre el asiento de riel, pista y aislador.
- 10.- Verificación final de los durmientes.

Adicionalmente el fabricante entrega al S.T.C., el plano completo de sus instalaciones acompañado de la nomenclatura detallada de las máquinas y aparatos que utilizará.

III.9.- Durmientes de Madera.

La historia muestra que la madera fué el primer material utilizado para la fabricación de los durmientes, instalados en los sistemas de vía del transporte ferroviario en general. Por su flexibilidad y excelente comportamiento estructural es el material ideal para la fabricación de durmientes. De acuerdo a la experiencia y los datos obtenidos, este material pierde con mucha facilidad las propiedades que lo hacen vulnerable a las condiciones ambientales extremas, existen procesos de tratamiento de secado y conservación, para alargar la vida útil de estos elementos. Desde los inicios de la operación del Metro, los durmientes que se instalaron fueron de importación procedentes del continente Africano

En esta sección se indican las principales características que satisfacen la fabricación de los durmientes de madera instalados en el sistema de vías del Metro.

III.9.1.- Dimensiones.

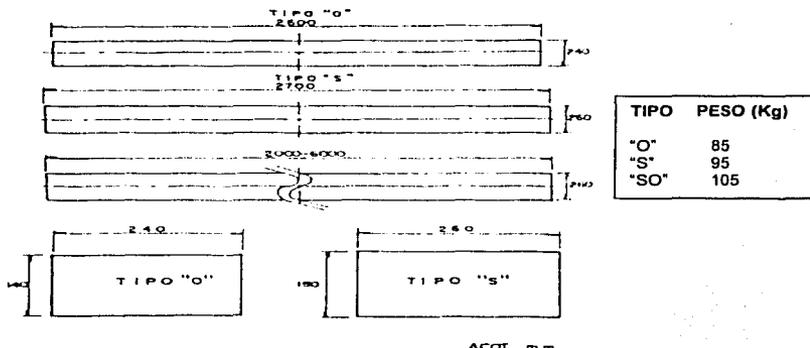


Figura III.12.- Durmientes de madera.

III.9.2.- Tolerancias.

a).- Durmientes tipo "O".

ARISTA	TOLERANCIA (mm)
Longitud	+30 , -30
Ancho	+10 , -5
Espesor	+15 , -5

b).- Durmientes y piezas de madera tipo "S" y "ESPECIALES".

ARISTA	TOLERANCIA (mm)
Longitud	0 , +50
Ancho	+8 , -10
Espesor	+10 , -10

c).- Flechas admisibles.

SUPERFICIE	FLECHA MAXIMA
Superior e inferior	L/350
Laterales	22 mm para L < 3.20 m. L/350 para L > 3.20 m.

L: Longitud total del durmiente.

d).- Escuadrado de los extremos:

máximo 2 cm.

III.9.3.- Características de la madera.

a).- Especie.

La madera empleada para la fabricación de los durmientes y de las piezas de madera es el azobé (Lophira Alata o Lophira Procera) procedente de los territorios de la costa occidental de África y/o otra especie que cumpla con los requisitos establecidos en las especificaciones técnicas.

b).- Propiedades.

Los sistemas ferroviarios tanto nacionales e internacionales utilizan las siguientes especies de madera para fabricar durmientes, que son las que cumplen con las especificaciones técnicas establecidas para tal fin.

ESPECIE	DENSIDAD (kg/m ³) (12% humedad)	RESISTENCIA (kg/cm ²)			ARRANQUE DEL TIRAFONDO (Ton)	
		COMPRESION		A LA ROTURA	NORMAL	LATERAL
		PARALELA A LA FIBRA	NORMAL A LA FIBRA			
Roble común	825	444.8	159.2	39.75	5.80	6.41
Roble albar	847	466.1	112.3	34.10	5.32	6.55
Pino silvestre	661	440.2	125.5	21.50	4.33	4.23
Haya	641	603.1	121.7	39.46	6.73	7.03

Tabla III.7.- Propiedades de las especies de madera para durmientes.

c).- Particularidades.

Dentro de los requisitos que cumplen estas piezas, se encuentran las especificaciones de la ficha UIC-863-1-OR publicada el 1° de enero de 1986 relativa a la utilización de las especies extra-europeas para la fabricación de los durmientes, y de la ficha UIC-863-0 del 1° de enero de 1981 para el suministro de soportes no tratados, aportando esta última las exigencias propias a la especie utilizada y a la presencia de pistas metálicas de rodamiento y de piezas soportes de barra guía que requieren maquinados y utilización de tirafondos en los extremos de los durmientes.

d).- Calidad de la madera.

Los durmientes y piezas de madera son de fibras duras y compactas de filamento recto, sin fibras podridas, incisos de roturas transversales, atronaduras, orificios causados por insectos o gusanos, podredumbres o fermentaciones sobre una gran superficie de ellos.

No se autoriza ninguna huella de corteza, de su soporte y de entrecorteza.

Están autorizados todos los nudos sanos y los podridos hasta un diámetro de 20 mm. y una profundidad de 30 mm., éstos últimos son limpiados para su aseguramiento.

No se admite ningún borde con corteza y todas las aristas son agudas con una tolerancia en forma de un achaflanado máximo de 5 mm.

En la madera existen dos tipos de grietas que se consideran importantes:

- 1).- Las grietas estructurales, esencialmente las fallas de radio y las acebolladuras que no evolucionan prácticamente con el secado.
- 2).- Las grietas debidas a la liberación de las tensiones internas al efectuar el aserrado y las grietas debidas a la desecación.

3).- No se autoriza ninguna falla de radio, grieta de corazón o acebolladura, con excepción de huellas superficiales en forma de labio.

4).- Se considera que la evolución de las grietas debidas a la liberación de las tensiones internas y a la desecación se estabiliza al cabo de un plazo de 4 a 6 meses aproximadamente después del aserrado, en condiciones normales de secado.

e).- Aserrado.

Los troncos de los que se cortan los durmientes y las piezas de madera proceden de árboles sanos, derribados vivos, eliminando los árboles incendiados, derribados por rayos o con podredumbre interior.

Estos elementos son de forma regular y recta, todas las superficies y los extremos están cortados con sierra mecánica, en ángulo recto. El aserrado de maderas largas deben efectuarse a partir de troncos con corazón bien centrado.

Las piezas no están destinadas a recibir un tratamiento de preservación y por lo tanto, deben estar libres de albura (región externa del árbol que corresponde a las capas formadas recientemente de color marrón gnsáceo).

Para cerciorarse al máximo de la ausencia de albura verdadera, cuyo límite con la madera intermedia es difícil de determinar en el azobé, los durmientes y maderas no comprenden ningún borde con corteza, es decir que son aserrados con cuatro aristas agudas.

Corresponde al fabricante, de acuerdo a su experiencia, decidir las cotas a escoger en el momento de aserrado de las piezas para que las mismas satisfagan, después de seis meses de secado, las cotas nominales conjuntamente con las tolerancias admisibles.

Durante el proceso, desde el bosque a los aserraderos y todos los lugares de depósito, hasta el almacenaje, éste se realiza en tongas (pilas) de 30 durmientes colocados en forma de lechos aislados 15 cm. del suelo, con separadores de 3 cm. de espesor, alcanzando las pilas una altura de 5 10 m. de tal forma que se pueda transitar a su alrededor para poder inspeccionarlos.

Cada tonga tiene el ancho de un durmiente y se deja un pasillo mínimo libre de 1.50 m. entre cada tonga. Las tongas de durmientes se mantienen protegidas del sol y de la lluvia por un techo que represente un buen aislamiento térmico (están prohibidos los techos de lámina metálica galvanizada y lámina de fibra de vidrio, por sus propiedades térmicas).

f).- Medidas de conservación.

Inmediatamente después del aserrado, a todos los durmientes y piezas se les aplican en sus extremos sobre las secciones y en todos los bordes, sobre una longitud de al menos 5 cm. una emulsión plástica, transparente, de adherencia garantizada durante un año, destinada a evitar una desecación demasiado rápida. El producto de emulsión plástica (por ejemplo NOXIVOL de XYLOCHIMIE) debe recibir la homologación del S.T.C.

Durante el período de secado, el fabricante consolida, en tiempo útil las cabezas de las piezas que presentan grietas admisibles, mediante dispositivos apropiados, preferentemente con placas de garfios, de acero templado y galvanizado (gang-nails).

III.9.4.- Documentación utilizada.

Los términos relativos a la madera están definidos en las normas ISO 1029 a la 1032 y de la ISO-2299 a la 2301 y/o las normas francesas NF-B-50-002 Y 003.

Los documentos citados tales como las fichas UIC, normas ISO, normas AFNOR, DIN y ASTM, son las que se encuentran vigentes a la fecha de la licitación correspondiente.

En caso de modificación posterior, éstas son reemplazadas por las que estén en vigor en el momento de la adquisición, el fabricante está obligado a informar al STC, precisándole las incidencias eventuales sobre el contenido de la especificación.

DURMIENTE DE POLIMERO

IV.1.- Generalidades.

Después de diversos estudios y pruebas de laboratorio a los durmientes fabricados con materiales compuestos (polímero o plástico), varias empresas dedicadas a la fabricación de estos productos en los Estados Unidos de Norteamérica, han introducido durmientes de este material como prototipos a prueba en diferentes tramos de vías de ferrocarril, en combinación con los ya instalados (de madera o de concreto), la respuesta que se ha tenido es satisfactoria, su comportamiento ha sido el esperado por los investigadores, por lo que se propone para un futuro inmediato su instalación definitiva.

Uno de los aspectos de gran importancia que cuida este proyecto es el ambiental, porque con esto se evita la tala de árboles, además de que varios plásticos se pueden obtener por medio de un tratamiento de reciclaje de los ya existentes, sin perder sus propiedades. Aprovechando la tecnología desarrollada en nuestro país en el área de la química y promoviendo este tipo de innovaciones tecnológicas en las empresas de esta rama, es viable el diseño y la fabricación de los durmientes de polímero, con mano de obra y equipo mexicanos, no teniendo que recurrir a productos de importación.

De acuerdo a los datos estadísticos de la Asociación Nacional de las Industrias de Compuestos Moldables y Plásticos Reforzados A. C., existe una gran cantidad de toneladas de plásticos reciclables acumulados en diferentes zonas del país que bien podrían dárseles un reuso en la fabricación de diferentes productos de polímero, entre ellos el durmiente para vía férrea; no sólo para el Metro de la Ciudad de México sino también para los diferentes sistemas de vías de los ferrocarriles en el país.

La flexibilidad, la baja inversión de capital aunado a la durabilidad que presentan estos productos en su fabricación, hacen que los durmientes de polímero sean una alternativa para su implementación en las vías férreas, tanto de ferrocarriles como de trenes urbanos, entre ellos el Metro de la Ciudad de México.

Con la finalidad de buscar nuevas alternativas en el área de materiales para la construcción, el durmiente fabricado con compuestos de polímero, ofrece una alternativa para su instalación en las vías del Metro, dado que éste proporciona aspectos estructurales adecuados y mejores en ciertos casos que los construidos de material convencional, algunos de éstos: la relación peso-resistencia, la durabilidad, la densidad, sólo por mencionar algunos.

La densidad de este material es una propiedad fundamental para casos en donde se busca un peso menor pero un comportamiento estructural adecuado; en los tramos elevados de la red del Metro sería ideal la colocación de estos durmientes, ya que reduciría en gran medida el peso total de la estructura al instalar durmientes de plástico, evitando con esto los hundimientos totales o diferenciales de la estructura en general.

La propuesta de introducir durmientes de plástico en las vías del Metro, se basa principalmente en los ensayos practicados a los modelos de durmiente denominados "Pruebas de Ciclos Acelerados"

y de "Pruebas de Intemperie Acelerada", debido a que estas pruebas simulan las condiciones reales de funcionamiento de estos elementos.

Los datos que se presentan en este trabajo fueron obtenidos de los fabricantes que obtuvieron los mejores resultados en las pruebas realizadas a los durmientes de polímero, dichas pruebas se llevaron a cabo y aprobados por las Instituciones que a continuación se enlistan:

- ✓ Laboratorios de Reserva de Construcción del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U.A.
- ✓ Universidad Rutgers
- ✓ Universidad de Illinois
- ✓ Universidad de Washington & Lee
- ✓ Centro Nacional de Reserva y Aplicaciones de Energía Eléctrica de Georgia Tech (NEETRAC)
- ✓ Comisión de Ciencia y Tecnología de Nueva Jersey
- ✓ American Railway Engeneering of way Maintenance Asociation (AREMA)

IV.2.- Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación consistió en introducir a presión una mezcla fundida de resinas y aditivos en un molde de acero y esperar el periodo de enfriamiento hasta que pueda ser removido de su interior. Los componentes son mezclados y fundidos por medio de presión y calor en un molde, obteniéndose un producto químicamente resistente a los ácidos, además son antitóxicos.

El durmiente terminado presenta en la superficie de sus caras un acabado ligeramente rugoso, de vetas y valles de 3 a 4 mm., que entre sí todas son paralelas. En su cara inferior presenta algunos círculos en bajo relieve para mayor adherencia y anclaje con el balasto (piedra que sirve de basamento). Mientras que en sus caras superiores presentan el moldeado para el soporte de las pistas metálicas de rodamiento, del nel de seguridad, montaje de las fijaciones y de la placa metálica para la colocación del aislante. Estas características son para todos los tipos de durmientes.

El proceso utilizado en la manufacturación de los durmientes de polímero es el de extrusión, que consiste en colocar los materiales en un molde que puede ser metálico u otro resistente a temperaturas elevadas, es un método típico para fabricar compuestos termoplásticos; este proceso resulta económico dado que no se utilizan equipos sofisticados, por lo que se considera un proceso fácil de realizar, los pasos son los siguientes:

- 1.- Mezcla de los materiales (Compounding).
- 2.- Moldeo (Molding).
- 3.- Enfriamiento (Cooling).
- 4.- Verificación (Quality control).
- 5.- Durmiente terminado.

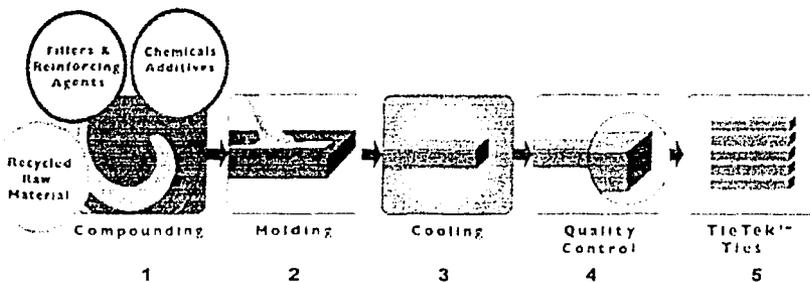


Figura IV.1.- Proceso de manufacturación de los durmientes de polímero.
Fuente: Grupo NATK "TIE-TEK", 2002

IV.3.- Documentación utilizada.

Dentro de las pruebas realizadas a estos durmientes como perfiles estructurales, se encuentran las empleadas para los durmientes de concreto y de madera.

NORMA	PRUEBA
ASTM-D6108-97	Esfuerzo a la compresión Módulo a la compresión
ASTM-D6109-97	Esfuerzo a la flexión con 3% de torsión Módulo de elasticidad (flexión) Resistencia al cortante (calculada)
ASTM-D1894	Coefficiente de fricción
ASTM-D1895	Coefficiente de expansión térmica
ASTM-D6111-97	Gravedad específica (densidad)
ASTM-D6117-97	Extracción mecánica de pernos (de torque)

Tabla IV.1.- Especificaciones técnicas de los durmientes de Polímero.
Fuente: Polywood, Inc. 2001

IV.4.- Dimensiones y tolerancias.

Los durmientes de material compuesto son prismas rectangulares de forma regular, de superficie lisa y la base diseñada especialmente para adherirse con el balasto. Las fibras de refuerzo están orientadas en dirección longitudinal.

a).- Dimensiones.

En general, las dimensiones que tienen este tipo de durmientes son las mismas que las de los durmientes tradicionales, en este caso no debe haber diferencias entre un tipo de durmiente y otro, permanecen las mismas dimensiones

DURMIENTE	TIPO	DIMENSIONES (m)
Ordinario	"A"	0.24x0.15x2.60
De soporte	"GA"	0.26x0.15x2.825
Para aparatos de vía	"GA"	0.26x0.15x2.70 a 6.0

Tabla IV.2.- Clasificación de los durmientes de Polímero.

Fuente: Polywood, Inc 2001

b).- Tolerancias.

Las tolerancias que deben cumplir los durmientes de polímero se muestran a continuación en la siguiente tabla:

DURMIENTE	TOLERANCIA (mm)
Tipo "A"	Largo +30 , -30
	Ancho +30 , 0
	Espesor +15 , -5
Tipo "GA" y Especiales	Largo 0 , -50
	Ancho +8 , -10
	Espesor +10 , -10

Tabla IV.3.- Tolerancias de los durmientes de polímero.

Fuente: Polywood, Inc 2001

Las tolerancias que presentan las muestras para ser aprobados y posteriormente sometidos a los ensayos, son las que han sido establecidas en las especificaciones correspondientes. A continuación se muestran las tolerancias admisibles y los defectos de escuadrado en los planos horizontal y vertical para su aceptación:

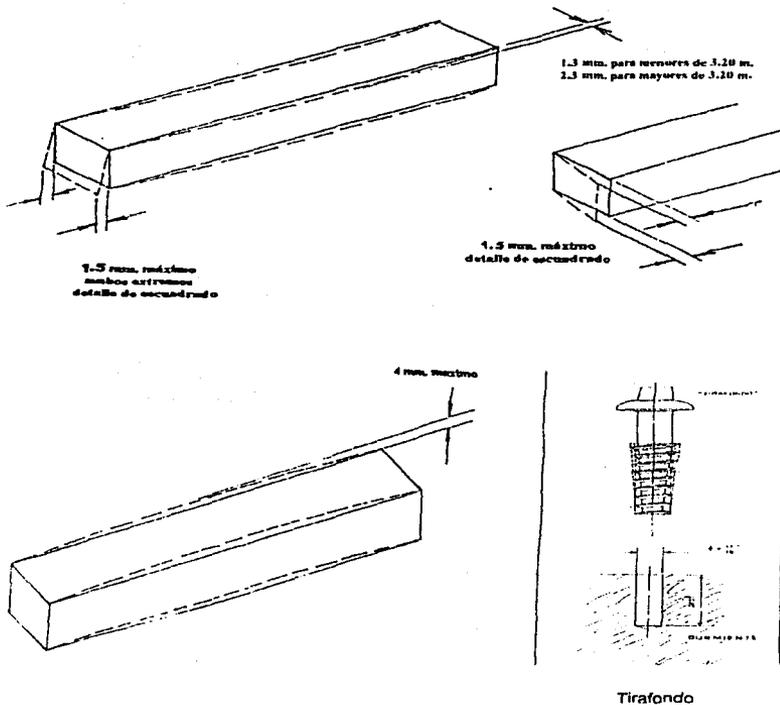


Figura IV.2.- Tolerancias en la fabricación de los durmientes de polímero.

Fuente: Polywood, Inc. 2002.

IV.5.- Propiedades.

Las siguientes propiedades que se enlistan se observaron durante todo el proceso que va desde la fabricación hasta la realización de las pruebas de laboratorio, a las que fueron sometidos los durmientes de polímero

- a) - En todas las formulaciones y procesos químicos se emplearon materiales reciclados al 100%, teniendo con esto un aprovechamiento de los desechos plásticos que frecuentemente no se les considera útiles y simplemente se desechan.

b).- En el diseño de estas piezas se incluyeron las ruedas de carga modernas (cargas por eje) para tener una mayor certeza en su comportamiento estructural.

c).- La sujeción y acoplamiento que mostraron estos elementos con los rieles fue aceptable. La sujeción o agarre del durmiente con los rieles y los accesorios de fijación constituyen un concepto de suma importancia para el buen funcionamiento de los durmientes.

d).- Cuentan con excelentes propiedades de rigidez. Las resinas le proporcionan al elemento una rigidez total, que es fundamental para que el durmiente mantenga una buena estabilidad estructural

e).- Las propiedades mecánicas que tienen son similares a las de un elemento de madera, resistencia a la compresión y módulo elástico altos. Mediante las pruebas realizadas a las muestras los durmientes de polímero presentaron propiedades mecánicas aceptables en comparación con los elementos de madera

f).- La dureza que existe en su superficie es excelente como pieza estructural. Este parámetro indica la capacidad de soportar una carga o fuerza en un área determinada; los elementos probados mostraron altos esfuerzos, por lo que son considerados aptos para su utilización en las vías, debido a que estarán sometidos a impactos y fuerzas de gran magnitud.

g) - Cuenta con la propiedad de ser un buen aislante, no posee defectos de corriente residual. Es importante que todos los elementos que conforman el sistema de vía, excepto la barra guía, posean esta propiedad, ya que se maneja un alto voltaje (750 volts) sobre la barra guía.

Actualmente el aislador (barra guía-durmientes) instalado en las vías del Metro es de polímero reforzado con fibra de vidrio (poliéster-fibra de vidrio), presentando una resistencia al aislamiento en seco de 100 Megaohms, con un peso de 12.7 kg por pieza.

h) - El agarre de los pernos y los roscados (agujeros para la inserción de pernos), muestran al paso del tiempo un comportamiento adecuado. Durante las pruebas los durmientes de polímero mostraron resultados satisfactorios en este aspecto, los roscados no sufrieron agrietamientos ni rupturas.

i).- Poseen un ciclo de vida extremadamente competitivo, ya que no sufrieron deformaciones o daños en la prueba a la que fueron sometidos. Por el alto contenido de químicos incluidos en su fabricación, cuentan con un ciclo de vida aceptable en el área de las vías férreas, ya que existen condiciones ambientales desfavorables producidas por la contaminación.

j).- No requieren el uso de preservativos anti-tóxicos, por lo que se pueden instalar en cualquier lugar y diversas condiciones climáticas, ya que se incluyeron aditivos anti-tóxicos en su fabricación. Por lo que son considerados como no tóxicos.

k).- No presentan condiciones riesgosas de almacenaje o instalación. Cuentan con un acabado que no produce residuos tóxicos, por lo que se pueden transportar, almacenar e instalar sin ningún riesgo, para el personal que esté en contacto directo, con estos elementos.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas que poseen los durmientes instalados en diversos tramos de vías de ferrocarril en los Estados Unidos:

METODO DE PRUEBA	PROPIEDADES	VALOR TÍPICO
ASTM D108-97	Resistencia a la compresión (paralela a las fibras)	287-348 (kg/cm ²) *
	Resistencia a la compresión en el asiento del riel (perpendicular a las fibras)	80 - 97 (kg/cm ²)
	Deformación permanente bajo carga (perpendicular a las fibras)	0.03 - 0.04 cm.
	Módulo de Elasticidad a Compresión	11'353 - 13'709 (kg/cm ²) *
ASTM D6109-97	Resistencia a la flexión	211 (kg/cm ²) *
	Módulo de Elasticidad a Flexión	13'375 - 17'786 (kg/cm ²) *
	Resistencia al cortante (calculada)	105 (kg/cm ²) *
ASTM D6111-97	Densidad	976 - 1024 (kg/m ³)
ASTM D6117-97	Extracción mecánica de pijas	6'464 - 7'825 (kg)
ASTM D696-91	Coefficiente de expansión térmica	0.00099 cm/cm/ °C

NOTA: Dimensiones de los especímenes ensayados:

* 4" x 6" = 10 16 x 15 24 cm

el resto de 7" x 9" = 17 78 x 22 86 cm

Tabla IV.4.- Propiedades mecánicas de los durmientes de polímero instalados en tramos de vías de ferrocarril en los EUA.

Fuente: Polywood, Inc. 2002

IV.6.- Hojas técnicas.

En las siguientes hojas, se muestran los valores que se obtuvieron de las diferentes pruebas a que fueron sometidos los durmientes de plástico. Cabe hacer mención que las comparaciones se hacen, solamente con respecto al durmiente de madera, debido a que el durmiente de concreto reforzado con acero y el concreto reforzado en general, es considerado como un material de excelencia para la construcción de cualquier estructura civil, aunque con la desventaja de poseer una densidad alta

La siguiente tabla muestra las características y resultados de los modelos durmientes de polímero que fueron ensayados en comparación con el promedio obtenido en el ensayo de durmientes de madera

MUESTRA No.	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTO (cm)	PESO (kg)	DENSIDAD (kg/m ³)
1	254	23.0	18.0	88.98	838.63
2	253	23.0	17.0	80.35	785.71
3	252	22.8	17.4	89.89	891.54
4	253	23.0	18.4	81.26	771.28
5	261	22.8	18.0	80.81	761.66

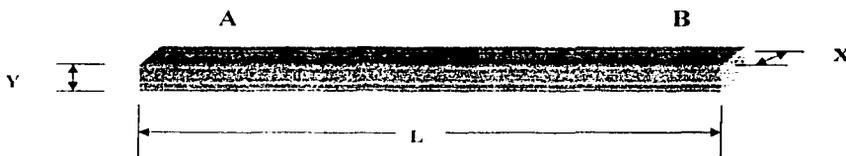
6	261	22.8	18.0	80.81	761.66
7	261	23	17.4	79.45	742.42
8	260	23	18.0	86.26	800.14
Promedio	257	23	17.6	83.53	793.73
Barra de roble tratada con creosota	274	22.8	18.0	99.88	896.35

Tabla IV.5.- Características de los durmientes de polímero.

Fuente: Polywood Inc. 2001.

IV.6.1.- Punto de aplicación de las pruebas.

Las pruebas de laboratorio se realizaron considerando los siguientes puntos de aplicación, extremo A y extremo B, la longitud de A a B es la distancia que se tiene entre los rieles (2 m.), que es la distancia que existe entre las pistas de rodamiento y es donde se concentra la carga de los trenes, ya que los rieles solo se colocan por seguridad.



L. Longitud total

X. Ancho

Y. Altura

El extremo A fué sometido a 6 ciclos de aceleración artificial.

El extremo B fué probado como muestra de control a cero ciclos.

Figura IV.3.- Diagrama tipo de las muestras empleadas en las pruebas.

Fuente: Polywood, Inc. 2002

IV.6.2.- Prueba de Ciclos Acelerados.

Es la prueba que representa las condiciones reales de funcionamiento que se producen en las vías del Metro, estos elementos son sometidos a cargas continuas debido a la circulación de los trenes.

Esta prueba se realiza simulando el paso de los trenes a través de las pistas de rodamiento, porque es donde se concentran las fuerzas impuestas por los trenes. En la siguiente figura se observa la idealización de los mecanismos de prueba:

La fuerza de diseño que se toma para esta prueba es de $F = 10.88$ ton, debido a que con la velocidad se reduce el peso del tren.

Condiciones:

Velocidad del tren: 80 km/h
 Fuerza de diseño máxima : 10.88 Ton.
 Torque de las piezas: 20 kg-m

Obtención de los ciclos:

Se dividen 80'000 m. entre 3600 seg. (una hora): $V=22.22$ m/seg.
 Dividir V entre 11 m. (longitud entre bogies): $C=2.02$ ciclos/seg.

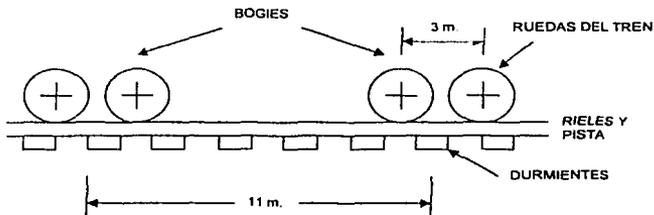


Figura IV.4.- Mecanismos de prueba en ciclos acelerados.

Fuente: Polywood, Inc. 2002.

a).- Efecto de los ciclos acelerados.

Los siguientes datos son los que se obtuvieron en los ensayos que se llevaron a cabo sobre los modelos de durmientes de polímero en la prueba de ciclos acelerados artificiales o Módulo de Elasticidad en Compresión (MOE):

MUESTRA NO.	CICLO 0				CICLO 1			
	FUERZA (Ton)	DECREMENTO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)	FUERZA (Ton)	DECREMENTO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)
1	10.88	0.14	17.78	2'249	10.88	0.15	17.78	1'903
2	10.88	0.16	17.14	1'835	10.88	0.15	17.30	2'028
3	10.88	0.19	17.14	1'872	10.88	0.15	17.14	2'009
4	10.88	0.20	17.18	1'546	10.88	0.15	16.83	1'972
5	10.88	0.15	17.78	2'062	10.88	0.15	17.30	2'028
6	10.88	0.19	17.78	1'649	10.88	0.19	16.83	1'578
7	10.88	0.25	17.46	1'215	10.88	0.24	17.14	1'269
8	10.88	0.14	17.78	2'249	10.88	0.10	17.46	3'070
Promedio	10.88	0.18	17.58	1'800	10.88	0.15	17.22	1'982
Desviación Estándar	0.00	0.05	0.28	368	0.00	0.05	0.33	516
C. V. (%)	0.00	21.25	1.65	20.43	0.00	24.36	1.84	26.05

MUESTRA NO.	CICLO 2				CICLO 3			
	FUERZA (Ton)	DECRETO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)	FUERZA (Ton)	DECRETO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)
1	10.88	0.23	17.78	1'375	10.88	0.15	17.94	2'080
2	10.88	0.16	17.46	1'889	10.88	0.15	17.46	2'046
3	10.88	0.15	17.14	2'009	10.88	0.12	17.14	2'411
4	11.10	0.18	16.82	1'725	10.88	0.17	16.98	1'706
5	10.88	0.15	17.14	2'009	10.88	0.14	16.83	2'151
6	10.88	0.15	17.46	2'046	10.88	0.15	17.14	2'009
7	10.88	0.20	17.30	1'521	10.88	0.22	17.30	1'352
8	10.88	0.11	17.62	2'753	10.88	0.10	17.62	3'098
Promedio	10.91	0.18	17.34	1'916	10.88	0.15	17.29	2'107
Desviación Estándar	0.00	0.02	0.30	418	0.00	0.02	0.35	510
C.V. (%)	0.00	20.86	1.75	21.81	0.00	24.32	2.08	24.21

MUESTRA NO.	CICLO 4				CICLO 5			
	FUERZA (Ton)	DECRETO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)	FUERZA (Ton)	DECRETO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)
1	10.88	0.14	17.94	2'269	10.88	0.15	17.94	2'102
2	10.88	0.16	17.46	1'889	10.88	0.16	17.46	1'889
3	10.88	0.12	16.83	2'366	10.88	0.15	17.14	2'009
4	11.10	0.15	16.99	1'991	10.88	0.19	16.83	1'578
5	10.88	0.14	17.14	2'192	10.88	0.14	16.99	2'172
6	10.88	0.16	17.46	1'889	10.88	0.15	17.30	2'028
7	10.88	0.20	17.30	1'521	10.88	0.20	17.30	1'521
8	10.88	0.10	17.62	3'098	10.88	0.10	17.78	3'125
Promedio	10.91	0.15	17.35	2'152	10.88	0.15	17.35	2'053
Desviación Estándar	0.00	0.02	0.35	466	0.00	0.02	0.38	494
C.V. (%)	0.00	20.22	2.06	21.64	0.00	19.76	2.17	24.04

MUESTRA NO.	CICLO 6			
	FUERZA (Ton)	DECRETO ALTURA (cm)	ALTURA (cm)	MOE (kg/cm ²)
1	10.88	0.15	17.94	2'080
2	10.88	0.15	17.46	2'046
3	10.88	0.12	16.83	2'366
4	10.88	0.15	17.14	2'009
5	10.88	0.14	16.83	2'151
6	10.88	0.15	17.30	2'028
7	10.88	0.20	17.30	1'521
8	10.88	0.10	17.62	3'098
Promedio	10.91	0.15	17.30	2'162
Desviación Estándar	0.00	0.02	0.38	466
C.V. (%)	0.00		19.47	20.60

Tabla IV.6.- Efecto de los ciclos acelerados en Módulos de Elasticidad en Compresión.

Fuente: Polywood, Inc. 2002

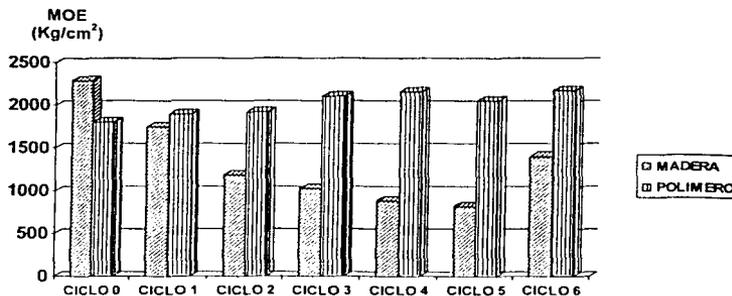
MUESTRA No.	CICLOS MODULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN (kg/cm ²)							% MEDIO DE RETENCION
	0	1	2	3	4	5	6	
1	2'249	1'903	1'375	2'080	2'269	2'102	2'080	0.92
2	1'835	2'028	1'889	2'046	1'889	1'889	2'046	1.11
3	1'872	2'009	2'009	2'411	2'366	2'009	2'366	1.49
4	1'549	1'972	1'725	1'706	1'991	1'578	2'009	1.30
5	2'062	2'028	2'009	2'115	2'192	2'172	2'151	1.04
6	1'649	1'578	2'046	2'009	1'889	2'028	2'028	1.23
7	1'215	1'269	1'521	1'352	1'521	1'521	1'521	1.25
8	2'249	3'070	2'753	3'098	3'098	3'125	3'098	1.37
Promedio	1'800	1'982	1'916	2'107	2'152	2'053	2'162	1.20
C.V.	20	26	22	24	22	24	21	----
Barra de Roble	2'285	1'747	1'190	1'022	887	817	1'401	0.61

% Medio de retención = CICLO 6 / CICLO 0

C V. = % de variación

Tabla IV.7.- Resumen de ciclos acelerados de Módulos de Elasticidad (perpendicular a la cara) en el área plana.

Fuente: Polywood, Inc. 2002



Gráfica IV.1.- Barras comparativas promedio del Módulo de Elasticidad en Compresión (MOE).

Fuente: Polywood, Inc. 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

b).- Dureza superficial de las muestras ensayadas.

MUESTRA No.	CICLOS DUREZA SUPERFICIAL (Kg)							% MEDIO DE DUREZA
	0	1	2	3	4	5	6	
1	641	730	793	756	163	732	696	1.09
2	334	549	691	263	663	615	430	1.28
3	668	937	848	909	886	902	617	0.92
4	533	506	645	798	879	714	430	0.81
5	344	380	400	721	614	541	658	1.91
6	246	279	526	640	569	80	674	2.74
7	246	270	565	428	362	707	665	2.70
8	534	528	267	467	491	811	223	0.42
Promedio	443	523	592	623	578	638	549	1.24
C.V	38	43	33	35	42	39	31	---
Barra de Roble	257	192	128	115	92	92	65	0.25

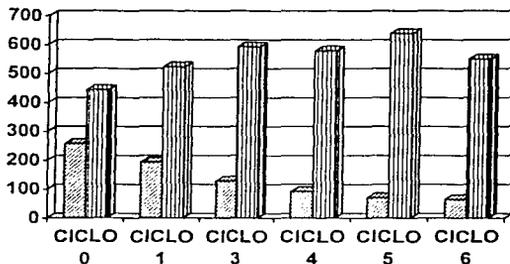
% Medio de dureza = CICLO 6 / CICLO 0

C.V. = % de variación

Tabla IV.8.- Valores obtenidos de la prueba de dureza superficial.

Fuente: Polywood, Inc 2002

Dureza superficial (Kg)



Gráfica IV.2.- Barras comparativas promedio de la dureza superficial.

Fuente: Polywood, Inc 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

c).- Pruebas de resistencia de clavos para sujeción.

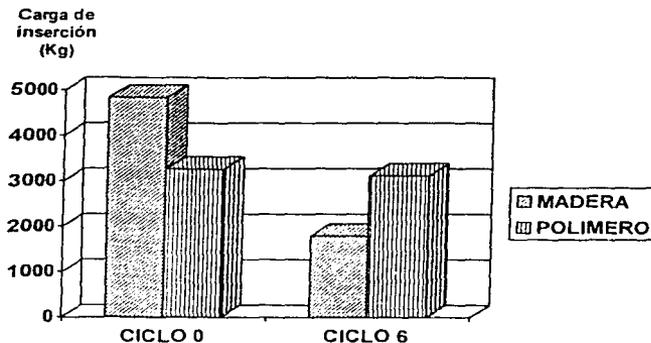
MUESTRA No.	DE INSERCIÓN (kg)		RESISTENCIA LATERAL (kg)		DE RETIRO (kg)	
	CICLO 0	CICLO 6	CICLO 0	CICLO 6	CICLO 0	CICLO 6
1	4'709	3'696	619	1'134	1'042	2'608
2	2'865	2'639	1'071	1'450	1'227	1'375
3	2'460	4'434	1'317	1'467	1'817	2'085
4	3'989	2'471	454*	1'782	907	1'261
5	3'489	2'515	1'735	1'907	1'102	1'223
6	3'600	2'332	1'086	1'474	1'053	1'084
7	2'427	3'210	1'217	1'108	1'009	1'062
8	3'269	3'611	1'686	1'335	1'407	1'478
Promedio	3'260	3'114	1'148	1'457	1'195	1'522
C.V.	22	24	39	19	23	36
Barra de Roble	4'834	1'787	1'569	762	3'872	866

* Muestra rota o abierta

Los valores obtenidos es un promedio para dos pruebas.

Tabla IV.9.- Valores obtenidos de la prueba de resistencia de inserción de clavos.

Fuente: Polywood, Inc 2002

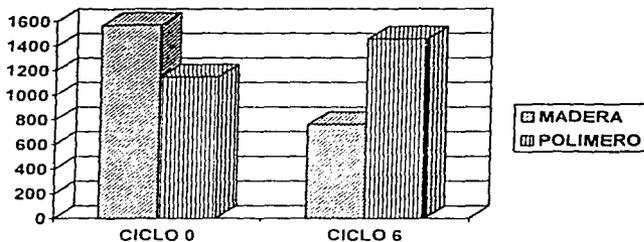


Gráfica IV.3.- Barras comparativas promedio de la carga de inserción de clavos.

Fuente: Polywood, Inc 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

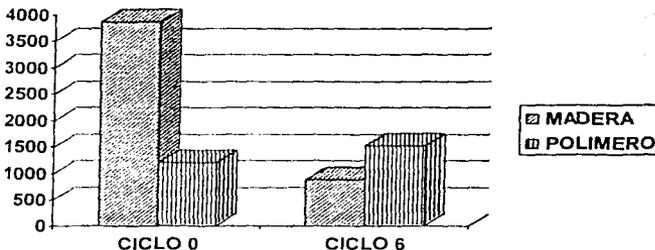
Resistencia lateral
(Kg)



Gráfica IV.4.- Barras comparativas promedio de la resistencia lateral de clavos.

Fuente Polywood, Inc 2002

Fuerza de retiro
(Kg)



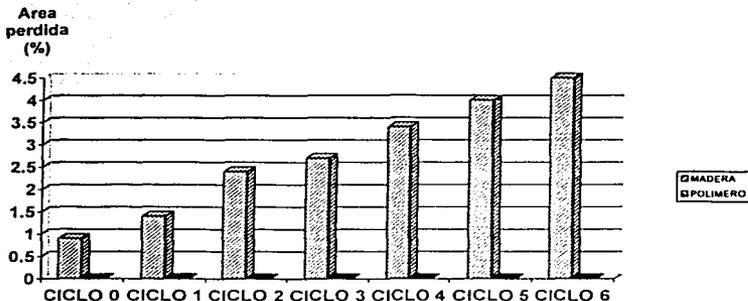
Gráfica IV.5.- Barras comparativas promedio de las fuerzas de retiro directo de clavos.

Fuente. Polywood, Inc 2002

d).- Porcentaje de área perdida por desgarre en la prueba de inserción y retiro de clavos.

	CICLOS						
	0	1	2	3	4	5	6
DURMIENTE DE MADERA	0.9	1.4	2.3	2.7	3.4	4	4.5
DE POLIMERO	0	0	0	0	0	0	0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica IV.6.- Barras comparativas del porcentaje de superficie perdida por desgarre en la inserción y retiro de clavos.

Fuente Polywood, Inc. 2002

e).- Evaluación desarrollada por el Centro de Pruebas de Aplicación Nacional de Energía Eléctrica de Georgia, Tech.

Esta prueba se realiza con la finalidad de tener los valores de aislamiento eléctrico que poseen los durmientes de polímero para garantizar que no existe transmisión de energía eléctrica hacia los diferentes elementos que conforman el sistema de vía, ya que el durmiente soporta la barra guía, que es la portadora de la energía eléctrica para alimentar a los trenes.

METODO	MEDICION	CONDICION EN SECO	CONDICION EN HUMEDO
IEEE 4, 1995	Descarga de corriente alterna (KVA)	116 Máximo 96 Mínimo	41 Máximo 34 Mínimo
ASTM G-53	Intemperismo, Rotura, Desgarre (% área) (Tiempo 1000 horas)	0.0	0.0
	Peso alcanzado con inmersión en agua (%) (66.75 horas)	---	0.322 Máximo 0.026 Mínimo
NEETRAC std.	Arqueo a Alta Tensión (Microamperes)	0.0	0.0

Tabla IV.9.- Pruebas realizadas a los durmientes de polímero por NEETRAC.

Fuente. Polywood, Inc. 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

IV.6.3.- Pruebas de intemperie acelerada dirigidas por Poo Chow, Director de Pruebas Físicas de la Universidad de Illinois, Laboratorios de Productos de Madera.

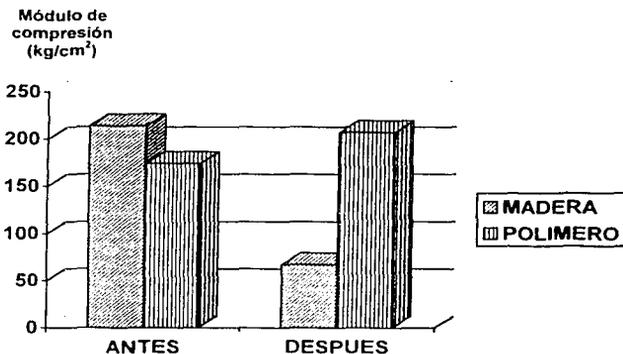
Las muestras ensayadas fueron expuestas por 2000 horas en un Weatherómetro de arco-xenon, y expuestas a la luz y rocío de agua intermitente de acuerdo al método 1 G-26 (Grupo de Compuestos y Plásticos) del Departamento de Ingeniería Civil de la Rutgers University.

Los siguientes resultados fueron obtenidos con las mismas fuerzas de diseño ($F=10.88$ ton.), que para los ciclos acelerados.

Esta prueba representa las condiciones ambientales a las que estarán sometidos los durmientes de polímero.

a).- Módulo de Compresión.

DURMIENTE	MÓDULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESION (kg/cm^2)			
	ANTES DE LA EXPOSICION		DESPUES DE LA EXPOSICION	
	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO
DE MADERA	259	214	81	67
DE POLIMERO	210	174	251	207



Gráfica IV.7.- Barras comparativas del Módulo de Elasticidad en Compresión mínimo.

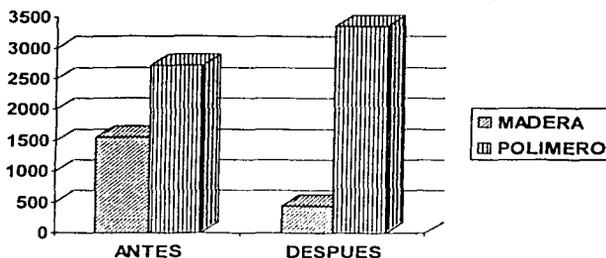
Fuente: Polywood, Inc 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

b).- Dureza superficial.

	DUREZA SUPERFICIAL (kg)			
	ANTES DE LA EXPOSICION		DESPUES DE LA EXPOSICION	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
DURMIENTE DE MADERA	1'877	1'551	521	431
DE POLIMERO	3'286	2'714	4'068	3'360

Dureza superficial (kg)



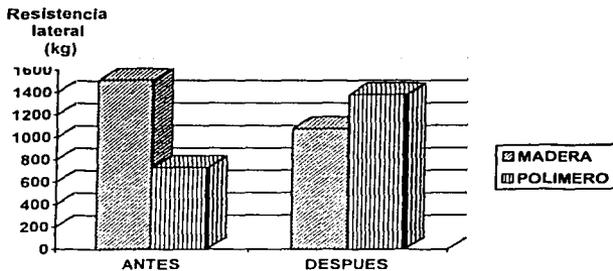
Gráfica IV.8.- Barras comparativas de la prueba de dureza superficial mínima.

Fuente: Polywood, Inc. 2002

c).- Resistencia lateral de clavos.

	RESISTENCIA LATERAL (kg)			
	ANTES DE LA EXPOSICION		DESPUES DE LA EXPOSICION	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
DE MADERA	1'825	1'508	1'304	1'077
DE POLIMERO	9'049	732	1'669	1'379

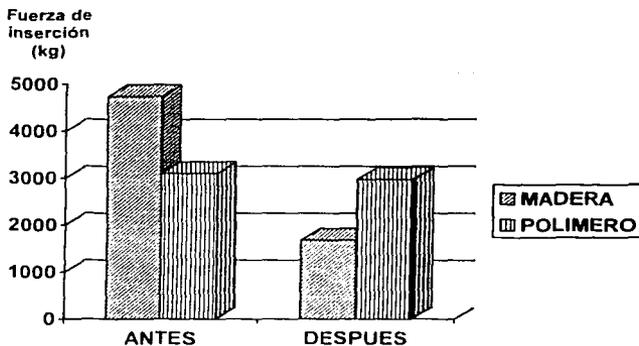
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica IV.9.- Barras comparativas de la resistencia lateral de clavo mínima.
Fuente: Polywood, Inc. 2002

d).- Fuerza de inserción de clavos.

DURMIENTE	FUERZA DE INSERCIÓN (kg)			
	ANTES DE LA EXPOSICIÓN		DESPUES DE LA EXPOSICIÓN	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
DE MADERA	5737	4739	2034	1680
DE POLIMERO	3755	3102	3598	2973



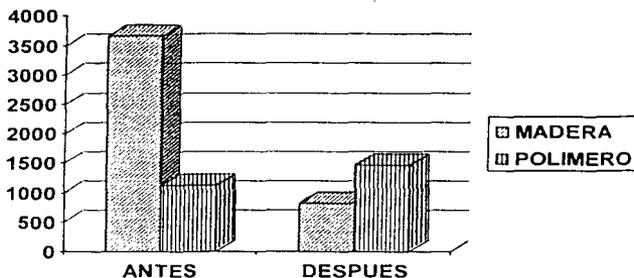
Gráfica IV.10.- Barras comparativas de la fuerza de inserción de clavos mínima.
Fuente: Polywood, Inc. 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

e).- Fuerza de retiro de clavos.

	FUERZA (kg)			
	ANTES DE LA EXPOSICION		DESPUES DE LA EXPOSICION	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
DURMIENTE DE MADERA	4'432	3'662	991	818
DE POLIMERO	1'359	1'120	1'773	1'465

Fuerza de retiro (kg)



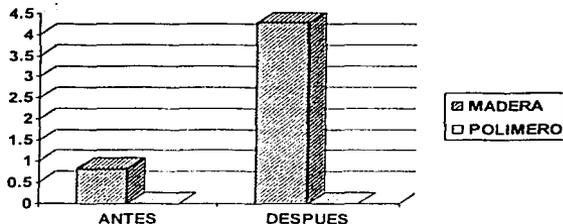
Gráfica IV.11.- Barras comparativas de la fuerza de retiro de clavos mínima.
Fuente Polywood, Inc. 2002

f).- Pérdida de área por desgarre (área circundante al contorno del agujero).

	AREA PERDIDA (%)			
	ANTES DE LA EXPOSICION		DESPUES DE LA EXPOSICION	
	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO
DURMIENTE DE MADERA	1.03	0.85	5.17	4.27
DE POLIMERO	0.00	0.00	0.00	0.00

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Pérdida
de área
(%)



Gráfica IV.12.- Barras comparativas del porcentaje mínimo de pérdida de área por desgarre.
Fuente Polywood, Inc. 2002

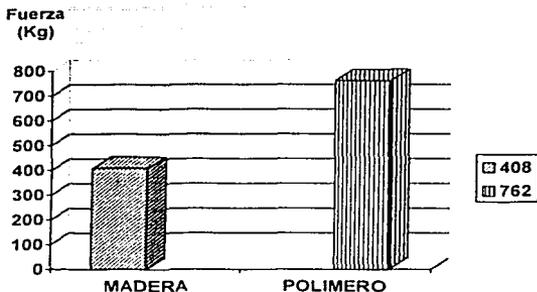
g).- Prueba de extracción de tornillos y pijas.

Esta prueba fué realizada en una máquina conocida como "Baldwin-Emery Universal", los especímenes ensayados fueron de 15.24x15.24 cm. (6x6 pulgadas). Los tornillos fueron introducidos a una profundidad de 5.08 cm. (2 pulgadas), en un agujero guía de 0.3968 cm. (5/8 pulgadas). Los clavos fueron de 2.54 mm. (1/10 pulgadas) a una profundidad de 5.08 cm. (2 pulgadas). Las fuerzas requeridas para retirar cada muestra, fueron las siguientes:

g.1).- Extracción de tornillos.

MUESTRA No.	FUERZA (Kg)	
	MADERA (PINO TRATADO)	POLIMERO
1	429	757
2	408	739
3	390	757
4	390	776
5	426	771
Promedio	408	762

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

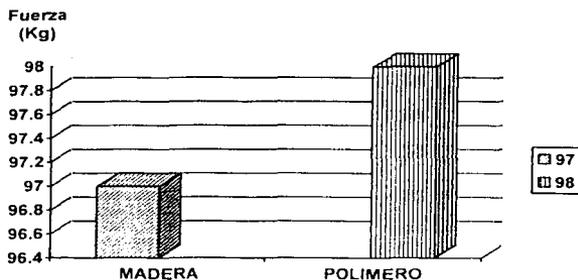


Gráfica IV.13.- Barras comparativas promedio de la fuerza requerida para la extracción de tornillos.

Fuente Polywood, Inc. 2002

g.2).- Extracción de pijas.

MUESTRA No.	FUERZA (Kg)	
	MADERA (PINO TRATADO)	POLIMERO
1	429	757
2	408	739
3	390	757
4	390	776
5	426	771
Promedio	408	762



Gráfica IV.14.- Barras comparativas promedio de la fuerza requerida para la extracción de pijas.

Fuente Polywood, Inc. 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

h).- Cambio de color.

Las claves de valores fueron determinadas a través de la utilización de una "escala de gris" para evaluaciones de cambio de color.

El desarrollo de las pruebas de clavos-pijas y de color fueron realizadas por "United States Testing Company, Inc".

DURMIENTE	VALORES			
	TIEMPO (HORAS)			
	500	1000	1500	2000
DE MADERA	1	1	1	1
DE POLIMERO	5	4	3	2

Clave de valores

- 5 Muy poca o ninguna alteración
- 4 Ligera alteración
- 3 Alteración notable
- 2 Considerable alteración
- 1 Mucha alteración

Tabla IV.10.- Valores obtenidos en la prueba de cambio de color.

Fuente: Polywood, Inc 2002

IV.6.4.- Elementos mecánicos de un durmiente instalado en las vías del Metro.

a).- Cálculo de los elementos mecánicos.

Condiciones:

En este análisis, también llamado de "vencimiento estático" se considera una fuerza vertical considerando tren estacionado o fuerza de frenaje y arranque; esta es la carga máxima (de diseño) que puede soportar un durmiente debido a que la carga disminuye cuando el tren esta en movimiento.

Se analiza el durmiente de sección transversal más desfavorable (de menor momento de inercia), para tener el valor máximo de esfuerzos a flexión y a cortante.

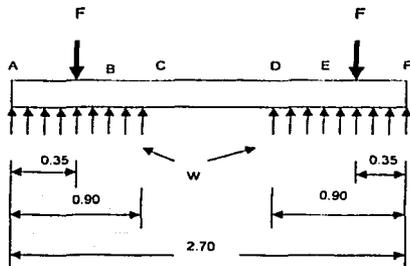
Los puntos de aplicación de las fuerzas (cargas concentradas) se localizan sobre los ejes de las pistas metálicas de rodamiento

El compactado del balasto se realiza dividiendo en tres tramos la longitud total del durmiente, se compacta al 100% en los tercios extremos, el tramo central no se compacta, por lo que se considera que en este tramo no existe apoyo del durmiente sobre el balasto.

Los valores de los elementos mecánicos son los mismos para todos los tipos de durmiente (tipo "O", "S" y "OS"), debido a que las cargas de diseño son constantes (cargas de diseño en mantenimiento)

El material es homogéneo con comportamiento elástico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Reacciones:

$$\sum M_B = (w \times 0.9) \times 0.1 + (w \times 0.9) \times 1.9 - (12.5 \times 2) = 0$$

$$0.09w + 1.71w - 25 = 0$$

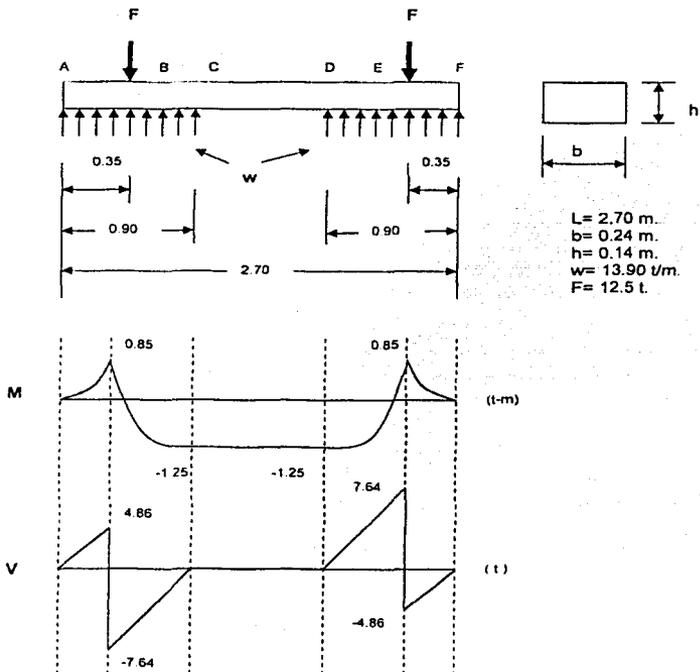
$$w = 13.90 \text{ t/m}$$

Momentos:		Cortantes:	
Tramo A-B		Tramo A-B	
$Mx = (13.9/2) X^2$		$V = 13.9X$	
si $X = 0$ $M = 0.00 \text{ t-m}$		si $X = 0$ $V = 0$	
$X = 0.35$ $M = 0.85 \text{ t-m}$		$X = 0.35$ $V = 4.87 \text{ t}$	
Tramo B-C		Tramo B-C	
$Mx = (13.9/2) X^2 - 12.5(X-0.35)$		$V = 13.9X - 12.5$	
si $X = 0.35$ $M = 0.85 \text{ t-m}$		si $X = 0.35$ $V = -7.64 \text{ t}$	
$X = 0.90$ $M = -1.25 \text{ t-m}$		$X = 0.90$ $V = 0 \text{ t}$	
Tramo C-D		Tramo C-D	
$Mx = -12.5(X-0.35) + 12.5(X-0.45)$		$V = -12.5 + 12.5$	
si $X = 0.90$ $M = -1.25 \text{ t-m}$		si $X = 0.90$ $V = 0 \text{ t}$	
$X = 1.35$ $M = -1.25 \text{ t-m}$ (en el centro)		$X = 1.35$ $V = 0 \text{ t}$	
$X = 1.8$ $M = -1.25 \text{ t-m}$		$X = 1.8$ $V = 0 \text{ t}$	
Tramo D-E		Tramo D-E	
$Mx = -12.5(X-0.35) + 12.5(X-0.45) + (13.9/2)(X-1.8)^2$		$V = 13.9(X-1.8)$	
si $X = 1.8$ $M = -12.5 \text{ t-m}$		si $X = 1.8$ $V = 0$	
$X = 2.35$ $M = 0.85 \text{ t-m}$		$X = 2.35$ $V = 7.64 \text{ t}$	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tramo E-F		
$Mx = -12.5(X-0.35) + 12.5(X-0.45) + (13.9/2)(X-1.8)^2 - 12.5(X-2.35)$		$V = 13.9(X-1.8) - 12.5$
2.35x5x2.70		
si $X = 2.35$ $M = 0.85$ t-m $X = 2.70$ $M = 0.00$ t-m		Si $X = 2.35$ $V = -4.87$ t $X = 2.70$ $V = 0$ t

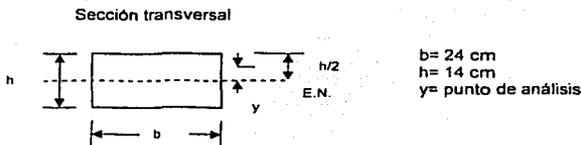
b).- Diagramas de Momento (M) y Cortante (V), obtenidos de acuerdo a las cargas impuestas sobre un durmiente.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

c).- Cálculo de los esfuerzos actuantes.

Se analizará el durmiente de tipo "O" por tener dimensiones geométricas menores, lo que representa condiciones más desfavorables.



A flexión	A cortante
$\nabla = \frac{M}{I} y \quad (\text{kg/cm}^2)$ <p>si $y = h/2$, $M_{\text{máx}}$</p> $M_{\text{máx}} = 1.25 \text{ t-m} = 125'000 \text{ kg-cm}$ $I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{cm}^4)$ $I = (24 \times 14^3) / 12 = 5'488 \text{ cm}^4$ $\nabla_{\text{máx}} = (125'000 \times 7) / 5'488 = 159 \text{ kg/cm}^2$	$v = \frac{VQ}{Ib} \quad (\text{kg/cm}^2)$ <p>si $y = 0$, $v_{\text{máx}}$</p> $V_{\text{máx}} = 7.64 \text{ t} = 7640 \text{ kg}$ $Q = b/2[(h/2)^2 - y^2]$ $Q_{\text{máx}} = (24/2)[(14/2)^2] = 588 \text{ cm}^3$ $v_{\text{máx}} = (7640 \times 588) / (5488 / 24) = 34 \text{ kg/cm}^2$

A continuación se detallan los valores de los esfuerzos obtenidos contra los proporcionados por el fabricante:

ESFUERZOS	OBTENIDOS (kg/cm ²)	FABRICANTE (kg/cm ²)
A flexión	159	211
A cortante	34	105

De acuerdo a la tabla comparativa se observa que los valores proporcionados por el fabricante son mayores que los obtenidos, por lo que estructuralmente los durmientes de polímero se pueden considerar aptos para su utilización en las vías del Metro y otros sistemas ferroviarios

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

IV.7.- Líneas de ferrocarril con durmientes de polímero aprueba en los Estados Unidos.

LÍNEA	FECHA DE INSTALACIÓN	NO. DE DURMIENTES
Ferrocarril de Carga BTI. Rivertown, Wyoming	03-Febrero-2000	20
Línea de Pasajeros de Riverfront. Nueva Orleans.	01-Noviembre-2000	33
Ferrocarril Union Pacific Railroad. Avondale, Louisiana	09-Marzo-2001	25
Ferrocarril Cinturón Público. Nueva Orleans	09-Abril-2001	25
Ferrocarril Exportación de Mississipi. Lucedale	03-Mayo-2001	50
Línea Blue Mountain Energy Rangely, Colorado	30-Agosto-2001	19



Foto IV.1.- Línea Mississipi Export (Lucedale, EUA), tramo con durmientes de plástico a prueba.



Foto IV.2.- Instalación de durmientes de polímero. Línea Riverfront (Nueva Orleans, EUA).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Foto IV.3.- Instalación de durmientes de polímero. Línea Union Pacific Railroad (Lousiana, EUA).



Foto IV.4.- Instalación de durmientes de plástico con equipo mecánico. Línea Union Pacific Railroad (Lousiana, EUA).



Foto IV.5.- Colocación de accesorios de fijación de riel sobre un durmiente de polímero. Línea Union Pacific Railroad (Lousiana, EUA).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.8.- Tramos del Metro de la Ciudad de México con condiciones para la instalación de los durmientes de polímero.



Foto IV.6.- Tramo de vía con durmientes de madera. Línea 4 (elevada), Metro de la Ciudad de México.



Foto IV.7.- Estado que guardan los durmientes de madera al término de su vida útil. Línea 5 (tramo superficial), Metro de la Ciudad de México.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

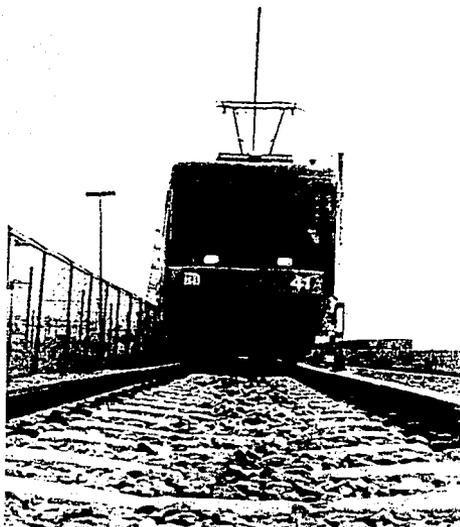


Foto IV.8.- Tramo superficial con durmientes de concreto, Línea "A", Metro Férreo.
Ciudad de México.

TESIS CON
FALLA DE CEMENTO

ANALISIS DE BENEFICIO-COSTO

IV.1.- Evaluación del proyecto.

La evaluación de proyectos de inversión en general, requiere tomar en consideración aspectos de muy diversa naturaleza. unos objetivos cuantificables, algunos no cuantificables y otros subjetivos o intangibles. Entre ellos se encuentran, en orden arbitrario: los aspectos técnicos, financieros, sociales, políticos, ambientales y legales. Dentro de cada uno de estos aspectos existen elementos que llevan asociados beneficios y costos, y de ellos algunos pueden ser puestos en su equivalente monetario y otros difícilmente pueden estimarse en pesos y centavos.

En todos los casos, los elementos intangibles o no cuantificables de un proyecto deben identificarse, analizarse y tomarse en cuenta dentro de la evaluación de todos los elementos en la inversión, aunque en su presentación solamente aparezcan en forma descriptiva; éstos deben contener sus ventajas y desventajas que traerán como consecuencia de la implantación de todo proyecto, ya que en muchas ocasiones se ha observado que estos elementos se convierten en factores clave para la toma de decisiones, sobretudo cuando prevalece el criterio de equidad social.

Existen muchos métodos económicos para evaluar materiales de nuevas tecnologías. Cuando un proyecto tiene objetivos que no son cuantificables, al tomar las decisiones se utilizan métodos de decisión multivariable para llevar a cabo la evaluación de las alternativas. Como es sabido en el sector público la evaluación de un proyecto se hace teniendo como objetivo principal, el tener beneficios que reflejen un servicio o una obra de bienestar social, etc., para la comunidad. En el sector privado esta etapa se desarrolla fijando como primordiales los objetivos de producción y rentabilidad. Estos métodos ayudan a determinar si el proyecto en estudio está siendo benéfico y/o ahorra lo suficiente y que justifica el costo de ejecución de dicho proyecto. Algunos de estos ejemplos son: relación beneficio-costo (ahorro-inversión), costo del ciclo de vida, beneficios netos (ahorros)

La evaluación de cada proyecto se realiza con la intención de tener los máximos rendimientos y los mínimos costos de mantenimiento en la etapa de operación y durante la vida útil de la obra, independientemente si la inversión proviene del sector público o privado.

V.2.- Relación Beneficio-Costo.

La relación beneficio/costo es el cociente que resulta de dividir los beneficios actualizados a una fecha establecida entre los costos actualizados a esa misma fecha y con la misma tasa de descuento. Es una medida de la rentabilidad de un proyecto que indica cuánto reditúa cada unidad monetaria invertida en él.

La relación beneficio/costo es invariante en el tiempo, su valor siempre es el mismo, no importando el momento elegido para realizar la actualización.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una expresión general que se emplea para el cálculo de este concepto es la siguiente:

$$B/C = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} B_k (1+i)^{-k}}{\sum_{k=0}^{t-1} C_k (1+i)^{-k}}$$

B=Beneficios
C=Costos
k=Número de años 1, 2, 3,...
i=Porcentaje de interés

En la introducción de una nueva tecnología existe incertidumbre en el aspecto de obtener beneficios a corto o a largo plazo, debido a que hay varios factores que podrían influir en el buen funcionamiento para el cual dicho producto nuevo fué fabricado.

En la implementación de durmientes de materiales de polímero dentro de las vías del Metro, en principio podría pensarse en los beneficios de durabilidad en comparación con los durmientes de madera y una menor densidad que poseen frente a los durmientes de concreto. La densidad de un durmiente de madera es aproximadamente similar a la de un durmiente de plástico, por lo que en este aspecto sería conveniente su instalación en los tramos que sea necesario no aumentar el peso de la estructura en general (tramos elevados).

Adicionalmente hay que señalar que en la práctica resulta más fácil la instalación de durmientes tipo "S" (de Soporte) de madera en combinación con los de concreto de tipo "O" (Ordinario), teniendo con esto una ventaja más de los durmientes de polímero en su instalación, por la geometría que presentan, que es similar a la de los durmientes de madera. Este tipo de durmientes no presentan dificultades en su instalación tanto para tipo "S" y tipo "O", esto debido a la flexibilidad que tienen para ser perforados y colocarles el zócalo metálico, donde va montado el aislador de la barra guía, contrario a los de concreto, que deben ser más largos, para cumplir con su función, haciendo que el elemento aumente su costo y consecuentemente su peso.

Otra de las ventajas que ofrecen los durmientes de polímero es que no se necesita maquinaria especial para su instalación, por lo que se puede emplear el mismo equipo y maquinaria para realizar el trabajo de sustitución de estos elementos.

Haciendo una comparación de pesos de los durmientes de polímero contra los de concreto y de madera en relación a la densidad que tiene cada uno. La comparación se realiza entre el durmiente de concreto de menor peso (biblock) contra el de polímero:

DURMIENTE	PESO (kg)
De concreto	245 - 378
De madera	85 - 105
De polímero	85 - 100

No. de durmientes por km (en grupos de 4: 3 de tipo "O" y 1 de tipo "S"):

Separación entre ejes de durmientes: 75 0 cm para tramo recto entre tipo "S"- "O" y "O"- "O"

Longitud total por grupo = 300 cm

No. de grupos/km = 1000m/3m = 333.33

Peso de durmientes de concreto/grupo = (3x245) + (1x310) = 1045 ton.

Peso de durmientes de polímero = (3x85) + (1x95) = 350 ton.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Peso de durmientes de concreto/km. = $333.33 \times 1045 = 348'330$ kg. = 348.33 t.

Peso de durmientes de polímero/km. = $333.33 \times 350 = 116'665$ kg. = 116.66 t.

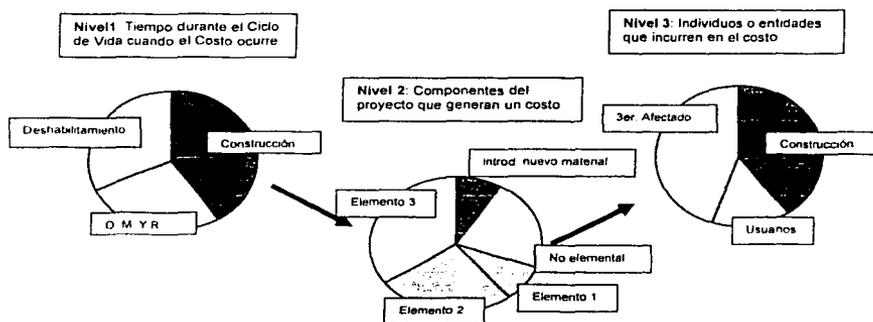
Diferencia de pesos = $231.7 \times 2 = 463.5$ ton/km. (para ambos sentidos)

Diferencia de pesos en porcentaje = $(116.66/348.33)(100) = 33.49$ %

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa una diferencia de pesos considerable, por lo que en el aspecto de la densidad se recomendaría la instalación de los durmientes de polímero a los de concreto, sobre todo para aligerar las estructuras de tramos elevados.

V.3.- Método del Costo de Ciclo de Vida.

El método de análisis de costo de ciclo de vida de los materiales nuevos o de nuevo lanzamiento entre los materiales de polímero tiene tres características principales, este método fue presentado y desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST), está enfocado a la aplicación de nuevos materiales en la construcción, se considera un método general que puede ser aplicado en proyecto no específicos de infraestructura civil, a continuación se muestra el esquema propuesto:



Gráfica IV.1.- Esquema de clasificación de costos (Costos del Proyecto Agrupados).

Fuente: Life Cycle Costs of New Materials, Journal of Infraestructura Systems, 1997

La primera es una propuesta basada sustancialmente en el proyecto, es decir, este método calcula los costos del ciclo de vida útil de estructuras típicas, en este caso analizar la vida útil del durmiente de polímero, desde su instalación en las vías hasta su sustitución, en forma analítica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En segundo término, el método permite al diseñador elegir cualquier material de construcción que satisfaga los requerimientos estructurales del proyecto, por ejemplo realizar las comparaciones entre un durmiente fabricado con material convencional contra el de polímero. Incluyendo todas las propiedades mecánicas que posee cada material.

La tercera característica relevante de este método es que incluye una clasificación de costos¹, el cual permite al diseñador comparar las ventajas y desventajas intrínsecas del costo de ciclo de vida de un material nuevo contra los de materiales convencionales; en este aspecto se deberán considerar todos los costos que se pueden presentar durante todo el proceso de desarrollo del proyecto.

La clasificación¹ de costos que se presenta se divide en tres niveles, donde se ubican los diferentes costos, dependiendo en que parte del proyecto se originan:

El Análisis del Costo de Ciclo de Vida (ACCV) consiste en evaluar varias alternativas de inversión para cuantificar el costo óptimo en cuanto a la inversión de capitales a través de elección de un período de análisis del costo. Para estructuras fabricadas con materiales compuestos, este tipo de costos ya están incluidos en lo referente a costo inicial, costos de rehabilitación y costos de usuario.

La clave en cualquier ACCV está en cuantificar las variables críticas consideradas en el análisis que deben ser actualizadas y apegadas a la realidad como sea posible. Desde que la mayoría de las variables no tiene valores definidos, es necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad para poder identificar a éstas, que pueden impactar significativamente el resultado de dicho análisis. El análisis de sensibilidad consiste en identificar los valores más altos y más bajos, es decir, es un método que estudia los fenómenos más desfavorables asignándoles valores a las variables que son consideradas críticas y las evalúa de acuerdo al cambio en el costo de vida útil para cada uno de estos valores.

El método contiene los siguientes pasos que se deben analizarse detalladamente para la aprobación de un proyecto donde se aplicará algún material de polímero:

- 1 - Definir el objetivo del proyecto y los requerimientos técnicos.
- 2 - Identificar las alternativas que satisfagan el objetivo y los requerimientos del proyecto
- 3 - Establecer hipótesis básicas para el análisis aplicables a todas las alternativas.
- 4 - Identificar, clasificar y estimar todos los costos que puedan ocurrir a lo largo del ciclo de vida del proyecto en estudio.
- 5 - Calcular el costo de ciclo de vida de cada alternativa.
- 6 - Realizar análisis de sensibilidad.
- 7 - Comparar las diversas alternativas
- 8 - Considerar otros efectos del proyecto
- 9 - Elegir la mejor alternativa.

En el primer paso, el objetivo principal es la sustitución de un durmiente con más período de vida útil y con una densidad aceptable.

En la identificación de alternativas, se ha observado que los materiales compuestos cumplen los requerimientos estructurales que debe cumplir un durmiente para su instalación en un sistema, por lo que se opta por este material.

En el paso número tres, la estimación de los parámetros que deben reunir los elementos estos pueden ser los retrasos que pueden ocasionar en la instalación o sustitución de los durmientes de plástico, que son insignificantes, debido a que los trabajos de mantenimiento del sistema de vías se realizan en horas que no afectarán al usuario.

¹ fuente: Life Cycle Costs of New Materials, Journal of Infrastructure Systems, 1997



V.4.- Clasificación de costos.

En el cuarto paso, el método compara las alternativas de los materiales de construcción, contabilizando todos los costos y ayuda a categorizar todas las actividades del proyecto. Además desarrolla una clasificación de costos:

La clasificación de costos que se presenta se divide en tres etapas que a la vez se dividen en niveles dependiendo en que parte del proyecto se originó dicho costo:

- a).- Costos de construcción.
- b).- Costos de operación, mantenimiento y reparación.
- c).- Costos de destrucción y deshabilitamiento.

El método de análisis de costo de ciclo de vida de los materiales nuevos o de nuevo lanzamiento entre los materiales de polímero tiene tres características principales, que a continuación se detallan.

La primera es una propuesta basada sustancialmente en el proyecto, es decir, este método calcula los costos del ciclo de vida útil de estructuras típicas, en este caso analizar la vida útil del durmiente de material compuesto, desde su instalación en las vías hasta su sustitución, en forma analítica.

En segundo término, el método permite al diseñador elegir cualquier material de construcción que satisfaga los requerimientos estructurales del proyecto, por ejemplo realizar las comparaciones entre un durmiente fabricado con material convencional contra el de polímero, incluyendo todas las propiedades mecánicas que posee cada material.

La tercera característica relevante de este método es que incluye una clasificación de costos, el cual permite al diseñador comparar las ventajas y desventajas intrínsecas del costo de ciclo de vida de un material nuevo contra los de materiales convencionales; en este aspecto se deberán considerar todos los costos que se pueden presentar durante todo el proceso de desarrollo del proyecto.

V.5.- Costos de introducción de nuevas tecnologías.

En el quinto paso los costos considerados son los generados por la fabricación de los durmientes, pruebas de laboratorio, transportación a corta y larga distancia (si es de importación) hasta su aceptación. Algunos ejemplos específicos de estas actividades^a son:

- ✓ Pruebas de laboratorio del material
- ✓ Consultoría externa
- ✓ Pruebas destructivas
- ✓ Pruebas a gran escala
- ✓ Pruebas no destructivas
- ✓ Proyectos de demostración

^a Rosen, H. J. Bennett. "Construction Material Evaluation and Selection" Nueva York, 1970

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la implementación del durmiente de plástico, deben contemplarse los costos de prueba in situ y monitoreo en los lugares de instalación y clasificar a éstos, como costos de introducción de este elemento de vía fabricado con material no convencional; por lo tanto este costo es imprescindible en el análisis de los costos. Además éste, nos permitirá comparar los costos a corto y largo plazo empleando durmientes de polímero contra los durmientes de material tradicional.

En el corto plazo probablemente, este material generará costos adicionales debido a su diseño, y fabricación, ya que es diferente sobre todo en el proceso de manufacturación, algunos de estos ejemplos son: tiempo perdido con los fabricantes, diseñadores y especialistas en la materia y la evaluación del comportamiento del durmiente como elemento estructural. En el largo plazo estos costos pueden desaparecer en caso de que el durmiente de polímero obtenga un comportamiento aceptable durante su vida útil

El paso 6 se considera parte fundamental para evaluar los nuevos materiales de construcción como son los productos de polímero. Los costos generados del desarrollo técnico son inciertos y este método atiende esta incertidumbre, es decir que los costos de fabricación de un durmiente de materiales compuestos teóricamente puede resultar menos confiable que el costo de un durmiente de material convencional, por lo que previene diversos costos de fenómenos posibles, por ejemplo, que el durmiente de polímero falle antes de la finalización de su período de vida útil, esto ocasionaría gastos no contemplados inicialmente en el proyecto, con la sustitución de otro elemento.

En el paso 7, se lleva a cabo la clasificación de costos que permite al analista calcular las ventajas y desventajas de cada material en términos de costo de ciclo de vida, esto es, que al realizar las comparaciones en cuestión de costos, entre un durmiente tradicional y uno de plástico, conociendo el total de los costos posibles a generar de cada uno de ellos se podrá decidir si la alternativa de fabricar durmientes de polímero es factible

El paso 8 lleva a cabo el análisis de otros conceptos que no pueden ser cuantificados; por ejemplo, considerar que un durmiente de polímero no pueda ser aceptado en términos de estética o que pueda tener algunas emisiones ambientales.

Después de haber realizado un análisis exhaustivo de todos los pasos del método, el paso 9 es el que decide si la propuesta presentada de introducir un durmiente de polímero, se presenta como viable o se rechaza por no ser factible su implantación. Por los resultados obtenidos en las pruebas se presenta como factible, con beneficios a largo plazo.

El costo del ciclo vida útil de una alternativa es representada por cada costo presente o su equivalente uniforme de costo anual de todos los gastos presentes y futuros asociados con la alternativa. La ecuación³ para calcular el costo de ciclo de vida útil de una alternativa en día presente en dólares es la siguiente:

$$VP = \sum_{n=0}^T F_n(1+i)^n$$

VP: Valor Presente del Costo de Ciclo de Vida
F: es la suma de todos los gastos en el tiempo "n"
i: es el interés relacionado a la tasa de inflación
T: es el número total de los períodos compuestos en años

³ Newman, Donald G. " Engineering Economist Analysis, Third Edition. Engineering Press, Inc 1998.



V.6.- Ventajas.

Una de las ventajas más importantes que se puede considerar en este aspecto es que nuestro país cuenta con suficientes recursos naturales como el petróleo, carbón y gas natural, principales componentes de los plásticos tanto termoestables como termoplásticos, se podría entonces con facilidad fabricar estos productos en México sin tener que recurrir a la importación, aunado a esto hay que considerar el avance tecnológico en materia química con que se cuenta.

Además existen varios lugares donde se están almacenando varias toneladas de plásticos según datos de instituciones como la Asociación Nacional de Plásticos Reforzados A. C., que con un proceso de reciclado, podrían servir nuevamente como productos de primera calidad sin perder sus propiedades.

En la fabricación de durmientes de madera se tiene que recurrir a la tala de árboles, dañando con esto gravemente a la ecología por el indiscriminado corte de árboles que se realiza. Con la fabricación de durmientes de plástico se estaría protegiendo de alguna manera el aspecto ecológico, a parte de que se fabricarían en nuestro país. Además hay que mencionar que los durmientes que se han estado instalando en todas las líneas del Metro, donde se tienen instalados durmientes de madera, estos provienen de África, haciendo más difícil su adquisición, debido a que se tienen que pagar las correspondientes tarifas por el derecho de importación y con esto su costo se eleva aún más.

Por los datos proporcionados por los fabricantes de los plásticos, es de suma importancia resaltar la densidad que poseen los productos fabricados con materiales compuestos. Una significativa y gran ventaja de los durmientes de polímero es su densidad, ya que podrían sustituir a los elementos fabricados de materiales convencionales, donde su aplicación resultaría muy satisfactoria, sobre todo en el caso de los tramos elevados del Metro donde se necesitan tener estructuras que tengan un peso menor y propiedades mecánicas adecuadas.

Actualmente en la red del Metro se han sustituido los durmientes de madera por los de concreto, sobre todo en los tramos superficiales y elevados en especial la línea 2 y la 4, donde los durmientes están expuestos a la intemperie. Desde los inicios de la operación del Metro todos los durmientes que se instalaron a lo largo de todas las líneas fueron de madera provenientes de África. De acuerdo a los datos estadísticos los durmientes de madera que están expuestos directamente a la intemperie han tenido una vida útil de aproximadamente 15 años, teniendo un periodo de vida útil más largo los que se instalaron dentro de los tramos subterráneos, que es de aproximadamente de 25 años.

Las causas que ocasionan que los durmientes de madera pierdan sus propiedades son diversas, como el clima que es demasiado extremoso, la contaminación, la misma fatiga producida por el paso de los trenes, etc, hacen que dichos durmientes tengan una durabilidad menor a la esperada.

El análisis que se lleva a cabo para la determinación de beneficios y ventajas que pueden proporcionar los durmientes de polímero en comparación con los durmientes tradicionales, está basado fundamentalmente en los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio presentadas en el capítulo anterior. Actualmente, como se mencionó anteriormente se están realizando pruebas de campo instalando prototipos en algunos tramos de vías de ferrocarril en los Estados Unidos con resultados aceptables.

La información obtenida está certificada por dependencias gubernamentales e instituciones educativas dedicadas a la industria química y la construcción, por lo que se puede considerar como una información importante y trascendental. Las pruebas realizadas fueron sometidas a los requisitos que establecen las diversas normas que rigen hasta la fecha, cumpliendo con los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

parámetros que determinan las propiedades tanto de los materiales tradicionales como de nuevos materiales empleados en la construcción.

Tomando en consideración que los durmientes de polímero están fabricados con material no convencional, siendo una innovación tecnológica, éstos pueden presentar diversos aspectos de incertidumbre en su aplicación, aunque se tienen bases para predecir su comportamiento durante su vida útil, teniendo como referencia las pruebas de laboratorio.

Un punto desfavorable que se puede presentar como en toda introducción o implementación de una innovación tecnológica, es el costo que puede generar durante todo el ciclo de vida del proyecto, pasando por todas las etapas desde su fabricación hasta la puesta en marcha, operación y mantenimiento.

V.7.- Cuadro comparativo.

A continuación se presenta una tabla, en la cual se detallan los beneficios, ventajas y desventajas de los durmientes de polímero contra los de materiales convencionales; los parámetros que se emplean para catalogar los conceptos son de manera general, dado que determinan la propiedad o concepto, sólo de una manera descriptiva como es el caso de los costos:

CONCEPTO	DURMIENTES		
	DE CONCRETO	DE MADERA	DE POLIMERO
Resistencia mecánica	Alta	Alta	Alta
Resistencia química	Alta	Regular	Alta
Densidad	Alta	Baja	Baja
Durabilidad	Alta	Regular	Alta
Coefficiente de expansión térmica	Bajo	Bajo	Bajo
Aislante térmico	Bueno	Bueno	Excelente
Costo de producción	Regular	Regular	Alto
Costo de mantenimiento	Regular	Regular	Bajo
1-Reciclado 2-Reciclable	2	2	1 y 2
Vida útil -a la intemperie- (años)	30	15	30
Maquinaria para instalar	Tradicional	Tradicional	Tradicional

Tabla V.1.- Tabla comparativa entre durmientes.

A excepción de los costos de fabricación iniciales los conceptos mostrados marcan una tendencia de que el durmiente de polímero tiene una ligera ventaja sobre los durmientes fabricados con material convencional, tanto en la densidad, propiedades mecánicas y vida útil que son la parte importante del diseñador de estructuras, como de las propiedades químicas que proporcionan la durabilidad. Adicionalmente es un producto que se puede fabricar mediante plásticos reciclados y por el proceso de manufacturación empleado (termoplástico) podrán ser reciclados nuevamente al final de su vida útil.

De acuerdo a la información proporcionada por ACP A.C. el precio de venta de un durmiente de polímero fabricado en nuestro país empleando los mismos materiales, el mismo procedimiento de manufacturación y con las mismas propiedades mecánicas que las presentadas por los fabricantes de los EUA, es aproximadamente de \$1500.00 M. N. (\$150.00 dólares USA); mientras que el precio de los durmientes fabricados con materiales tradicionales oscila entre los \$500.00 a \$700.00 M. N.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.8.- Precios de los componentes de los materiales compuestos.

Las tablas que a continuación se muestran contienen los precios aproximados de algunos componentes más comerciales que se manejan en el mercado, dichos precios varían de acuerdo a las propiedades de cada componente, con esto el fabricante puede seleccionar los materiales para elaborar un producto con propiedades particulares de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto:

RESINA	DENSIDAD (t/m^3)	PRECIO POR KG. (\$)
Poliétileno (PE)	0.90	10.00
Polipropileno (PP)	0.89	12.00
ABS	1.03	14.0-17.0
Poliestireno (PE)	1.14	16.00
Viniléster	1.13	20.00
Materiales de relleno	---	0.25

Tabla V.2.- Precios de las resinas.

Fuente: ACP A C 2002

FIBRA	DENSIDAD (t/m^3)	PRECIO POR KG. (\$)
De vidrio (Roving)	2.46	18.00
De vidrio (Colchoneta)	2.54	22.00
De carbono (varias)	1.74-1.79	80.00-100.00
De aramida (varias)	1.43-1.46	60.00-80.00

Tabla V.3.- Precios de las fibras.

Fuente: ACP A C 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo mostrado a través de los capítulos de este trabajo los productos de materiales compuestos (polímeros o plástico) poseen las características adecuadas para emplearse como elementos estructurales en la infraestructura civil, prueba de ello, es que existen actualmente diversos productos que se han aplicado en la industria de la construcción, con resultados satisfactorios. Por lo que se concluye que la opción de introducir durmientes de polímero en las vías del Metro y otros sistemas ferroviarios es técnicamente factible.

La información presentada sobre las pruebas realizadas a los modelos de durmientes de polímero proviene de compañías de gran prestigio en la fabricación de elementos estructurales fabricados con materiales de polímero de los Estados Unidos. Con los datos obtenidos existen los suficientes fundamentos para tener una idea del comportamiento estructural de los durmientes de polímero.

Los modelos de durmiente de polímero pasaron las pruebas a las que fueron sometidos, teniendo con esto una base para tomar una decisión sobre la implementación de durmientes fabricados con materiales compuestos, tanto en el Metro o en cualquier otro sistema de transporte ferroviario.

Actualmente los prototipos instalados a prueba en los tramos de ferrocarril en los Estados Unidos son monitoreados para tener un control y certeza en su funcionamiento, arrojando esta etapa de verificación una información con los resultados deseados; sin presentar agrietamientos o fisuras que pudieran predecir su falla a corto plazo

La densidad que poseen los durmientes de polímero ofrecen una buena opción para ser considerados como aptos para ser instalados en el sistema de vías. La durabilidad como una propiedad química que debe poseer toda estructura expuesta a la intemperie, ésta se encuentra en el durmiente de polímero, por lo que es una de las ventajas a considerar. Adicionalmente, dentro de las propiedades químicas se encuentra la no corrosión de este producto, que es una excelente propiedad de la durabilidad, aumentando así aún más la vida útil del durmiente.

Uno de los puntos importantes que no hay que dejar de mencionar es la facilidad que se tiene dentro de los procesos de fabricación de los productos de polímero, incluido el durmiente fabricado con este material. Además la obtención de la materia prima como componentes de los materiales compuestos, es muy sencilla, dado que se puede hacer de los plásticos de desecho o utilizar los productos originales que son el petróleo, gas, carbón, agua, etc., todos de fácil obtención en nuestro país.

Como se observa en el análisis de ciclo de vida, los costos iniciales que son los de producción de los durmientes de polímero resultan elevados, por lo que en este aspecto no se recomendaría su utilización pero existen otros conceptos que compensarían estos costos, tales como los costos de mantenimiento, período de vida útil, etc. Previendo los posibles beneficios a largo plazo que traería como consecuencia su implantación resulta alentadora esta propuesta. Tomando en consideración que la red del Metro cuenta con varios kilómetros de vías, donde se necesitaría la colocación de miles de durmientes, la fabricación de estos productos en forma masiva compensaría y reduciría los costos de manufacturación.

En nuestro país se ha demostrado que existe capacidad técnica en el área de la química, por lo que también se podrían fabricar aquí esta clase de elementos, sin tener que recurrir a la importación de estos productos en caso de que a futuro se lleguen a instalar de forma definitiva en los sistemas ferroviarios donde actualmente se encuentran a prueba; las vías del Metro o de ferrocarril ofrecen una buena opción para poner a prueba este tipo de durmientes, con previos ensayos de laboratorio

Finalmente al Sistema de Transporte Colectivo "Metro" como dependencia gubernamental, sólo le restaría realizar las especificaciones técnicas correspondientes para adquirir un durmiente de polímero de alta calidad y con ello obtener los beneficios y resultados deseados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

APENDICE A

Publicación traducida de la revista "Modern Plastics" edición de Noviembre de 2002.

EL PROCESADOR ESTA EN EL CARRIL CON DURMIENTES DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).

El sistema de ferrocarriles de los Estados Unidos está empezando a instalar números considerables de durmientes hechos de polietileno reciclado de alta densidad (HDPE). Estos durmientes parecen equilibrar la captura de una buena parte del mercado dominado por la madera y una buena parte del crédito se debe a Henry Sullivan, Presidente de Houston Tx-Based, Tie-Tek, Inc. Un antiguo líder de los compuestos de plástico. Esto se debe a que Sullivan ha seguido una pista inusual, siendo el pionero en la producción de los durmientes.

Después de obtener su doctorado en Ingeniería Química en la Universidad de Nueva York, en 1965, Sullivan se unió a Shell Chemical y llegó a ser Vicepresidente para el negocio de los polímeros incluyendo el polipropileno, el poliestireno y los bloques copolímeros hidrogenados de kratón. A mediados de los 80's él fue un instrumento en la venta del negocio PS de Shell a Hunstman Corp que buscaba reintegrar esa experiencia. Se unió a Hunstman y se convirtió en Vicepresidente

Mientras buscaba oportunidades para materiales reciclados de Hunstman, la idea de usar materiales reciclados llamó su atención. Tanto que dejó Hunstman en 1991 para crear una pequeña empresa llamada "Gaia" en honor al Dios griego de la tierra para desarrollar productos basados en poliolefinos y goma de migajón.

Sullivan compró cinco patentes y equipo de mezcla de extrusión. El producto inicial fue una zapata absorbente para irrigación, pero decidió que las aplicaciones estructurales eran más prometedoras, particularmente los durmientes de ferrocarril.

Los durmientes de ferrocarril atraían por varias razones. Él creía que reciclar daría mayor duración, mejor desarrollo y ser más amigable al medio ambiente que las maderas tratadas con preservativos y a un aceptable precio. Además el mercado es sustancial, pues 15 millones de durmientes en EUA y 75 millones en todo el mundo son reemplazados anualmente.

Sullivan empezó el trabajo sobre los durmientes en 1993 y comenzó las negociaciones con la Union Pacific Railroad, Omaha, Nueva Orleans poco después. Obtener la entrada a los ferrocarriles fue crucial en el aceptable desarrollo de la industria de los durmientes, enfatizó.

La fórmula de los durmientes y el proceso básico de manufactura fueron terminados en 1994. Conteniendo más del 50% de HDPE reciclado y goma de migajón reciclado y filamentos minerales. Los pasos para la colocación son importantes. El material pasa por un solo proceso de atornillamiento y extrusión con un paso realizado para durmientes destinados a la pista balastrada.

La Línea Union Pacific Railroad (UPRR) instaló 2 durmientes en 1996, 250 en 1998, 2000 al siguiente año y 10'000 en un solo lugar en el 2001. Los durmientes han sido instalados en el Transportation Center Technology en Pueblo, Colorado, un lugar de investigación y pruebas dirigidas por la Asociación Americana de Ferrocarriles. Un gran número de ferrocarriles y sistemas de tránsito alrededor del mundo están probando ahora los durmientes de polímero

En el 2000 la línea Union Pacific Railroad acordó comprar 20'000 durmientes de polímero Tie-Tek especialmente en todas sus salidas (estaciones).



El desarrollo de los durmientes de polímero requieren más recursos de los que Gaia podía reunir, esto permitió una unión con la North American Technologies Group (NATK) y la formación de Tie-Tek en 1996 para el mercado de los durmientes de polímero. Para 1998 NATK ha lanzado sus otros negocios a enfocar en Tie-Tek y construir una planta. Esa planta en Houston empezó en Junio del 2000 y ahora fabrica cerca de 5000 durmientes mensuales. Antes de su inicio, los durmientes fueron fabricados en sitio con dados y moldes de Tie-Tek.

Una segunda línea con capacidad de 12'000 durmientes por mes se está agregando en Houston y dará como resultado doblar el personal a más de 40. Una tercera línea en Houston y otra más son planeadas para el 2003. Debido a que cada durmiente pesa 100 kg, poner la producción en diferentes áreas tiene sentido dice Sullivan, para evitar desbaratar los mercados locales del reciclaje.

Para el 2005 Tie-Tek espera ser capaz de producir más de 500'000 durmientes anualmente. Ese nivel de producción consumirá cerca de 2 millones de llantas desechadas y más de 50 millones de libras de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) reciclado. Además cortará 16'000 árboles de buenas maderas y ahorrará la aplicación de 5 millones de libras de Creosota. Alcanzando esta meta se creará un record que seguramente enorgullecerá a Sullivan.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Processor Is On Track With HDPE Rail Ties

U.S. rail systems are starting to install sizeable numbers of cross ties, or sleepers, made of recycled high-density polyethylene. These ties seem poised to capture a good portion of a market dominated by wood (see story on p. 42), and a fair bit of the credit must go to Henry Sullivan, president of Houston, TX-based TieTek Inc., an early champion of plastic ties. It is perhaps fitting that Sullivan has followed an unusual track in becoming a pioneering producer of the ties.

After getting a doctorate degree in chemical engineering from New York University in 1965, Sullivan joined Shell Chemical and rose to become vice president for polymer businesses, including polypropylene, polystyrene, and Kraton hydrogenated styrene block copolymers. In the mid-1980s, he was instrumental in the sale of Shell's ps business to Huntsman Corp., which was seeking to backward integrate. He joined Huntsman shortly thereafter and became vice chairman.

While looking at opportunities for recycled materials at Huntsman, the idea of using recycle captured Sullivan's imagination. So much so that he left Huntsman in 1991 to set up a small firm named Gaia, after the Greek goddess of the Earth, to develop products based on recycled polyolefins and crumb rubber.

Sullivan bought five patents and some mixing and extrusion equipment. The initial product was a soaker hose for irrigation, but he soon decided that structural applications were more promising, particularly railroad ties.

Railroad ties appealed for several reasons. He believed recycle could provide longer-lasting, better-performing, and environmentally-friendlier products than preservative-treated

wooden ties — and at an acceptable price. Plus, the market is substantial, since around 15 million ties in the U.S., and 75 million worldwide, are replaced annually, he reckons.

Sullivan started work on the ties in 1993 and began discussions with the Union Pacific Railroad, Omaha, NE, soon after. Getting the railroad's input



Henry Sullivan, just behind a TieTek cross tie, switched careers so he could develop products based on recycle.

was crucial in developing industry-acceptable ties, he emphasizes.

The ties' formulation and basic manufacturing process were finalized in 1994. They contain more than 50% HDPE recycle, as well as recycled crumb rubber and mineral fillers. On-site compounding steps are crucial. The material then goes to a large single-screw extrusion and forming process, with a post-finishing embossing step for ties destined for ballasted track.

The Union Pacific Railroad installed two ties in 1996, 250 in 1998, 2000 the

next year, and 10,000 at a single site in 2001. Ties have also been installed at the Transportation Technology Center Pueblo, CO, a research and testing facility run by the Association of American Railroads. A number of railroads are transit systems around the world are now testing the ties.

In 2000, the Union Pacific Railroad agreed to buy 200,000 ties from TieTek, essentially all its output.

Developing the ties required more resources than Gaia could gather. This led to a linkup with North America Technologies Group (NATK), and the formation of TieTek in 1996 to market ties. By 1998, NATK had jettisoned its other businesses to focus on TieTek and build a plant. That plant in Houston, started in June 2000 and now makes about 5000 ties monthly. Before its start-up, the ties were made at compounder sites, with dies and molds from TieTek.

A second line with 12,000 ties/month capacity is being added in Houston and will result in a doubling of company staff to over 40. A third line in Houston and another else where are planned for 2003.

Because each tie weighs 100 kg putting production in different area makes sense, Sullivan says, to avoid disrupting local recycle markets.

By 2005, TieTek hopes to be able to produce over 500,000 ties annually. That level of production would consume about 2 million waste tires and more than 50 million lb of HDPE recycle, he estimates. Moreover, it would spare 160,000 mature hardwood trees and obviate the application of 5 million lb of creosote. Meeting this goal would create a track record that surely would make Sullivan proud.

Mark Rosencweig mrosencweig@modplus.com

GLOSARIO

Abrasión: Desgaste de los materiales por fricción.

Aditivo: Componente que se añade al compuesto para modificar sus propiedades. Los aditivos incluyen catalizadores, colorantes, retardantes de flama y otros ingredientes.

Adhesión: Estado en donde dos superficies se mantienen unidas por fuerzas interfaciales.

Adhesivo: Componente que sirve para mantener unidos dos superficies, éstos pueden ser pastas o líquidos.

Albura: Región externa del árbol que corresponde a las capas formadas recientemente de color marrón grisáceo.

Ambiente: Área que rodea. En compuestos se refiere a las condiciones ambientales como temperatura, humedad, presión, etc..

Brea: Tipo de fibra de carbono hecha de un producto residual del petróleo.

Coefficiente de expansión térmica: Es el valor obtenido entre el cambio de longitud (o volumen) por unidad de longitud (o volumen) producido por un grado Celsius de temperatura.

Cohesión: Propiedad de una sustancia simple a adherirse a sí misma.

Compuesto: Es la combinación de uno o más materiales diferentes en forma o composición en una macroescala. Los constituyentes mantienen su identidad, es decir no se disuelven o desaparecen uno dentro del otro.

Cortante: Acción o fuerza resultante de la aplicación de varias fuerzas que causan o tienden al deslizamiento relativo de dos partes contiguas de un cuerpo entre sí mismas en dirección paralela a su plano de contacto.

Corteza: Revestimiento superficial del árbol de un espesor de aproximadamente 0.5 cm. fijado sobre una cama escamosa.

Creosota: Aceite pesado que procede de la hulla, tóxica para insectos, no permite formaciones herbáceas y disminuye la absorción de agua en su aplicación sobre madera.

Deformación: Cambio de las dimensiones de un objeto por efecto de diversas acciones, entre ellas fuerzas, temperatura, presión, etc...

Degradación: Debilitamiento de las propiedades de un material por la acción de otros fenómenos.

Desmoldante: Sustancia usada para prevenir la adhesión no deseada de un material compuesto en el molde.

Ductilidad: Capacidad de un material a resistir carga con deformación sin colapsarse.

Durabilidad: Propiedad de un material a resistir la acción del ambiente al que está expuesto, ataque químico, abrasión y otras condiciones.

Elasticidad: Capacidad de un material a recobrar su tamaño y forma original después de retirar la fuerza que le causó deformación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Epóxico: Polímero termofijo que contiene uno o más grupos epóxicos y es curado por la acción de las aminas, alcoholes y ácidos anhídridos.

Esfuerzo de fatiga: Es la relación máxima cíclica entre una fuerza y el área de aplicación de la misma, que un material puede soportar para un número determinado de ciclos antes de que ocurra la falla.

Estabilidad dimensional: Capacidad de un material para mantener su forma original durante la aplicación de cargas.

Expansión térmica: Alargamiento o aumento de volumen de un material por efecto del aumento de temperatura.

Fatiga: Disminución o pérdida total de las propiedades de un material después de aplicaciones repetidas de determinadas cargas.

Filamento: Unidad más pequeña de un material fibroso.

Material de relleno (carga): Componente que al ser incluido a los compuestos da mejoras al desempeño del compuesto, tales como control de contracciones, resistencia al agua y reducción de costos.

Matriz: Es la resina homogénea esencialmente en donde el sistema de fibras es embebido.

Resina: Líquido viscoso natural o sintético, material orgánico frecuentemente de alto peso molecular que tiende a fluir bajo fuerza o presión.

Rigidéz: Medida del módulo o la habilidad del material de resistir la flexión.

Termofija: Resina formada por la unión de cadenas de polímeros. La resina termofija no puede ser derretida o reciclada debido a que las cadenas de los polímeros forman una red tridimensional.

Termoplástico: Resina que no es unida, generalmente puede ser derretida o reciclada.

TESIS CON
PUNTO DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

Materiales Compuestos Vol. 1 y 2
Antonio Miravete
INO Reproducciones
España 2000

"Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures"
Charles W. Dolan, Sami H. Rizcalla y Antonio Nanni.
ACI Comité 440, 2001. Farmington Hills, Mich. EUA.

Reforzamiento con Sistemas de Fibras de Carbono y Fibras de Vidrio para Estructuras de Concreto y Madera
Guía de Diseño e Instalación de Tejidos SikaWrap™
Colombia.

Guía de Diseño Estructural MBT. 1998
Ed. Master Builders, Inc. EUA

"Life Cycle Costs of New Materials"
Revista de Sistemas de Infraestructura
Ehlen M A.
National Institute of Standard for Technology (NIST), Gaitherburg, MD, EUA.

Publicaciones de Asociación Nacional de las Industrias de los Compuestos Moldeables y Plásticos Reforzados.
Artículos sobre productos para la construcción.
No. 1, 2 y 3 Año 2002.

Documentos Técnicos: Durmientes de Madera 1995 y Durmientes de Concreto 1997.
Centro de Información y Desarrollo Tecnológico.
S T C -Metro

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Páginas en Internet:

American Concrete Institute.
www.concrete.org

Polywood, Inc.
www.polywood.com

Polysum, Corp.
www.polysum.com

Grupo NATK, Inc
www.tie-tek.com

Linda Thomas Resources, Inc.
www.lresources.com

Grupo Sika
www.sika-construcción.com

MBT México
www.mbt-mexico.com

Asociación Nacional de las Industrias de los Compuestos, A. C.
www.acp.org.mx

Owens Corning, Co.
www.owenscorning.com

Composites, Inc.
www.e-composites.com

Publicaciones Obras Web
www.obrasweb.com

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN