



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍAS

**BLOCK PREFABRICADO DE MATERIAL COMPUESTO CON DESPERDICIO
DE BAMBÚ Y RESINA EPOXI**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA
ARQ. OSCAR DAVID SANTILLÁN CARVANTES

TUTOR
DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. MIKHAIL G. ZOLOTUKHIN
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNAM

DR. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

MTR. JORGE RANGEL DÁVALOS
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

DRA. ILSE GARCÍA VILLALOBOS
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD, MX.
OCTUBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS



A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, POR
BRINDARME TODO EL APOYO NECESARIO PARA
DESARROLLARME ACADÉMICA Y CULTURALMENTE.

AL PROGRAMA DE APOYO A ESTUDIOS DE POSGRADO (PAEP)
POR EL RECURSO LIBERADO PARA LAS PRACTICAS DE CAMPO.

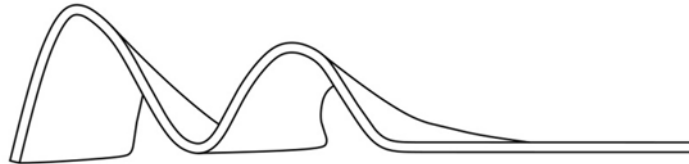


CONACYT

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA POR EL
APOYO ECONÓMICO OTORGADO PARA EL DESARROLLO DE
ESTA INVESTIGACIÓN



AGRADEZZCO AL LABORATORIO DE MATERIALES Y SISTEMAS ESTRUCTURALES, ASÍ COMO A TODO SU EQUIPO DE TRABAJO POR EL APOYO DURANTE LA INVESTIGACIÓN. EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN ASOCIADO A LA PRESENTE TESIS SE REALIZÓ EN EL MARCO DEL PROYECTO “PAPIME PE 403618” TITULADO: “PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE MATERIALES Y SISTEMAS ESTRUCTURALES DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA” BAJO LA DIRECCIÓN DEL DOCTOR EN ARQUITECTURA ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ.



FACULTAD DE ARQUITECTURA POSGRADO UNAM
LABORATORIO DE CONSERVACIÓN DEL
PATRIMONIO NATURAL Y CULTURAL

MI AGRADECIMIENTO AL LABORATORIO DE CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO NATURAL Y CULTURAL YA QUE FACILITARON EL USO DE SU EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA REALIZACIÓN DE ALGUNAS PRUEBAS DEL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN, BAJO LA DIRECCIÓN DE LA DOCTORA EN ARQUITECTURA ILSE GARCÍA VILLALOBOS.

DEDICATORIAS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi segunda casa, y semilla de mi formación académica.

A mi tutor, el Dr. Agustín Hernández por aceptar ser el director de la presente tesis, y ser mi mentor durante esta etapa.

Al Dr. Mikahil Zolotukhin, por generosamente compartir su conocimiento conmigo.

Al Dr. Alberto Muciño por su invaluable apoyo durante toda la investigación.

A la Dra. Ilse García por asistirme en la parte experimental.

Al Mtro. Jorge Rangel por sus acertados consejos.

A mis profesores del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura por comunicar sus ideas con nosotros.

A mis padres Paty y Oscar por el amor, consejo y apoyo incondicional que siempre me brindan

A mis hermanos Paty, Ernesto y Andrés por ser un ejemplo de lucha incansable.

A mi amigo Arturo Díaz por compartir esta etapa junto a mí.

A mi familia y amigos con los que cuento siempre que lo necesito.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
INTRODUCCIÓN	7
PROBLEMÁTICA EN ARQUITECTURA.....	7
MATERIALES ALTERNATIVOS.....	9
EL BAMBÚ.....	9
PROBLEMAS DE MATERIALES ALTERNATIVOS EN MÉXICO.....	13
AUTOCONSTRUCCIÓN EN MÉXICO.....	14
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	14
HIPÓTESIS.....	15
OBJETIVOS.....	15
GENERAL.....	15
PARTICULARES.....	15
MATERIALES.....	17
CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES.....	17
ESTRUCTURA DE UN MATERIAL.....	17
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	18
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES.....	19
PROPIEDADES MECÁNICAS.....	19
GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN.....	21
TIPOS DE ESFUERZOS.....	23
CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES.....	25
RESUMEN CAPÍTULO.....	27
MATERIALES COMPUESTOS	29
DEFINICIÓN.....	29
MATRIZ.....	30
MATRIZ POLIMÉRICA (PMC).....	30
MATRIZ METÁLICA (MMC).....	32
MATRIZ CERÁMICA (CMC).....	34
REFUERZO.....	35
REFORZADOS POR PARTÍCULAS.....	35
REFORZADOS CON FIBRAS.....	37
COMPOSITOS ESTRUCTURALES.....	39
INTERFACE.....	40
PROCESO DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.....	41

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN POR MOLDEO ABIERTO	41
MÉTODOS DE PRODUCCIÓN POR MOLDEO CERRADO	44
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	49
PARTÍCULAS GRANDES	49
FORTALECIDAS POR DISPERSIÓN.....	49
REFORZADOS POR FIBRAS	49
COMPOSITOS ESTRUCTURALES	52
COMPOSITOS LAMINARES	52
PANELES SÁNDWICH.....	53
ENSAYOS Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	54
EL ENSAYO DE DUREZA	54
EL ENSAYO A LA FATIGA	54
EL ENSAYO DE TERMOFLUENCIA.....	55
ENSAYO DE TENSIÓN.....	55
ENSAYO DE FLEXIÓN	55
ENSAYO DE IMPACTO	56
ENSAYO DE COMPRESIÓN	57
RESUMEN CAPÍTULO.....	58
BAMBÚ	61
BOTÁNICA	63
COMPOSICIÓN DE LAS FIBRAS DE BAMBÚ.....	64
ESTRUCTURA DEL BAMBÚ.....	65
PRODUCCIÓN DE BAMBÚ	68
REPRODUCCIÓN SEXUAL O POR SEMILLAS	69
REPRODUCCIÓN VEGETATIVA O ASEXUAL	69
NECESIDADES DE CRECIMIENTO.....	70
ETAPAS DE DESARROLLO Y APROVECHAMIENTO	70
ESPECIES DE BAMBÚ EN MÉXICO.....	72
LA GUADUA ACULEATA.....	72
LA GUADUA PANICULATA.....	72
LA GUADUA AMPLEXIFOLIA.....	73
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....	73
GÉNERO OTATEA	73
LA BAMBUSA OLDHAMMI	73
LA BAMBUSA VULGARIS	74
GÉNERO CHUSQUEA.....	74
GÉNERO AULONEMIA	74
USOS DEL BAMBÚ EN MÉXICO	74
MÉTODOS PARA LA PRESERVACIÓN	75
MÉTODOS TRADICIONALES	75

MÉTODOS QUÍMICOS	76
SECADO	79
RESUMEN CAPÍTULO	79
POLÍMEROS	81
DEFINICIÓN	81
ORIGEN	81
LOS POLÍMEROS ORGÁNICOS	82
LOS POLÍMEROS INORGÁNICOS	82
MÉTODOS DE POLIMERIZACIÓN	82
POLIMERIZACIÓN EN MASA	83
POLIMERIZACIÓN EN DISOLUCIÓN	83
POLIMERIZACIÓN DE SUSPENSIÓN	84
POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN	84
CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS	85
CLASIFICACIÓN POR ESTRUCTURA Y PESO MOLECULAR	85
CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA MOLECULAR	86
CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE MONÓMERO	87
CLASIFICACIÓN POR SU COMPOSICIÓN QUÍMICA	87
CLASIFICACIÓN SEGÚN SU VOLUMEN DE PRODUCCIÓN	89
CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS PROPIEDADES TÉRMICAS-MECÁNICAS	91
PROPIEDADES GENERALES DE LOS POLÍMEROS	91
MÉTODOS DE PROCESAMIENTO	94
MOLDEO POR EXTRUSIÓN	94
MOLDEO POR INYECCIÓN	95
MOLDEO POR SOPLADO	95
MOLDEO POR COEXTRUSIÓN	95
MOLDEO POR PELÍCULA SOPLADA	95
RESINAS EPOXI	96
RESINAS EPOXI COMERCIALES	97
PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXI CURADAS	98
ADHESIVOS EPOXI	98
RESINAS DE INYECCIÓN	99
RECUBRIMIENTOS EPOXI	99
RECUBRIMIENTOS EPOXI LAMINADOS	99
RECUBRIMIENTOS EPOXI DE ALQUITRÁN	99
EPOXI PARA SUELOS	100
RESINAS DISPERSAS EN AGUA	100
RESUMEN CAPÍTULO	100
DISEÑO EXPERIMENTAL	103
SELECCIÓN DE MATERIALES	103

BAMBÚ.....	103
RESINA EPOXI.....	106
VARIABLES	107
1ª ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN.....	107
2ª ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN.....	108
NORMATIVA Y EQUIPO.....	109
RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN.....	109
EQUIPO NECESARIO.....	110
ABSORCIÓN DE HUMEDAD	111
EQUIPO NECESARIO.....	112
INTEMPERISMO.....	114
EQUIPO NECESARIO.....	115
NORMAS MEXICANAS PARA BLOQUES NO ESTRUCTURALES	117
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PROBETAS	118
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	121
RELACIÓN 1:1 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA	121
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #16.....	121
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30.....	124
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50.....	126
COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:1	128
RELACIÓN 1:0.75 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA.....	130
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30.....	130
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50.....	132
COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.75	134
RELACIÓN 1:0.5 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA.....	136
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30.....	136
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50.....	138
COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.5	140
RELACIÓN 1:0.25 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA.....	142
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30.....	142
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50.....	144
COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.25	146
COMPARACIÓN DE RESULTADOS. PARTÍCULAS #30.....	148
COMPARACIÓN DE RESULTADOS. PARTÍCULAS #50.....	150
SELECCIÓN DE MEZCLA.....	152
DISEÑO DE MEZCLA FIBRAS #50 RELACIÓN 1:0.5.....	153
RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN	154
GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	154
RESULTADOS ABSORCIÓN DE HUMEDAD FIBRA #50 RELACIÓN 1:0.5.....	156
PROCESO DEL EXPERIMENTO	156

RESULTADOS	157
CONCLUSIONES DE LA PRUEBA.....	157
RESULTADOS DE PRUEBA DE INTEMPERISMO ACELERADO	158
PROBETAS ANTES DE LA EXPOSICIÓN DE INTEMPERISMO.....	158
PROBETAS DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A INTEMPERISMO	159
CAMBIO DE COLOR.....	159
MICROSCOPIÍA	161
PESO.....	163
TABLA RESUMEN DE RESULTADOS	164
CARACTERÍSTICAS OBSERVABLES	164
CONCLUSIONES DE LA PRUEBA.....	165
CONCLUSIONES	167
VENTAJAS.....	167
DESVENTAJAS	168
RECOMENDACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DEL MATERIAL:.....	168
APLICACIÓN DEL MATERIAL	169
POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	172
BIBLIOGRAFÍA.....	173

INTRODUCCIÓN

PROBLEMÁTICA EN ARQUITECTURA

Vivimos en un mundo en el que las grandes industrias están contaminando y sobreexplotando los recursos con los que contamos. Después de la industria alimenticia, la construcción es la segunda industria más explotadora de recursos y está acabando o contaminando los recursos renovables y los no renovables. En general, entre todas las industrias, únicamente se utiliza entre el 40 y 60% de los recursos naturales del planeta ¹, es decir que aún nos quedan muchas especies, y minerales por investigar, si bien no para conocer sus propiedades, si para encontrarles aplicaciones dentro de las industrias, ya que particularmente la construcción, es responsable de la utilización del 50% de los recursos naturales que se industrializan, el 40% de la energía, y el 16% del agua, lo que se traduce en 25% del total de gases que favorecen al calentamiento global ²

En este sentido, como parte de la industria de la construcción, y como arquitectos, tenemos mucho aún por hacer para evitar seguir acabando al planeta, ya que de seguir usando los recursos de la manera en que los usamos, nos quedaremos sin ellos dentro de poco tiempo. Existen tablas que indican la reserva y reserva base que aún quedan de algunos materiales en y cuantos años deberán pasar hasta agotarse si seguimos utilizándolos al paso que actualmente llevamos. La reserva es la cantidad de materia prima que podemos extraer con los métodos actuales, y la reserva base, es el total de la materia prima, incluidas aquellos lugares que por dificultad y costo de operación, ya no es viable la extracción de la materia prima.

En la actualidad, para la extracción y procesamiento de algunas materias primas, se requiere de procesos industriales muy complejos, razón por la cual, para que sea económicamente viable, se requiere extraer la materia prima en grandes cantidades. Para facilitar el proceso, se centralizan las plantas productoras, optimizando sus procesos, ahorrando costos operativos, explotando al máximo la tecnología disponible, y extrayendo material a la mayor velocidad posible. Esto, en conjunto representa una serie de graves problemas que actualmente son la principal causa por la que estamos devastando nuestros recursos naturales, tanto renovables como no renovables. Un recurso renovable se define como aquel que puede ser cosechado o producido en más de una ocasión, sin embargo, esto sólo es posible en condiciones

¹ William Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction, Materials Science and Engineering*, 7th edn (Utah, USA: John Wiley and Sons, Inc, 2007), XCIV <[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90343-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90343-0)>.

² Berge Bjørn, *The Ecology of Building Materials*, ed. by Elsevier, Second Edi (Linacre House, Jordan Hill, Oxford, UK: Architectural Press, 2009).

óptimas para el ecosistema en el que se desarrolle. Un recurso no renovable, se define como aquel que solo puede ser cosechado una sola vez, o bien, su formación es demasiado lenta como para tomarla en cuenta³.

Es así, como podemos clasificar la problemática del impacto ambiental en dos principales problemas: el escás de materia prima y costo energético requerido para extraerla y/o procesarla. Estos son dos problemas que son actualmente el fundamento de las investigaciones sobre sustentabilidad, ya que en la industria de la construcción la explotación de recursos renovables y no renovables de manera descontrolada provoca serios problemas; por ejemplo, la minería no controlada de piedra caliza para la producción de cemento genera deforestación, la extracción de algunas arenas para concreto modifica radicalmente los ecosistemas cambiando el clima y matando a especies animales y vegetales incluidas algunas especies que podrían ser renovables, el agua requerida para la producción de cemento está dejando secos algunos lagos y ríos subterráneos, entre otros ejemplos que están causando graves alteraciones al planeta.

En cuanto al costo energético, se refiere a la cantidad de energía (medida en CO2 emitido) utilizada para extraer, procesar, transportar o destruir un material; El consumo de energía de cualquier producto es de entre el 85-95% durante la extracción y/o manufactura; y 5-15% durante el mantenimiento o desmantelamiento. Hablando de la industria de la construcción, se ha buscado como hacer más rentable la explotación de recursos durante todo el proceso industrial de cualquier material, lo cual ha llevado a generar nuevos problemas ajenos a la falta de recursos, como aumentar en la complejidad industrial que se requiere para la extracción de los materiales, lo que significa un aumento en la necesidad energética y por tanto aumenta la emisión de gases invernadero; se contaminan ecosistemas con distintos residuos que facilitan la extracción que sin embargo, son tóxicos; por ejemplo, se requiere de un consumo energético de procesamiento altísimo, debido a los inmensos hornos encendidos 24/7 que se utilizan para producir al Clinker, producto base del cemento.

La construcción, enfrenta un problema en cuanto a la elección de materiales, ya que no se hacen estudios que tomen en cuenta la explotación de materias primas, rehúso, reciclaje, costo energético de producción, materiales locales, desperdicio, y materiales locales. Esto se traduce en la utilización de materiales convencionales de alto impacto ambiental, con un costo energético de producción muy alto, que generan mucho desperdicio, y que una vez usado, termina en algún tiradero afectando directamente al ecosistema.

³ Christian Ivet Cigarroa Espinosa, 'Biocompositos (Materiales de Residuos Aplicados a La Arquitectura)' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2017).

MATERIALES ALTERNATIVOS

Existen sistemas que buscan reducir el impacto de la construcción en el medio ambiente, y es en este contexto donde encontramos despachos, constructoras e industrias que recurren a soluciones a través de materiales y sistemas alternativos como ejemplos de tierra compactada, plástico reciclado, vidrio triturado, prefabricados de madera de pino, entre otros muy variados ejemplos.

Es en este contexto donde surge mi particular interés por las construcciones de madera, ya que tienen todas las características de un material renovable y de gran utilidad dentro de la industria de la construcción, y que sin embargo, tienen un problema: se extraen mucho más rápido de lo que crecen. Actualmente la madera que se corta de los bosques, es prácticamente irrecuperable debido a la velocidad a la que se extrae el material por ejemplo, en la industria de la construcción la madera de un pino es de las más utilizadas, sin embargo tarda 20 años en crecer; un cedro, necesita un tiempo de crecimiento para que se pueda usar de entre 18 y 25 años; un roble tarda entre 20 y 30 años; un nogal igualmente debe crecer entre 20 y 30 años. Y así podemos encontrar un sinnúmero de ejemplos, siendo éstos que escribo, plantas de crecimiento de media velocidad, ya que puede haber árboles que pueden tardar hasta 70 años o más para que alcancen un tamaño adecuado para su utilización.

Es este el problema que el bambú puede llegar a solucionar, ya que estamos hablando de una planta de extraordinaria velocidad de crecimiento, es una de las plantas más versátiles del planeta, tiene múltiples aplicaciones, que van desde alimento humano, estructura para vivienda, manufactura de utensilios, telas, papel y paredes artesanales.

EL BAMBÚ


El bambú es considerado como uno de los vegetales más versátiles, debido a que lo encontramos en casi todas las partes del planeta. Esta planta se puede utilizar con diferentes fines, y así obtener una gran variedad de productos. Como material de construcción tiene antecedentes prehispánicos: Los totonacas en Veracruz, los huastecos en Hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, los maya-chontales en Tabasco⁴. Todos ellos han construido casas de bambú y las culturas que aún perduran, los siguen haciendo hoy en día; Algunas culturas deciden usar al bambú como material constructivo porque es un material que al utilizarse proporciona frescura en climas cálidos y húmedos, es fácil de producir, de cortar y de fácil uso en la construcción. México ha sido clasificado como de “moderada diversidad” pues tenemos 8 géneros y 36 especies de bambúes leñosos y tres géneros con cuatro especies de bambusoides herbáceos que habitan principalmente los estados del sureste a una

⁴ Bjørn.

altitud que va desde el nivel del mar hasta casi los 3000 metros. La biología de los bambúes los hace plantas extraordinarias, por su floración y su rápido crecimiento. Se sabe de algunas especies de bambú pueden llegar a crecer hasta 1.25 centímetros cada 24 horas; el bambú es la planta de crecimiento más rápido del planeta, crece entre 75 y 400mm por día dependiendo la especie. Se estima que en 35 años, una planta de bambú puede producir hasta 15km de postes aprovechables. Dependiendo de las condiciones climáticas, edáficas, y de la época de brotamiento, puede demorar entre 4 y 6 meses para desarrollar su altura definitiva.

Hoy en día su utilización se ve muy reducida en relación a su potencial pues en el mejor de los casos lo veremos como la parte estructural de la cubierta de alguna vivienda rústica, mientras que a nivel industrial, su utilización es casi nula. Es por ello que el problema viene cuando se busca un aprovechamiento industrial o semi-industrial del bambú, que es cuando prácticamente desaparece del mapa, dejando el potencial que tiene esta planta en artesanías y/o construcciones artesanales. Actualmente el uso de esta planta se ve limitado, pues se utiliza únicamente en zonas rurales, y en muchos casos se desconocen las propiedades de la misma, llegando a considerarse una plaga.

Existen cuatro principales formas de fabricar piezas con bambú, todas ellas con ventajas y desventajas:

Desfibrado	<p>Este método consiste en separar mediante procesos químicos y/o físicos el parénquima de las fibras, para poder utilizar las fibras como material de refuerzo, de tejido para telas, o artesanías. El problema de éste método, es que el bambú está compuesto de 40% de fibras y 60% de parénquima, lo que provoca un desperdicio muy alto, además de que las fibras tienen un carácter hidrofóbico, por lo que después de un largo proceso de separación, deben volver a tratarse si el objetivo es el de ser utilizadas en un material compuesto polimérico plástico.</p>	 <p>Desfibrado de bambú. Imagen recuperada de btn europe</p>
------------	---	---

<p>Corte de piezas Enteras</p>	<p>A través de éste método se realizan las columnas estructurales, o sólidas que posteriormente son talladas para la producción de viviendas o artesanías.</p> <p>El problema de éste método es que hay mucho desperdicio ya que lo que no cumple con el diámetro mínimo o rectitud requerida es considerado desperdicio. Otro problema de éste método es el límite de formas geométricas que se pueden producir, pues todas derivan de un cilindro</p>	 <p>Columnas de bambú, rancho san Ricardo. Foto propia</p>
<p>Esterilla</p>	<p>Consiste en separar el culmo de bambú en piezas largas y planas, que posteriormente se pueden usar como paneles divisorios, tapetes, canastas, entre otras piezas tejidas. El problema de este método es que al igual que en el corte de piezas enteras, se desperdicia toda la sección de la planta que no cumple con el diámetro mínimo, o bien tiene defectos en su geometría, el resultado de este proceso son piezas producidas que carecen de una uniformidad, e igualmente dejan pasar con facilidad al aire, agua y ruido, además de producirse piezas huecas debido a que es una unión de planos, por lo que no son la mejor opción dentro de la construcción.</p>	 <p>Esterilla rancho san Ricardo. Foto propia</p>
<p>Pinboo</p>	<p>Es un proceso que consiste en realizar esterilla a partir de los culmos más gruesos, mismos que serán unidos posteriormente mediante pines de bambú, en su sección transversal, con el objetivo de realizar paneles para diferentes terminados. El problema de este método de producción es que la mano de obra es muy costosa ya que el proceso es muy lento, además de ser un proceso con una muy considerable cantidad de desperdicio, pues únicamente pueden utilizarse piezas con un grosor mínimo, y que se devastarán hasta lograr un panel uniforme.</p>	 <p>Panel hecho de pinboo en fabricación. Foto propia. Alcalá, valle del cauca, Colombia.</p>

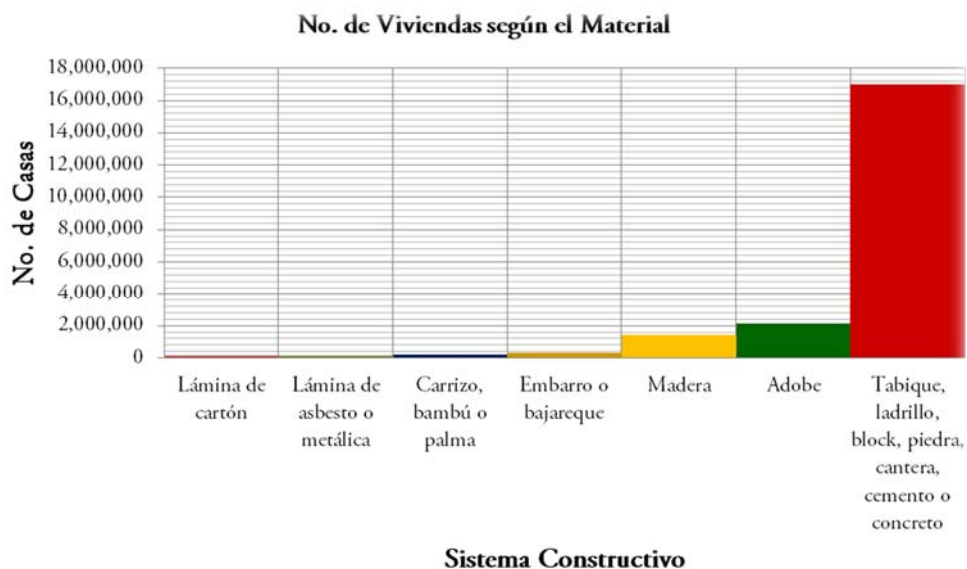
El problema común entre estas tres maneras de procesar al bambú, es claro: El desperdicio. Es por esto que durante la investigación se busca desarrollar un material que pueda ser utilizado en la arquitectura utilizando el desperdicio de bambú como materia prima debido a sus ya mencionadas ventajas, sin embargo, en México nos enfrentamos al reto de demostrar que este material, puede ser exitosamente aplicado en la arquitectura, y romper con esos estigmas que marcan a los materiales naturales o de desecho como materiales no viables para una construcción digna.

PROBLEMAS DE MATERIALES ALTERNATIVOS EN MÉXICO

En México, la Secretaría Hipotecaria Federal (SHF) determina que la calidad de una vivienda se va a determinar por tres criterios: Hacinamiento (Cuando se tiene más de 2.5 personas por cuarto), Servicios Básicos (Agua, drenaje, electricidad, y combustible para cocinar) y Materiales en cuyo caso, marca como inadecuados a los materiales de desecho, lámina de cartón, carrizo, bambú, palma, barro, bahareque, pisos de tierra, entre otros, sin embargo no establece un criterio para determinar la calidad, aplicación, elaboración, confort térmico, ni ningún otro criterio para determinar la calificación de los materiales, por lo que el criterio que se utiliza es inadecuado, e insuficiente ⁵.

La Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), con la publicación “*Medición de la pobreza, calidad de la vivienda*” con fecha del 7 de Julio de 2011, califica la calidad de la vivienda, determinándolo de acuerdo a los materiales constructivos, descartando al material de desecho, lámina, cartón, lámina metálica, asbesto, carrizo, bambú o palma como materiales de calidad para la construcción. Al igual que el caso anterior, no muestra ningún criterio que demuestre por qué esta información, y mostrando como materiales de calidad aquellos que son parte de un proceso industrializado global.

Sumado a esto, en México el porcentaje de materiales convencionales utilizado en la construcción es muy alto, ya que según datos del censo del 2000 ⁶, se alcanza hasta el 79% del total de los materiales de construcción.



Gráfica propia. Datos inegi. Censo del 2000.

⁵ G. R. Cortés Rodríguez, ‘Los Bambúes Nativos de México’, *CONABIO, Biodiversitas*, 30 (2000), 12–15.

⁶ Cigarroa Espinosa.

AUTOCONSTRUCCIÓN EN MÉXICO

En México existe un 79% de autoconstrucción (Publimetro, 2018), un sector que no ha sido intervenido por la industria, y que sin embargo, representa al grueso de la construcción en México, donde la materia prima para construir por excelencia es el cemento, particularmente, los bloques de cemento, que son utilizados en todas las zonas de México, desde pueblos pequeños en Yucatán, hasta grandes bodegas comerciales en Monterrey. Estos bloques de cemento, son piezas que en la mayoría de proyectos de autoconstrucción, quedan sobrados en resistencia, sumado a que una vez colocados, representan una construcción que ya no puede ser modificada, pues para retirarlos, es necesaria la demolición, lo que conlleva al desperdicio de material y la contaminación de tiraderos con cascajo que ya no puede ser reutilizado.

Si lo analizamos, los bloques de cemento, son resultado de un material de alto impacto, que es producido en todo México aunque no haya piedra caliza en todo el territorio, y que ha llegado a ser utilizado en todos los niveles de la construcción, limitados al uso de una sola vez durante toda su vida útil favoreciendo la contaminación con cascajo una vez demolidos, tienen una resistencia excedida a los requisitos de proyecto en situaciones de construcción de vivienda, y bien podría ser reemplazado por un block que cumpla con los requisitos mínimos de resistencia como para servir en el sector de la autoconstrucción, que sea reutilizable y este formado de materia prima renovable como el desperdicio de bambú que puede ser obtenido de la mayor parte del territorio nacional.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Como ya vimos, la construcción requiere de investigación en nuevos materiales que puedan reemplazar en algunos casos a los que utilizamos convencionalmente. El desperdicio de bambú es el candidato perfecto para llevarlo a cabo durante esta investigación ya que es lo que consideran desperdicio de una especie que tiene un gran potencial para ser utilizado en la construcción. Para lograr utilizar este desperdicio de bambú, es necesario desarrollar un material compuesto que permita aglomerarlo y utilizarlo a través de bloques destinados a la autoconstrucción, por lo que es preciso involucrarnos en lo que se conoce como ciencia e ingeniería de los materiales, para desarrollar el experimento que determine las propiedades y por tanto el potencial que el nuevo material pueda tener.

Se propone una investigación en la cual se va desarrollar un material compuesto construido con el mayor contenido posible de materia prima de desperdicio de bambú aglomerado a través de una resina epoxi seleccionada de acuerdo a su capacidad de aglomerar al compuesto, a través de la fuerza aditiva, mientras

que provee protección al desperdicio de bambú. Para lograr que el material compuesto sea aplicado en la construcción, se tomarán como punto de partida dos aspectos principales:

- **Aplicación en la arquitectura:** Para que este proyecto no divague en la ciencia e ingeniería de materiales, se ha establecido como posible campo de aplicación del material resultante el sector de la autoconstrucción a través de bloques no estructurales cuyos requisitos mínimos de resistencia a esfuerzos mecánicos de compresión, absorción de humedad y duración a la intemperie están bien marcados en normas mexicanas para bloques no estructurales, de las cuales se tomarán como referencia los parámetros mínimos para realizar el análisis como material.
- **Análisis como material:** Se hará un análisis de la resistencia a esfuerzos de compresión con diferentes proporciones de mezcla entre resina epoxi y desperdicio de bambú de diferentes tamaño de partículas, con el objetivo de determinar hasta donde es posible disminuir la cantidad de resina utilizada sin tener un desempeño menor a los requisitos mínimos de resistencia para bloques no estructurales. Una vez determinada la mezcla idónea, se harán pruebas de absorción de humedad, y cambios al ser expuesto a la intemperie, con lo que se va a determinar la viabilidad del material para ser utilizado en exteriores

HIPÓTESIS

Crear un material compuesto con base en alto contenido de desperdicio de bambú, puede resultar en un material útil para la fabricación de blocks no estructurales.

OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar un material compuesto para aplicación en blocks no estructurales, a través de desperdicio de bambú como fase dispersa en una matriz de resina epoxi

PARTICULARES

- Diseñar un material un material de alto contenido de desperdicio de bambú
- Demostrar que se puede obtener la resistencia mínima en esfuerzos a compresión para uso en blocks no estructurales con dicho material

- Identificar la zona de interface analizando la adherencia entre partículas de refuerzo y matriz, a través de microscopía óptica.
- Medir la absorción de humedad del material para identificar sus posibles aplicaciones
- Identificar cambios ante la exposición a rayos UV, temperatura y humedad que simulen un ambiente exterior agresivo
- Analizar las ventajas del material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú frente a materiales convencionales.

MATERIALES

CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

La ciencia de los materiales y la ingeniería de los mismos, son dos cosas distintas, que a pesar de tener una estrecha relación, tienen objetivos distintos. Estrictamente hablando, la ciencia de los materiales involucra la investigación de la relación que existe entre la estructura y propiedades de un material. En contraste, ingeniería de materiales, está sustentada en la correlación entre las propiedades y estructura de los mismos, diseñando la estructura de un material para reproducir una serie de propiedades determinadas en función del uso. En conclusión, el rol de la ciencia de materiales, es desarrollar o sintetizar nuevos materiales, mientras que la ingeniería de materiales, desarrollar técnicas para poder procesar y utilizar esos materiales.⁷

ESTRUCTURA DE UN MATERIAL

La estructura se define como la disposición de los componentes internos de un material, y está determinada por el acomodo interno de sus partes. Para facilitar el estudio, se han clasificado estas características de acuerdo al nivel de tamaño en el que suceden los procesos:

- El nivel **subatómico** involucra la relación entre los electrones, con sus átomos y núcleos del material.
- El nivel **atómico** está determinado por la organización de los átomos y las moléculas relativamente unas a otras.
- El nivel de la **nano estructura** es el que tiene una longitud de 1 a 1000nm y es en el que actualmente se desarrolla la ingeniería avanzada de materiales.
- El nivel, **microscópico**, es en el cual la relación ya es entre grandes grupos de átomos y moléculas (0.1-100micras); a éste nivel, ya es posible observar directamente mediante un microscopio.
- En el nivel **macroscópico** encontramos los elementos estructurales que pueden ser observables a simple vista (mayores a 100micras).⁸

⁷ INEGI, 'Viviendas Y Sus Ocupantes Según Características de Las Viviendas', *Material En Paredes Y Material En Pisos*, 2000 <http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=17164> [accessed 3 March 2018].

⁸ Callister, XCIV.

Para facilitar el entendimiento de la estructura atómica de los elementos, se han clasificado en dos tipos de estructura que miden el nivel de ordenamiento de un material internamente.

- Los materiales **crystalinos** son aquellos que tienen un arreglo atómico ordenado y repetitivo.
- Los materiales **no crystalinos**, son los que en contraste, no tienen un arreglo ordenado ni repetitivo.

Es de vital importancia entender como esto puede representar un cambio drástico en el comportamiento de los materiales, ya que por ejemplo, en una estructura muy ordenada de átomos de carbón se puede obtener un material sumamente duro y resistente como los diamantes, en contraste una estructura poco ordenada de átomos de carbón puede resultar en un material débil y frágil como el grafito de los lápices. Otro ejemplo es el grafeno, un material que es resultado de la ingeniería de materiales avanzados, en la cual se han enfocado al ordenamiento de los átomos de carbón en una nanoescala, resultando un material sumamente resistente, y ligero.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Existen diferentes tipos de respuesta por parte de los materiales, que se desencadenan como reacción a un estímulo externo; estas respuestas son estudiadas, y son las que determinan las diferentes propiedades de los materiales. En general, se pueden clasificar las propiedades en dos grandes categorías: las físicas y las químicas.

- Las **propiedades físicas** son aquellas que pueden ser identificadas, o medidas cuando la composición química del elemento no ha sido alterada.
- Las **propiedades químicas**, son aquellas que provocan un cambio interno en la estructura interna o molecular manifestado como un cambio en la composición química del material al interactuar con alguna otra sustancia o elemento. Las principales propiedades químicas de un material son la combustión, corrosión, descomposición, disociación, fermentación, hidrólisis, punto de inflamabilidad, reacción de adición, condensación, reacciones de oxidación, y reacciones endotérmicas.

Para efectos de esta tesis, nos vamos a enfocar en dar un pequeño repaso a las propiedades físicas, pues son aquellas que para esta investigación son de nuestro interés, pues es aquí donde clasificaremos al material como viable o no para ser utilizado de acuerdo a los objetivos del proyecto.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Según Callister⁹, todas las propiedades físicas de cualquier material sólido, se pueden agrupar en seis diferentes categorías:

- **Mecánicas:** están relacionadas a la deformación del material como respuesta a una fuerza externa.
- **Eléctricas:** Tienen que ver con la conductividad eléctrica, y su comportamiento ante el estímulo de un campo eléctrico.
- **Térmicas:** Comportamiento del material ante un estímulo de temperatura.
- **Magnéticas:** Es la respuesta de un material al estímulo de un campo magnético.
- **Ópticas:** La respuesta del material ante un estímulo de irradiación de luz, o de un campo electromagnético
- **Deteriorativas:** Se relacionan con la respuesta del material ante una reacción química con otra sustancia.

Como parte del análisis de un material con fines estructurales aplicables a la arquitectura, es de particular interés revisar con más detalle las propiedades mecánicas.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de los materiales, son las que diferencian a un material de otro al momento de someterlos a cargas externas. Las propiedades mecánicas van a ser alteradas por la relación que existe entre composición química-estructura-procesamiento, que van a resultar en el desempeño que el material final pueda lograr, y por tanto las posibles aplicaciones. En la ciencia e ingeniería de los materiales, se ha aprendido a controlar estas tres variables con precisión para lograr nuevos materiales de alto desempeño. Para medir las propiedades mecánicas se recurre a ensayos destructivos hechos en ambientes controlados a través de los cuales se obtienen datos sobre el desempeño del material y con ello se puede deducir su comportamiento en aplicaciones reales. El comportamiento mecánico se describe a través de sus propiedades mecánicas, que son resultado de ensayos simples. Existen diferentes ensayos que ponen a prueba los materiales para conocer su reacción a diversos esfuerzos¹⁰

Las principales características que determinan el comportamiento de un material son:

⁹ Donald R. Askeland and Pradeep P. Phulé, *Ciencia E Ingeniería de Los Materiales*, ed. by International Thomson Editores, 3a edn (México, D.F.: International Thomson Publishing, 2004).

¹⁰ Callister, XCIV.

- **Elasticidad:** Propiedad de los materiales que tienen para sufrir deformaciones reversibles cuando son sometidos a la acción de fuerzas externas, y después de ello poder recuperar la forma original cuando las fuerzas externas cesan.
- **Plasticidad:** Es la propiedad que tienen los materiales para deformarse permanente cuando se encuentran sometidos a fuerzas externas y sobrepasan sus límites elásticos, alcanzando la zona plástica.
- **Fluencia:** Fuerza que se le aplica a un material para deformarlo sin que recupere su antigua forma al parar de ejercerla.
- **Tensión:** Es la resistencia máxima de un material sometido a esfuerzos de tensión antes de llegar a su punto de ruptura.
- **Torsión:** Es la resistencia que tiene un material para soportar fuerzas de giro (momentos en direcciones opuestas sobre el eje longitudinal de una pieza prismática)
- **Fatiga:** Es la deformación y/o ruptura que sufre un material después de habersele aplicado una misma fuerza en repetidas ocasiones.
- **Dureza:** Es la resistencia de un material a la penetración por un objeto duro.
- **Fragilidad:** Es la capacidad de un material a fracturarse con poca deformación.
- **Tenacidad:** Es la cantidad de energía de deformación que puede absorber un material antes de alcanzar la rotura en un impacto.
- **Resiliencia:** Es la cantidad de energía que puede absorber un material antes de fracturarse.
- **Ductilidad:** Es la propiedad que tienen algunos materiales, que bajo la acción de una fuerza pueden sufrir una deformación plástica sin quebrarse.
- **Maleabilidad:** Es la propiedad de poder deformar un material mediante descompresión sin que se quiebre.

Todas estas propiedades, nos van a ser de particularmente de interés, pues son aquellas que son determinantes al momento de innovar algún material con fines estructurales, puesto que de esto variará el tipo de comportamiento que presentará el mismo. Todas las propiedades aquí presentadas, están relacionadas entre sí; Es posible de ver gráficamente el comportamiento de un material a través de gráficas esfuerzo-deformación que nos sirven para realizar análisis y poder calcular algunas propiedades numéricamente de manera que se puedan tener datos precisos del comportamiento de dicho material ante diferentes esfuerzos, todo a partir de pruebas de laboratorio en las que un material es sometido a esfuerzo de tensión o compresión según sea el caso. A continuación explicaré como es que se lleva a cabo esta lectura de gráficas esfuerzo-deformación para poder describir el comportamiento de un material.

GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN

A través de éstas gráficas es posible ver cómo se comporta un material cuando es sometido a algún esfuerzo en particular. Además de ver cómo se comporta, con los datos obtenidos se puede analizar y calcular matemáticamente el comportamiento de manera exacta, de manera que existan datos precisos del comportamiento del material. Antes de explicar estos procesos, explicaré la manera de interpretar una gráfica de esfuerzo-deformación.

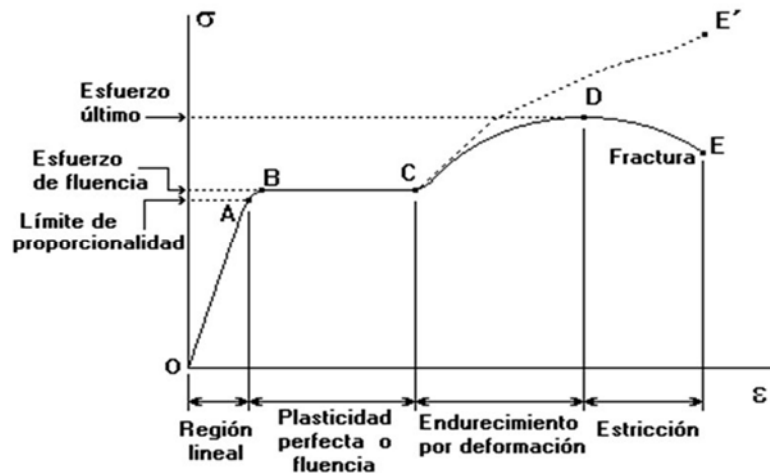


Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión. Imagen recuperada de [HTTPS://RODAS5.US.ES/ITEMS/9E078194-9C0C-34A2-B657-0FD5C59D6A2F/2/VIEWSCORM.JSP](https://rodas5.us.es/items/9e078194-9c0c-34a2-b657-0fd5c59d6a2f/2/viewscorm.jsp)

Esta es una gráfica de esfuerzo-deformación típica de un material dúctil sometido a esfuerzo de tensión. En el **eje ordenado (X)** encontramos la **deformación** que resulta del material, según el tipo de gráfica, puede estar en centímetros, metros, milímetros o en porcentaje. En el **eje de las abscisas (Y)** podemos ubicar el **esfuerzo** que presenta el material. Es importante que aquí no se confunda el esfuerzo con la fuerza aplicada, puesto que la máquina de pruebas estará ejerciendo una fuerza que incrementa a velocidad constante, sin embargo ese no es el parámetro aquí representado. Lo que en el eje Y se ve, es la oposición del material a la fuerza aplicada, es decir, la resistencia que opone el material a ceder ante la fuerza aplicada.

Una vez entendido los dos ejes, podemos analizar la reacción del material en cuestión para ver sus características, utilizando la gráfica arriba presentada como ejemplo.

- La primera sección, conocida como **zona de deformación elástica**, que en la imagen se marca como sección lineal y la ubicamos entre el punto “0” y “A” es en la que se deforma el material reversiblemente si quitamos la fuerza que se está aplicando. De dicha zona se puede calcular el

módulo de Young o módulo de elasticidad que es la relación que existe entre la deformación del material y el esfuerzo resistido. Generalmente en esta parte de la gráfica encontramos una recta, sin embargo algunos materiales presentan una curva, misma que para hacer el cálculo de Young se utiliza la tangente entre el “0” y el punto más alejado de la curva.

- La segunda sección que se conoce como la **zona de fluencia** y ubicamos en la gráfica entre el punto “A” y “B”. Significa que es el momento en que el material está pasando de ser deformado permanentemente. En esta zona, se indica la transición de tipos de deformación (elástica o plástica).
- La tercera zona que se conoce como la **zona de plasticidad** ubicada en la gráfica perfectamente entre “B” y “C”, hace referencia a que el material se está deformando sin aumentar el esfuerzo necesario para resistir el incremento en la carga aplicada. Es importante revisar aquí, que no todos los materiales presentan el mismo modelo de gráfica, puesto que generalmente esta zona es no tan larga, y no es tan recta como aquí se aprecia.
- La cuarta zona, o **zona de endurecimiento por deformación** marcada entre el punto “C” y “D”, nos indica que el material está aumentando el esfuerzo dentro de sí mismo, para poder soportar la fuerza creciente que le está aplicando la máquina, sin embargo, se está deformando más conforme aumenta la carga y su resistencia, hasta llegar el punto en el que su esfuerzo no puede ser mayor. Éste punto en la gráfica marcado con la letra “D” significa que es la **resistencia máxima** que puede oponer el material ante cualquier fuerza aplicada (en este caso de tensión).
- Finalmente, la zona marcada entre “D” y “E” nos indica que el material se está debilitando, y que cada vez opone menos resistencia a la creciente fuerza aplicada. Dado que la estructura de las moléculas del material ya están débiles, empiezan a ceder hasta el punto en el que el material no puede más, y se rompe. Este punto, es conocido como **el punto de ruptura o fractura**, y es literalmente cuando el material es separado en dos piezas para el caso de tensión, o es aplastado en el caso de compresión. En la gráfica está marcado como punto “E”.

Dependiendo del tipo de material, las gráficas se verán muy distintas, ya que por ejemplo un material frágil, presentará una deformación elástica y plástica mínima, llegando a la ruptura casi sin deformarse, como el caso del concreto, por lo que la gráfica se verá casi como una línea recta pero muy vertical pues casi no habrá deformación. A diferencia de un material elástico como una liga, que presentará demasiada deformación elástica antes de quebrar, por lo que habrá una línea recta casi horizontal, y sin presentarse deformación plástica, fallará.

Ahora bien, con estas gráficas, podemos obtener más datos a parte de los visibles gráficamente, sin embargo hay que calcularlos numéricamente para conocer su valor; Estos datos son principalmente los dos siguientes:

Módulo de Young:

El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados (ds) en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria (de) producidos. El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material: cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad.

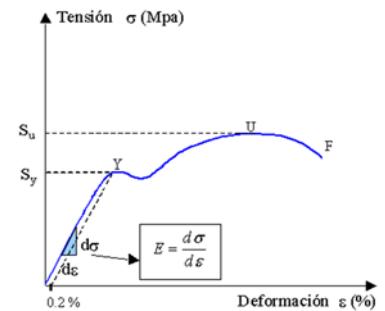


Diagrama esfuerzo-deformación. Explicación módulo de young.
Imagen recuperada de: [HTTP://WWW.MECAPEDIA.UJI.ES/MODULO_DE_ELASTICIDAD.HTM](http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm)

Coefficiente de Poisson:

El coeficiente de Poisson (ν) es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.

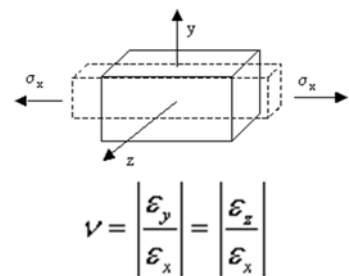
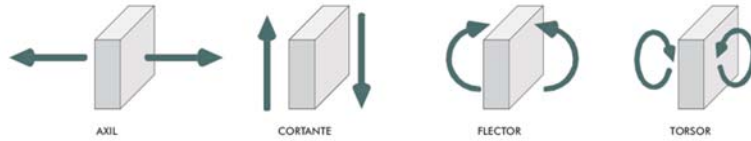


Diagrama y ecuación coeficiente de poisson.
Imagen recuperada de: [HTTP://WWW.MECAPEDIA.UJI.ES/COEFICIENTE_DE_POISSON.HTM](http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_poisson.htm)

TIPOS DE ESFUERZOS

Un esfuerzo, es una fuerza interna dentro de cualquier material, mismo que le da las propiedades de resistencia según la capacidad que tenga de aguantar esfuerzos mayores. Para que un material se encuentre inmóvil, es necesario que se cumplan los requisitos de equilibrio que estos esfuerzos manifiestan. Se puede decir que un esfuerzo, es aquella fuerza que encontramos dentro del material. Un ejemplo: Si extraemos un pedazo de barra que es parte de una viga, y la analizamos, encontramos que

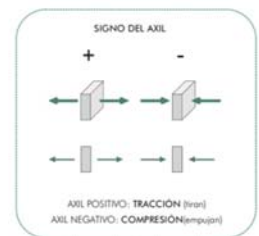
para que la rebanada no se deforme, debe tener todos sus esfuerzos internos en equilibrio¹¹. Estos esfuerzos son los que actúan directamente en el interior del material, son siempre parejas de fuerzas (o momentos) iguales y contrarios, que actúan sobre las dos caras de la rebanada. Podemos sintetizar estos esfuerzos en Axiales, cortantes, flectores y de torsión.



Tipos de esfuerzos. Imagen recuperada de tema 4: esfuerzos y solicitaciones, estructuras, universidad de sevilla

Según el tipo de material, puede que sea más resistente a un tipo específico de esfuerzo¹². Por ejemplo, un cable de acero, es muy resistente al esfuerzo axial, particularmente al de tensión, sin embargo, no opone ninguna resistencia a un esfuerzo cortante o de torsión. Como vemos, existen 4 diferentes tipos de esfuerzos: Axiales, cortantes, flexionantes, y de torsión.

Esfuerzos Axiales: Estos esfuerzos son aquellos donde se puede presentar una tensión o una compresión, es decir, que el material de un cuerpo es sometido a la acción de fuerzas contrarias que se alejan una de otra, o se acercan respectivamente, pero siempre sobre el mismo eje, y siempre en direcciones opuestas. Se conoce como compresión cuando las fuerzas van en dirección contrarias, de colisión, que se acercan mutuamente provocando que disminuya su volumen y que haya un cambio de longitud, particularmente de acortamiento. Se conoce como tensión cuando las fuerzas van en dirección contrarias, alejándose una de otra, y dan como resultado un cambio en la longitud del material, alargándolo.



Esfuerzos axiales. Imagen recuperada de tema 4: Esfuerzos y solicitaciones, estructuras, universidad de Sevilla

Esfuerzo de flexión: Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Es cuando actúan dos momentos en el plano de la barra, provocando tensión en una parte del elemento y compresión al otro lado del mismo.



Esfuerzo de flexión. Imagen recuperada de tema 4: Esfuerzos y solicitaciones, estructuras, universidad de sevilla

¹¹ Reyes Vigil Montaña, Alejandra Pastoriza Martínez, and Inés Fernández de Piérola, *Los Plásticos Como Materiales de Construcción*, 1a edn (Madrid, España: SAFEKAT, S.L., 2002).

¹² Askeland and Phulé.

Esfuerzo de cortante: Es el esfuerzo interno o resultante de las fuerzas con direcciones opuestas que son paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico. Se compone por dos fuerzas paralelas y opuestas en distinta parte del elemento.



Esfuerzo Cortante. Imagen recuperada de Tema 4: Esfuerzos y Solicitaciones, Estructuras, Universidad de Sevilla

Esfuerzo de torsión: En ingeniería mecánica se define como la aplicación de un par de momentos de fuerza en direcciones opuestas sobre el eje longitudinal de una pieza prismática.



Esfuerzo de Torsión. Imagen recuperada de Tema 4: Esfuerzos y Solicitaciones, Estructuras, Universidad de Sevilla

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Existen distintas clasificaciones propuestas por distintos autores. Para esta investigación usaremos la clasificación propuesta por Askeland, D. autor del libro “ciencia e ingeniería de materiales”¹³.

Los materiales se clasifican en cinco grupos básicos: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos. A continuación los describe:

- **Metales:** Son materiales inorgánicos formados por uno o más elementos químicos metálicos como hierro, aluminio, titanio, etc, que tienen un arreglo estructural atómico cristalino. Los metales y sus aleaciones generalmente, tienen como características principales una buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, alta rigidez, ductilidad o conformidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles al en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque se usan los metales puros, las combinaciones de éstos conocidas como aleaciones, proporcionan mejoría en alguna o varias propiedades deseables.

¹³ Antonio Delgado Trujillo and others, ‘Tema 4: Esfuerzos Y Solicitaciones’ (Sevilla, España, 2011), p. 40 <<http://personal.us.es/ejem/wp-content/uploads/2016/02/T04-Esfuerzos-internos.pdf>> [accessed 16 November 2017].

- **Cerámicos:** Son materiales que combinan elementos metálicos entrelazados con elementos no metálicos como óxidos nitruros y carburos. Pueden tener estructura atómica cristalina, semicristalina o no cristalina. Algunos de estos materiales son el óxido de aluminio, carburo de silicio, arcillas (porcelana), cementos, vidrios, etc. Tienen baja conductividad eléctrica y térmica, y a menudo son utilizados como aislantes. Este tipo de materiales se caracteriza por ser fuerte y duro, pero al mismo tiempo muy quebradizo y frágil. El desarrollo de las nuevas técnicas de procesamiento ha conseguido que los cerámicos sean lo suficientemente resistentes a la fractura para que puedan ser utilizados en aplicaciones de carga.
- **Polímeros:** son materiales con partículas de gran tamaño constituidas a partir de la repetición de moléculas de menor tamaño (monómeros). Se producen mediante un proceso conocido como polimerización, es decir, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas. Pueden tener largas cadenas moleculares basadas principalmente en el carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos. Generalmente tienen una estructura molecular semicristalina o no cristalina, sin embargo pueden tener secciones cristalinas. Los polímeros incluyen a los hules, plásticos, muchos tipos de adhesivos entre otros. Debido a la gran infinidad de polímeros que se pueden obtener, existen características igualmente infinitas, sin embargo se caracterizan por tener baja conductividad eléctrica y térmica, reducida resistencia y no son adecuados para utilizarse a temperaturas elevadas. Los polímeros termoplásticos (cadenas de moléculas no conectadas de manera rígida) tienen buena ductilidad y conformabilidad. Los polímeros termoestables, son más resistentes, aunque más frágiles porque las cadenas moleculares están fuertemente enlazadas.
- **Semiconductores:** Son muy frágiles, sin embargo, resultan esenciales en aplicaciones de electrónica, computación y comunicaciones. La conductividad eléctrica de estos materiales puede controlarse para su uso en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados. Actualmente la información se transmite a través de sistemas de fibras ópticas: es decir, semiconductores, que pueden convertir las señales eléctricas en luz y viceversa.
- **Materiales compuestos:** Los materiales compuestos son basados en la unión de una matriz con un material de refuerzo que suele ser un tipo de fibra o polvo. Las fibras reciben la tensión a la que se somete el material, y debido a su gran módulo de elasticidad se adquieren unas propiedades mecánicas únicas, además de que tienen costos de ensamblaje menores, se reduce su peso, el costo de producción es menor, puede lograr una superficie más lisa, y por el tipo de procesado que requiere, se permite una facilidad de incorporación a diseños más complejos¹⁴. Los materiales compuestos se forman a partir de dos o más grupos de materiales, produciendo propiedades que no se encuentran en ninguno de los grupos de manera individual. Con materiales compuestos

¹⁴ Askeland and Phulé.

podemos producir materiales más ligeros, fuertes, dúctiles, resistentes a las altas temperaturas, o bien podemos producir herramientas de cortes duros y a la vez resistentes al impacto

RESUMEN CAPÍTULO

A través de conocer las diferentes clasificaciones y propiedades de los materiales podemos determinar que para fines estructurales en grandes edificaciones lo más convenientes es recurrir a materiales dúctiles cuya resistencia mecánica sea lo suficientemente fuerte como para resistir aun cuando ya se haya presentado una deformación plástica.

Para efectos de nuestro tema de tesis, el escenario ideal que buscamos, es que el material propuesto tenga la suficiente resistencia mecánica en compresión y cortante como para resistir esfuerzos estructurales. Específicamente compresión y cortante puesto que estos son los esfuerzos a los que suele someterse un prototipo de construcción a base de mampostería, tal como un block hueco o un ladrillo. Puesto que este tipo de construcción se basa en la transferencia de cargas de manera axial a los elementos de carga, estos van a trabajar únicamente a compresión. La fuerza cortante es la que se va a involucrada en puntos muy específicos del sistema, particularmente en sismos, momentos en los cuales, debido a las fuerzas producidos por los mismos, habrá una serie de cargas que actuarán de manera lateral, impactando al sistema entero de maneras fuera de lo común. Es en éste momento en el que el sistema (muro de mampostería construido a partir del material compuesto propuesto) se ve sometido a fuerzas cortantes, y es la principal razón por la que nuestro material debe soportar este tipos de esfuerzos, ya que según el diseño del prototipo, podremos disminuirlos en algunas partes, sin embargo es un tipo de esfuerzo que es prácticamente imposible de disminuir significativamente en éste tipo de muros, y sobre todo en aquellos que están dispuestos a formar parte de un sistema estructural de una edificación.

Ahora que ya sabemos a qué esfuerzos debe ser más resistente nuestro material, es importante conocer el comportamiento que éste debe mantener. Si bien no todas las propiedades podrán ser probadas, existen unas cuya importancia es tal, que son determinantes para el comportamiento de los materiales. Por supuesto hablamos entre otros de la rigidez del material, ya que mediante las pruebas de laboratorio, y las gráficas de esfuerzo deformación podremos determinar si nuestro material tiene un comportamiento frágil (llega a fallar sin una gran deformación), o dúctil (se deforma según la carga a la que es sometido, sin afectar directamente su resistencia). Para nuestro material, y según los objetivos que planteamos para el mismo, nos conviene bastante que el material sea dúctil al comienzo de los esfuerzos, y llegando a un límite de ductilidad en el que las moléculas se acomoden, rigidizando al material dándole un comportamiento frágil pasada la zona dúctil. Otra propiedad para nuestro interés, es la resistencia al

impacto, pues si hablamos de un material muy frágil, no queremos que se despostille o rompa fácilmente con cualquier golpe, sin embargo si por el otro lado, si es muy dúctil, tampoco queremos que se deforme fácilmente con cualquier golpe, es decir, queremos que tenga una resistencia al impacto lo suficiente como para desempeñarse con el objetivo que tenemos sin poner en riesgo en ningún momento su integridad como material, ya que podría ver vidas en juego.

En conclusión, se puede decir que nuestro material ideal debe de contener las siguientes características:

- Buena resistencia a la compresión y cortante.
- Poca o nula deformación elástica.
- Pequeña zona dúctil, seguida de un comportamiento frágil cuando se somete a esfuerzos.
- Una Dureza, o resistencia al impacto suficiente como para no quebrarse ni deformarse fácilmente.
- Debe ser un material tenaz, capaz de resistir algo de deformaciones cuando se impacten objetos sobre su superficie.
- Estas propiedades pueden ser logradas de manera sustentable a través de la creación de algún material compuesto.

MATERIALES COMPUESTOS

DEFINICIÓN

Un material Compuesto es aquel que se forma a partir de dos o más materiales, a partir de la unión química o no química, obteniéndose características que no se encuentran en ninguno de ellos si los analizamos de manera individual. Los componentes que forman el material compuesto, no deben disolverse unos en otros, puesto que finalmente hablamos de un material heterogéneo, el cual a través de medios físicos debe permitir que se identifiquen las diferentes fases.¹⁵

En un material compuesto se pueden identificar dos fases: La matriz, cuya función es envolver y unir todas las; y la Fase dispersa, discontinua o de refuerzo. Ambas Fases deben de ser cuidadosamente seleccionadas, para obtener las mejores propiedades de cada una, de manera que integralmente se produzca un material más eficiente que cualquiera de los preexistentes. La dificultad en la producción de un material compuesto, radica en que los materiales participantes en la mezcla, puedan adherirse unos a otros con facilidad en una zona conocida como interface que a va a determinar si los componentes van a trabajar en equipo cuando sean sometidos a esfuerzos externos.

Para que se considere como material compuesto debe de satisfacer dos requisitos:

- Contar dos fases heterogéneas, que consisten en una matriz y un refuerzo
- Tener una relación entre ambas fases, que puedan ser observables a partir de un tamaño mínimo de refuerzo de 10um (por dispersión) hasta una relación de macro escala como la que encontramos en la unión de concreto reforzado (concreto reforzado con varillas de acero)

Un material compuesto, para ser llamado como tal, debe de tener un mínimo de dos fases, sin embargo, pueden mezclarse un sinfín de componentes hasta lograr el resultado buscado. Las dos fases que determinan que un material compuesto son las siguientes: Matriz que será profundizado más adelante y un refuerzo.

¹⁵ Callister, XCIV.

MATRIZ

Un material compuesto, como ya vimos es aquel que se compone por un mínimo de dos fases o materiales distintos, y que tiene por objetivo el obtener las mejores características de cada uno, para así obtener algún nuevo material con nuevas capacidades. Estas fases se conocen como matriz y refuerzo. La fase de refuerzo, se compone de distintos materiales, generalmente capaces de absorber esfuerzos mecánicos; esta fase puede ser de diferente tipo, ya sea refuerzo por partículas, de fibras (cortas, largas, continuas o discontinuas) que según la manera de ordenarse pueden tener mejor o peor respuesta a esfuerzos mecánicos. La otra fase, la **matriz**, o fase continua es la de mantener unido todo el compuesto, proteger al refuerzo, y transmitirle a éste todos los esfuerzos mecánicos, ésta fase, puede ser generalmente de tres tipos distintos: **polimérica, metálica, o cerámica**. Según el tipo de matriz que se utilice, son las propiedades que se le puede dar al material compuesto, ya sea resistencia térmica, ductilidad, fragilidad, entre otros.

Se conoce como fase continua debido a que es la que existe dentro de un material compuesto, formando a lo largo de todo el compuesto una capa continua de protección del material de refuerzo. La matriz en un material de compuesto es la que determinará en mayor parte las propiedades físicas y químicas del material, así como el acabado del mismo. Las principales funciones de la matriz son:

- Transmitir esfuerzos a la fase de refuerzo;
- Dar protección a la fase dispersa contra el desgaste, compresión, condiciones climáticas, agentes químicos, etc.;
- Unir toda la fase de refuerzo mediante fuerza adhesiva;

La matriz puede ser de diferentes materiales, y teniendo mejores propiedades dependiendo del cual se trate.

MATRIZ POLIMÉRICA (PMC).

Son formados por materiales de polímero, mismos cuyas propiedades son demasiado bastas, por lo que pueden producirse materiales de gran resistencia física y química que sean flexibles y resistentes como el caucho en las llantas, o ligeros, rígidos y resistentes como el polipropileno, resistentes al impacto como el policarbonato, etc.

Son las matrices más comunes. Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y a causa de sus propiedades físicas, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas lo que facilita de producción de piezas, a través de métodos de producción

por moldeo, inyección, o extrusión, lo que facilita su implementación en procesos industriales de grandes volúmenes, así como los utilizados en la industria automotriz, marítima, entre otras. La principal desventaja de estos compuestos (particularmente los termoplásticos, que es lo más común), es la limitante de uso en altas temperaturas, en cuyo caso se cambia por polímeros menos comunes como las poliamidas aromáticas, que son polímeros termoestables.¹⁶

Se puede clasificar en tres tipos de matrices según el polímero que se utiliza:

- **Termoplásticos.** Son polímeros que típicamente tienen una manera de comportarse plástica y dúctil. Al calentarse estos polímeros, se ablandan, relajando los enlaces en sus cadenas moleculares permitiendo un deslizamiento entre ellas, convirtiéndose en un fluido viscoso que puede ser moldeado o reciclado con facilidad mientras está caliente. Al momento de enfriarse, sus cadenas moleculares vuelven a fortalecerse provocando una solidificación del material. Lo más importante de éste tipo de polímero es que el proceso de calentamiento para moldear y enfriamiento para solidificar puede repetirse varias veces sin sufrir un cambio en su estructura química.
- **Termoestables.** Estos polímeros generalmente son más resistentes y frágiles. Este tipo de polímero, está construido por fuertes enlaces cruzados entre ellas formando estructuras de redes tridimensionales. Lo importante de este material es que una vez que sus enlaces se formaron, son difíciles de modificar por cualquier medio, ya que si se vuelven a calentar, en vez de relajarlos, van a sufrir un cambio en su estructura química irreversible. En resumen, el moldeo en estos materiales, puede realizarse una sola vez, dado que una vez formado, difícilmente va a poderse modificar, y si se calienta, se va a quemar.
- **Elastómeros.** Tienen una estructura intermedia, en la cual sus enlaces permiten el reacomodo de moléculas sin romperse, permitiendo una ligera formación de enlaces cruzados en las cadenas. Esta propiedad permite que su estructura se ordene al momento de ser expuesto a una fuerza externa, y recobrando su estado amorfo al ser liberado de la misma. Este tipo de materiales tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades, sin llegar a una deformación plástica o un cambio permanente.

Los refuerzos más comunes son:

- **Fibras de vidrio.** es un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos y al solidificarse tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra. Tiene buena relación entre resistencia-peso, estabilidad dimensional, es barato, de fácil

¹⁶ Carlos Pérez Alonso, 'Naval Composites : Los Materiales Compuestos Y La Industria Naval' (Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Nautica de Barcelona, 2016).

fabricación, buena resistencia térmica, resistencia a la corrosión, humedad y un buen aislante eléctrico. Se utiliza como ejemplo para construcción de lanchas y botes.

- Fibras de Carbón. Es de baja densidad y alta tenacidad, tiene baja dilatación térmica, buena resistencia química, sin embargo tiene un costo muy alto. Tiene aplicaciones en la industria automotriz y la aeroespacial.
- Fibras de Aramida. Son de baja densidad, alta rigidez, elevado módulo de elasticidad, buena resistencia a altas temperaturas, sin embargo, también tienen un alto costo. Según el proceso de producción, se puede conseguir mayor resistencia que la del acero, y ligereza simultáneamente, lo que permite usos en la industria aeroespacial, o militar.

MATRIZ METÁLICA (MMC)

Son aquellas formadas a través de metales ligeros y dúctiles como aluminio, níquel, por lo general son materiales resistentes y ligeros. Este tipo de matrices permite que el compuesto pueda ser utilizado en altas temperaturas, sin embargo su producción es más compleja y costosa, que la producción de matrices poliméricas.¹⁷

Se pueden clasificar en dos grupos según la aplicación a la que serán sometidos:

- Materiales destinados para aplicaciones de corte (**metales duros**). Los primeros generalmente son carburos cementados, aceros reforzados con carburos, y se basan en matrices de transición (Co, Fe, Ni).
- **Materiales** para aplicaciones **estructurales**. es el utilizado en la industria automotriz o la aeronáutica, y se basa principalmente en aleaciones ligeras con base en Aluminio, Titanio, Magnesio, cobre, níquel, y sus aleaciones. Tiene propiedades de alta resistencia al desgaste y alta rigidez, resistencia, módulo específico, y ligereza.

Ambos grupos son materiales compuestos, sin embargo, es muy común que se consideren únicamente como compuestos al segundo grupo; ya que a los primeros se le conoce también bajo la definición de metales duros y es aquí donde ubicamos al acero.

Se pueden reforzar con los siguientes:

- Fibras continuas: estas pueden ser metálicas y cerámicas. Las fibras metálicas se emplean poco a causa de su posible ataque químico por parte de la matriz, los cambios estructurales por la

¹⁷ José Dávila and others, *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*, ed. by Victor Hugo Guerrero, 1ra Edición (Quito, Ecuador: Imprefepp, 2011).

elevación de temperatura (en particular la recristalización), la posible disolución de la fibra en la matriz y la relativamente oxidación. Por ello se utilizan más las fibras cerámicas, que presentan numerosas ventajas: no se disuelven en la matriz, su resistencia se mantiene a temperaturas elevadas, su módulo de elasticidad es alto, no se oxidan (con carácter general) y tienen baja densidad.

- Partículas: Es la manera más económica de refuerzo, y permite una mayor isotropía de propiedades. Refuerzos típicos en forma de partículas son la mica, óxidos, carburos, nitruros. Los materiales más empleados son el grafito, la alúmina (Al_2O_3) y el carburo de silicio (SiC)
- Fibras discontinuas o whiskers. Las más utilizados son las mezclas de óxidos,

Se puede también diferenciar las diferentes familias de matrices metálicas según el material con el que se produce, siendo las principales:

- Materiales compuestos con matriz de aluminio y sus aleaciones (Al-MCs): el aluminio es ligero, que es el primer requisito en la mayor parte de las aplicaciones de los MMCs actuales, además de que es un material barato. Tienen aplicaciones desde la industria de automoción y aeronáutica, hasta en ocio. Tienen excelente resistencia, ductilidad, resistencia a la corrosión. La producción de materiales compuestos en sí, es bastante compleja y cara.
- Materiales compuestos con matriz de titanio y sus aleaciones (Ti-MCs): Generalmente tiene aplicaciones estructurales, con utilización principalmente en la industria aeroespacial, particularmente en la construcción de motores a propulsión.. Es más denso que el aluminio y es el metal con la mejor relación de resistencia/densidad de entre todos los llamados ligeros (Al, Mg, Be). Por su elevado punto de fusión mantiene su resistencia a altas temperaturas, mucho mayores que el aluminio. Además, la resistencia a la corrosión y oxidación es buena.
- Materiales compuestos con matriz de magnesio y sus aleaciones (Mg-MCs): El magnesio es el más ligero de los metales estructurales. las propiedades mecánicas y rigidez de las matrices de magnesio son comparables con los materiales de base aluminio. Sin embargo, las propiedades frente a la corrosión de este material son pobres. Este problema se minimiza mediante técnicas de pintura y recubrimiento. El elevado coste de estos materiales limita su uso a aplicaciones muy concretas, como por ejemplo, aplicaciones en satélites espaciales.
- Otros matrices metálicas: se han desarrollado materiales compuestos de base hierro para reducir costes en componentes resistentes al desgaste en la industria química y en industrias de procesado

MATRIZ CERÁMICA (CMC)

Producidas con materiales cerámicos como carburo de silicio, tienen propiedades de buena tenacidad, o resistencia térmica. Son raros estos compuestos, sin embargo existen, y tienen excelentes propiedades, particularmente la de tener una temperatura de servicio superior a las matrices poliméricas y metálicas, además pueden llegar a ser notoriamente más ligeros que las matrices metálicas, sin embargo, con este tipo de matrices, se obtienen materiales frágiles, no útiles para cualquier función, tienen excelente resistencia a la compresión pero no a la tracción. Generalmente se refuerzan con: ¹⁸

- fibras metálicas: Aumenta la resistencia al choque térmico, sin embargo, facilita la oxidación, eleva la densidad (resulta en baja resistencia, y a módulos específicos)
- fibras de carbono: Mejora la rigidez, resistencia, la energía de fractura del material, disminuye la densidad, y resiste alta temperatura, sin embargo, se oxida fácilmente en presencia de oxígeno.
- fibras cerámicas: la más utilizada es el carburo de silicio, lo cual permite una mejor resistencia a la oxidación que los metales y las fibras de carbono.

Se clasifican en:

- matrices **vidriosas**: producidas a partir de silicatos amorfos;
- **cerámicos tradicionales**: producidos por alfarería y cemento;
- **nuevas cerámicas**: basados en compuestos de óxidos y carburos, como alúmina que se obtiene de la bauxita y carburo de silicio producido a partir de arena y coque.

Un importante detalle a revisar en estos compuestos, es el coeficiente de expansión de la matriz y el de las fibras, puesto que si difieren por mucho, se puede generar la rotura del material durante el enfriamiento y/o calentamiento. El proceso de producción más común más conocido es el sinterizado donde la matriz se hace polvo, y se mezcla con las fibras de refuerzo, para posteriormente someterse a presión y calor, lo cual produce un material de baja porosidad. Este proceso permite fabricación de piezas de geometría simple.

¹⁸ Dávila and others.

REFUERZO

La fase de refuerzo, también conocida como discontinua es la que se agrega a la matriz con intención de mejorarla en algunas propiedades específicamente, ya sean mecánicas, térmicas, químicas entre otras. En la mayoría de los materiales compuestos actuales, se utilizan las fibras como material de refuerzo, sin embargo como veremos, no es el único tipo de refuerzo que puede agregarse. Los diferentes tipos de refuerzo, se clasifican según su morfología y su origen. Los refuerzos que se utilizan en los materiales compuestos pueden ser de dos tipos: Fibras (con cualquiera de sus variantes) y partículas, que se verán más adelante en el documento.¹⁹

La fase de refuerzo es la que se agrega a la matriz con intención de mejorarla en algunas propiedades específicamente, ya sean mecánicas, térmicas, químicas entre otras. En la mayoría de los materiales compuestos actuales, se utilizan las fibras como material de refuerzo, sin embargo como veremos, no es el único tipo de refuerzo que puede agregarse. Los diferentes tipos de refuerzo, se clasifican según su morfología y su origen. Los refuerzos que se utilizan en los materiales compuestos pueden ser de dos tipos: Fibras (con cualquiera de sus variantes) y partículas.

REFORZADOS POR PARTÍCULAS

El refuerzo de partículas va de entre de entre 10 y 250um de diámetro. Aun cuando las particular no posean buena adhesión a la matriz, evitarán el movimiento de las dislocaciones, es decir, aumentarán la rigidez del compuesto, a través de un efecto de endurecimiento. Como material de refuerzo se puede utilizar piezas homogéneas de otros materiales, que ofrecen como ventaja una mayor isotropía de los materiales. Se clasifican en dos tipos de partículas:²⁰

Partículas grandes

Su tamaño es de entre 100 y 250um. El término hace referencia a las interacciones entre la matriz y la partícula en las que no se pueden llevar a cabo a un nivel atómico o molecular, limitándose a una relación mecánica. En este tipo de refuerzos, las partículas tienden a ser más duras y resistentes que la matriz, cuya función es únicamente transferirle los esfuerzos a las partículas. En estos materiales, la función de las partículas consiste principalmente en restringir el movimiento de la matriz a través de medios mecánicos, que es lo que le da la rigidez al material. La resistencia del material está determinada principalmente por la fuerza de unión en la zona de interface entre la matriz y el refuerzo. En el caso de

¹⁹ Dávila and others.

²⁰ Callister, XCIV.

los polímeros, el material de refuerzo se procura que sea de tamaño grande, de manera que se mejoren, o reemplacen gran parte del volumen del material con alguno más económico. Estos materiales pueden fabricarse con matrices poliméricas, cerámicas o metálicas. Algunos ejemplos son los “cermets” que son materiales compuestos cerámico-metal. El más común de este tipo es el carburo cementado (metal duro) compuesto de carburo de tungsteno (WC) o el carburo de titanio (TiC), embebidas en una matriz metálica, como el cobalto o el níquel, con la principal aplicación en herramientas de corte, en las que el material duro pero frágil es el carburo de titanio, y la parte dúctil que resiste a los esfuerzos del corte es la matriz metálica. Otro ejemplo, es el “negro carbón”, lo cual es un material con el que se refuerzan polímeros, elastómeros y plásticos, aumentando sus propiedades de módulo de elasticidad, tenacidad, resistencia al desgarre, y abrasión. El negro carbón son diminutas partículas esféricas de carbón, producidas por combustión de gas natural o petróleo, en una atmósfera con aire limitado. Las partículas largas se conocen así debido a que la interacción entre matriz y refuerzo no se pueden dar a nivel atómico o molecular, por lo tanto la adhesión es de tipo mecánica continua. La mayoría de estos compuestos, constan con una zona particulada, que es la parte más dura y rígida. Las partículas ayudan a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula, que lleva una fracción de la carga. La resistencia depende de la unión entre la matriz y partícula de interfaz. Una característica principal de este tipo de refuerzos, es que debe de existir baja solubilidad entre el refuerzo o dispersante y la matriz, evitando reaccionar químicamente. La geometría de las partículas puede ser de muchas formas, sin embargo, se busca que todas las partículas tengan una dimensión aproximada similar en todas las direcciones, así como tener una distribución uniforme a lo largo de todo el material. Es importante resaltar que las propiedades mecánicas incrementan ante el aumento de contenido de partículas de refuerzo.

Generalmente estos materiales no son muy resistentes a temperatura ambiente, sin embargo, sus propiedades no se ven disminuidas al aumentar la temperatura, ya que las partículas y matrices no modifican su tamaño ni su estructura, por lo que su resistencia a la termofluencia es bastante superior a la de aleaciones y metales, por eso el mejor ejemplo de esto es la grava y arena dentro del concreto.

Otro ejemplo no muy escuchado es el de la plata reforzada con tungsteno, compuesto que facilita una resistencia al desgaste y simultáneamente es buen conductor eléctrico, y es la razón por la cual se utiliza en interruptores y apagadores. El tungsteno se agrega mediante polvo a través de un proceso de molienda, posteriormente, se agrega plata líquida, quien es la fase continua. La plata aporta la conductividad eléctrica, mientras que el tungsteno aporta la resistencia al desgaste.

Fortalecidas por dispersión

Es cuando tienen tamaños de entre 10 y 100µm. Estas partículas ayudan al fortalecimiento de la matriz, mediante relaciones a nivel atómico o molecular. En este tipo de refuerzo, la matriz se lleva la mayor parte de la carga aplicada, dejando a las partículas dispersas el trabajo de dificultar o impedir el movimiento de las dislocaciones, por lo que el rendimiento, la resistencia a tensión y dureza mejoran. Las partículas utilizadas en estos materiales, son elegidas para que no sean reactivas con la fase de matriz. Este tipo de refuerzo es de menor tamaño que las partículas grandes, con tamaños entre 0.01 a 0.1 µm. En el caso de este tipo de refuerzo, la zona de interface relaciona a la matriz y al refuerzo a un nivel atómico o molecular. En este caso, la matriz soporta la mayoría de los esfuerzos, dejando a las partículas la función de mantener a todo el conjunto unido, impidiendo el movimiento de dislocaciones. Esta es la razón por la que este tipo de materiales, tienen una deformación plástica muy limitada, aumentando la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad y la dureza.

REFORZADOS CON FIBRAS

Las fibras son elementos filiformes que tienen una longitud elevada en relación con su dimensión transversal máxima, que se caracteriza por su flexibilidad y finura, sus cadenas moleculares están extendidas en línea recta (o casi recta) una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje. En general son el compuesto químico que las forma tiene una estructura ordenada, es decir, cristalina, lo que le permite tener longitudes muy largas.²¹ Éstas características de geometría, le dan propiedades particularmente útiles a las fibras, puesto la mayoría, son muy flexibles, y resistentes a esfuerzos de tensión en paralelo a la fibra, es decir, que son buenas cuando las estiran por sus lados más largos. Sin embargo, a pesar de sus buenas propiedades mecánicas en estos dos aspectos, tienen desventajas también, puesto que son débiles a esfuerzos de compresión, es decir, que cuando se aprietan son fácilmente deformadas o quebradas oponiendo poca resistencia, al igual que son débiles cuando se someten a esfuerzos de tensión en perpendicular a la fibra, es decir, estirándolas transversalmente a la fibra por su lado más corto. Esto nos hace ver, que son un elemento potencialmente bueno para utilizar como refuerzo en materiales compuestos, en los que los materiales de matriz, tienen propiedades mecánicas distintas a las fibras, complementándose mutuamente, pues los esfuerzos de tensión son absorbidos por las fibras, mientras que los esfuerzos a compresión son absorbidos por la matriz. Se pueden clasificar según su origen y según su morfología:

²¹ Callister, XCIV.

Clasificación de fibras según su origen

Fibras Naturales: son producto de la naturaleza, ya sea de origen animal, vegetal o mineral, podemos encontrarlas con distintas longitudes y características. Al ser una materia prima, no se tiene un control sobre sus características natas, sin embargo se le pueden agregar aditivos químicos, que pueden mejorar algunas de sus propiedades. En general, las fibras naturales se caracterizan por tener un orden en sus moléculas, mismo que afecta directamente a sus propiedades; entre más ordenadas estén, tienen características de resistencia mecánica, química, y rigidez, entre menos ordenado, sus características son de más elasticidad, menos resistencia y suavidad. Han tenido amplia industrialización en el sector textil, dando origen a los hilos con los que se producen las distintas telas.

Las fibras naturales de origen animal pueden derivar de las secreciones glandulares de ciertos insectos, o de algunos animales que presentan una estructura molecular específica como la de queratina, que encontramos en la lana o como la fibroína de la seda. Las fibras vegetales son estructuras alargadas de sección redonda, que se pueden clasificar según su origen en: fibras de la semilla, tallo fibras, fibras de las hojas, y fibras de frutas. Presentan como principales ventajas: abundancia, bajo costo, de baja densidad, la capacidad de absorción de dióxido de carbono del medio ambiente, biodegradabilidad y renovabilidad, sin embargo, sus principales desventajas son: una alta absorción de humedad, baja resistencia a los microorganismos, baja estabilidad térmica y propiedades mecánicas inferiores a las de las fibras no naturales. Las fibras de origen mineral tienen su origen en rocas con estructura fibrosa y consisten esencialmente de silicatos.

Fibras sintéticas: son producto de reacciones químicas controladas, que permiten variar una gran variedad de propiedades tales como resistencia a esfuerzos externos, estabilidad térmica, rigidez, entre otros²². Pueden ser de origen natural que a través de algún proceso químico se producen las fibras, o bien pueden ser de origen totalmente inorgánico, con materiales como como carbono, silicio y boro que después de recibir tratamiento a temperaturas elevadas se transforman en fibras. Pueden tener una longitud ilimitada (controlada según las necesidades) y por lo general se producen a través de la acción de agentes químicos en procesos de extrusión. La aparición de fibras sintéticas contribuye fuertemente a la ampliación de la gama de aplicaciones de material a base de fibras, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas físicas, químicas. Han logrado avances en productos como en prendas de vestir, textiles para el hogar, la medicina, el transporte, la industria aeroespacial, la construcción, entre otros.

²² Callister, XCIV.

Clasificación de fibras según su morfología

En un material de refuerzo, las fibras pueden ser de dos tipos independientemente del origen, y según la manera en que se acomodan dentro de la matriz, pueden estar ordenadas unidireccional, bidireccional y tridimensionalmente:

Fibras Continuas Son las que se producen de manera continua, y pueden tener longitudes solamente interrumpidas cuando se detiene la producción. Tienen como ventaja que al ser continuas y largas permiten un acomodo, organización o tejido de las mismas según las necesidades del material, ofreciendo un mejor refuerzo en el sentido que se quiera. Ejemplos son las fibras de nylon o fibras de carbón.

Fibras Discontinuas Son las que según su método de obtención, carecen de una continuidad. Si bien se pueden acomodar para ordenarlas lo mejor posible, la discontinuidad de las mismas representa posibles puntos de falla en la separación de las fibras.

COMPOSITOS ESTRUCTURALES

Consisten en varias capas anisotrópicas que sobreponen una sobre otra con algún adhesivo que tendrán un desempeño isotrópico cuando sea acomodada cada capa en distinto orden.

Son capas de materiales unidos por algún adhesivo orgánico, de esta manera, el adhesivo orgánico impedirá que se vuelen fragmentos en caso de una rotura. Este tipo de laminados se utilizan como aislamientos, tarjetas, tableros, o elementos decorativos. Existen también compuestos conocidos como micro laminados que se componen de más de una capa, que se utilizan en algunos casos como recubrimiento de aeronaves.

Paneles sándwich

Tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas a algún material ligero de relleno, como puede ser alguna espuma de polímero. Ni el relleno, ni el material de recubrimiento son resistentes o rígidos, sin embargo, al mezclarse entre ellos, se obtiene un material con ambas propiedades. Un ejemplo de esto, es el papel corrugado, quien se une por ambos lados a papel, plano y grueso. Ni el corrugado ni el papel son rígidos, sin embargo su combinación si lo es.

Las capas de estos compuestos laminares están formadas por materiales distintos, que pueden ser de hojas metálicas, poliméricas, orgánicas entre otros. Uno de estos materiales aportará la resistencia, mientras que el otro aportará la dureza, resistencia a la corrosión, y ambos funcionarán con una estabilidad dimensional bastante buena. Las diferentes capas a su vez, pueden incluir capas de materiales ya

reforzados con fibras orientadas, hojas de metal, polímeros, entre otros. Este tipo de compuestos son siempre de comportamiento anisotrópico. Este tipo de materiales incluye a los panales (compuestos muy ligeros, con caras sólidas unidas a un núcleo de baja densidad).

INTERFACE

La interfaz es la zona de transición entre matriz y refuerzo, y es de vital importancia, pues la zona en la que se llevan a cabo la transferencia de esfuerzos de una a otra y de regreso. La adhesión entre matriz y refuerzo es determinante para la resistencia a las propiedades mecánicas puesto que pueden ser dos muy buenos materiales, pero no se adhieren, puede que sean más frágiles que al principio.

Existen cuatro tipos de adhesión según el tipo de material del que se trate: ²³

- **Unión mecánica:** La unión mecánica depende principalmente de las rugosidades de los constituyentes del material. Cuando mayor es la rugosidad, la superficie de la interfaz será más efectiva bajo esfuerzos cortantes. Sin embargo, bajo esfuerzos axiales la unión es poco efectiva.
Escala Macro
- **Unión electrostática:** La unión electrostática se genera cuando una de las superficies tiene carga positiva y la otra carga negativa.
- **Unión química:** En el caso de la unión química la superficie del refuerzo posee grupos químicos que son compatibles con los grupos químicos de la matriz. De esta forma, la resistencia de la unión dependerá del número de uniones por unidad de área.
- **Unión mediante interdifusión:** Se genera en elementos poliméricos. En este caso, la superficie del refuerzo y de la matriz tienen cadenas poliméricas, las mismas que se difunden entre ellas. Es así que la resistencia de esta unión dependerá de la cantidad de entrelazamientos entre las cadenas poliméricas. Esta resistencia puede incrementarse con la utilización de disolventes o plastificantes.

²³ Dávila Moreno and Brugger Jakob.

PROCESO DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Podemos clasificar a los materiales compuestos en dos grandes grupos, diferenciados únicamente por el tipo de molde en el que se producen, ya sea por moldes abiertos, o moldes cerrados. A continuación describo los diferentes procesos para cada tipo de molde.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN POR MOLDEO ABIERTO

Contacto manual: También conocida como lay-up, es la técnica más simple para obtención de materiales compuestos a partir de una matriz termoestable. Este tipo de matriz, es fácil de procesar ya que se encuentra en estado líquido lo permite que los refuerzos queden bien impregnados, además de que puede ser utilizado y procesado a temperatura ambiente.²⁴ Es común encontrar matrices de poliésteres, resinas epóxicas y fenólicas en este proceso. Para que se lleve a cabo el proceso de curado, a la resina debe ser agregada a un iniciador que es el que desencadena la reacción formando los entrecruzamientos de cadenas poliméricas, y posteriormente un catalizador que acelere la reacción. El material de refuerzo puede ser de fibras cortas, fibras largas o tejidos con las mismas, y generalmente no se agrega más del 40% en volumen de la mezcla final. En este proceso se pueden presentar burbujas de aire atrapadas en el material que pueden ascender hasta un 15%. La fibra más utilizada en este proceso es la fibra de vidrio, debido a su versatilidad en cuanto a la adaptación a distintas formas y su bajo costo. Generalmente para el acabado final, se utiliza una resina llamada GELCOAT que permite la protección del material compuesto de la humedad y la intemperie, dando un acabado final liso y brillante al material. El proceso de fabricación a través de este método es el siguiente:

- Agregar un agente desmoldante al molde para facilitar el desmoldeo de las piezas.
- Se agrega gelcoat al molde a través de una pistola de aspersión o con un rodillo
- Una vez curado parcialmente el gelcoat, se coloca el tejido o refuerzo, y se coloca resina ya catalizada sobre cada capa de refuerzo. Se aplica fuerza con un rodillo para que la resina impregne a todas las fibras, eliminando burbujas de aire.
- Finalmente se deja curar la pieza y se procede a retirar la pieza del molde.

Este proceso tiene ventajas como su simplicidad, diversidad de tamaños y formas, se puede tener un alto contenido de refuerzo, no requiere de calor, y los materiales son baratos.

²⁴ Dávila and others.

Las desventajas de este proceso, es la alta demanda de trabajo, el bajo control de espesores de la pieza, así como la carencia de calidad en el control de acabados finales, no se puede utilizar en operación de grandes volúmenes de producción.

Algunos ejemplos de piezas fabricadas con este proceso, son piscinas, cascos de embarcaciones, paredes falsas, láminas en el sector automotriz, fuselajes de aviones, etc.

Proyección: En este método se utiliza una pistola de presión que lanza simultáneamente las fibras y la resina catalizada. Se utiliza una máquina que permita cortar las fibras y preparar para ser lanzadas en la pistola, conocido como “roving”. La mezcla de resina y fibras puede llevarse a cabo de dos maneras:

- Con dos boquillas, una que proyecta la resina con iniciador, y la otra proyecta un catalizador que acelere el proceso.
- Con una boquilla, que proyecte la resina ya catalizada.

Para realizar la producción de piezas, es necesario adaptar las fibras al molde negativo, en las que se verá aplicada la resina mediante la pistola, haciendo que el material se adapte a la forma del molde. Se deja reposar y para concluir el proceso, se desmolda el producto.

Algunas ventajas de este método son que el precio del equipo es relativamente económico, y el uso del “roving” es más barato que el material. Sus desventajas, son principalmente que el acabado de la pieza, depende netamente del operario, las piezas tienen una sola cara lisa (la que se apoyó sobre el molde), las propiedades mecánicas son limitadas puesto que se utilizan fibras cortas o discontinuas. A través de esta técnica se producen piezas de gran tamaño, como bañeras, depósitos, cascos de yates o piscinas.

Saco de Vacío: Esta es una técnica variante del molde manual. También es conocida como molde al vacío, o presión de aire, y tiene su principal característica en tener el control del ambiente en el que se realizará el molde. Es particularmente útil en los materiales compuestos, ya que la extracción de aire dentro de la cámara de moldeo, permite disminuir el aire al interior del material, lo que garantiza una mejor unión entre fases, así como una mayor homogeneidad, y control sobre sus propiedades mecánicas. El proceso de producción es el siguiente:

- Se aplica una capa de gelcoat al molde
- Se coloca el refuerzo sobre un molde rígido, y se aplica la matriz
- Se coloca una membrana estanca en el contramolde. Una bomba extraerá el aire de ésta membrana, llevando al vacío el molde, logrando que la resina y la fibra se adapten perfectamente al molde, favoreciendo la disminución de burbujas.

Las ventajas de éste método, destacan que la resina va a ser distribuida de manera uniforme, se disminuye la cantidad de aire, lo que ayuda en el control de sus propiedades mecánicas, se consigue un acabado casi final por ambos lados de las piezas. Sus desventajas son: que la calidad de la pieza está directamente relacionada con la experiencia del operario, los moldes deben ser estancos y resistentes, la producción es lenta y poco útil en grandes volúmenes.

Presión autoclave: Un autoclave es una máquina que permite calentar, extraer o agregar aire, de manera que consigue vacío o presión controlada. El proceso de producción consiste en colocar dentro la máquina un molde en el cual se coloca material semielaborado, que se recubre con una membrana ligera estanca. Posteriormente, en el autoclave se aplica vacío para eliminar el disolvente, y simultáneamente se eleva la temperatura para facilitar la polimerización. Los elementos de un autoclave son los siguientes: cámara presurizada, dispositivo de calentamiento apoyado de un ventilador para tener uniformidad en la temperatura, sistemas de presurización de gas, bombas para la generación de vacío, sistema de control de los parámetros de curado.

Las ventajas que tiene este método es la obtención de un producto con espesor, apariencia y propiedades controladas y uniformes, se pueden fabricar piezas con geometrías complejas, y obtención de materiales con propiedades mecánicas controladas y buenas. Sus desventajas son el elevado precio del equipo necesario para la producción de los semielaborados, el límite de tamaño en la producción de piezas, el ciclo de producción es muy lento entre la colocación de los semielaborados y el autoclavado. De aquí se obtienen piezas como estructuras de aviones, piezas de helicópteros, rotores, puertas, entre otros.

Enrollamiento de filamento: En este método se utiliza una prensa cilíndrica que sujeta objetos, conocida como mandril. El material de refuerzo en forma de roving, es introducido en un baño de resina, en el cual se lleva a cabo la impregnación, y que posteriormente es enrollado con ayuda del mandril. Durante este proceso se debe de controlar la viscosidad del polímero, el porcentaje de volumen de fibras, el número de capas, el ángulo de enrollado en relación al eje del mandril, y la tensión de enrollado de las fibras. Existen distintas maneras de enrollar al filamento según la aplicación del refuerzo, y por tanto, el movimiento que se le da al mandril:

- Enrollamiento circunferencial. El refuerzo se coloca a 90° respecto al eje del mandril. Proporciona buenas propiedades radiales y malas propiedades axiales.
- Enrollamiento Helicoidal. El refuerzo tiene un ángulo variable respecto al eje del mandril, que se calcula según las propiedades y direcciones que sean solicitadas en la pieza.

- **Enrollamiento Polar.** En este tipo de enrollamiento, el mandril puede rotar en tres direcciones, lo que permite la producción de piezas con geometrías esféricas en las extremidades, sin partes discontinuas en el enrollamiento.

Las ventajas de éste método son que es un proceso continuo que se puede automatizar, las piezas finales, tienen buenas propiedades mecánicas (se puede controlar en un porcentaje muy alto la orientación del refuerzo), y se pueden fabricar piezas muy grandes. Sus desventajas son que el equipo es muy caro, y que la pieza debe ser extraída durante el proceso de curado. De este método se obtienen productos como mástiles de embarcaciones, piezas de aerogeneradores, y recipientes para alta presión.

Moldeo por centrifugación: En un molde en revolución, se introducen en un proceso continuo el refuerzo y la resina ya catalizada (con baja viscosidad) de manera que se produce la polimerización en una temperatura ambiente o bien acelerada con apoyo de hornos.

Las ventajas de éste método son que se obtienen piezas con un diámetro y un espesor muy bien controlado, así como tiene una facilidad para desmoldar debido a la contracción de la resina. Tiene algunas desventajas, como la imposibilidad de poder orientar las fibras, por lo que las propiedades mecánicas no son tan homogéneas ni son tan buenas como otros métodos, y el equipo es costoso.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN POR MOLDEO CERRADO

Pultrusión: Esta técnica ya se considera prácticamente automática que funciona mediante un proceso continuo utilizado para la producción de grandes volúmenes de piezas. Utiliza matrices principalmente termoestables, sin embargo es posible aplicarla también a matrices termoplásticas. El proceso consiste en hacer pasar a velocidad constante a través de una boquilla, fibras impregnadas en matriz polimérica. El resultado son piezas con secciones transversales uniformes en tamaño, y con la forma del molde colocado en la boquilla. Los refuerzos más comúnmente utilizadas en este proceso son filamentos continuos de fibra de vidrio, carbón, y aramida. Es posible también utilizar estas fibras en forma de tejidos, aumentando la resistencia del material en cualquier dirección, y se puede llegar a utilizar una proporción en volumen de hasta el 50% de refuerzo. Las matrices termoestables más comúnmente utilizadas son las resinas poliéster, o viniléster, sin embargo para mejorar el acabado y las propiedades eléctricas, se emplean resinas epoxi y fenólicas; las matrices termoplásticas más comunes son las de naylon, polipropileno y poliuretano. Es común agregar aditivos o rellenos como carbonato de calcio, o retardantes de flama como trihidrato de alúmina. El proceso que se lleva a cabo es el siguiente:

- Carretes de fibras se colocan en carretes, que se van desarrollando mientras atraviesan un baño en resina.
- Se tira a velocidad constante a través de la boquilla en la que se somete a temperatura a través de resistencias eléctricas, que alcanzan el calentamiento necesario para el curado del material
- Mientras el producto atraviesa el molde, es curado, y posteriormente se corta en secciones según la longitud deseada.
- Se dan acabados finales a las piezas, a través de procesos de pintura.

Las ventajas del proceso de Pultrusión es que tiene una gran relación en cuanto a desempeño y costo, en las cuales comúnmente se producen entre 2 a 10 pies de material por minuto, las materias primas son baratas, presiones y temperaturas no son tan elevadas lo que reduce el costo productivo, y las piezas que se pueden producir se puede decir que no tienen un límite de longitud.

Sus desventajas son que solo permite la producción de piezas de sección transversal constante, la resistencia mecánica de las piezas huecas de paredes delgadas es relativa, pues el mejor ángulo de resistencia en piezas producidas con este método es en dirección axial. Con este proceso se fabrican vigas, perfiles, tubos, entre otros con aplicaciones en distintas industrias como la automotriz, comercial y estructural.

Moldeo por inyección: El moldeo por inyección es una de las más simples utilizada dentro de la industria para fabricar componentes con formas geométricas de difíciles, o con huecos al interior. Para este método, es necesario contar con una máquina de inyección (cuya parte primaria es una extrusora) de manera que primero se funde el polímero, el cual pasa a través de una “aguja” que insertan el polímero dentro de un molde previamente diseñado en negativo. Una vez que el polímero llena el molde, se enfría, para poder abrir este mismo, del cual se extrae nuestra pieza terminada. Depende de la calidad del polímero y del molde, puede que necesite una segunda etapa de fabricación en la que lijan la pieza de las rebabas y dan un terminado final. Este método es simple, sin embargo hay distintas variables a considerar para que funcione todo perfecto, por ejemplo la temperatura y presión de la extrusora, en la que se controlará la viscosidad de la mezcla final, cuya propiedad es determinante para llenar sin burbujas un molde complejo; de igual manera, se tiene calculado la expansión-contracción del material al enfriar, por lo que en la mayoría de casos, se agrega un extra de polímero que compense la contracción. Existen dos maneras de incorporar el refuerzo a la matriz:

- Adición de fibras mediante pultrusión. De esta forma se obtienen pellets de aproximadamente 10mm de longitud, que posteriormente alimentan al equipo de inyección. Este proceso limita el

tamaño de las fibras de entre 0.2 a 6mm debido al rompimiento durante el paso a través de la inyectora.

- Adicionando una preforma del refuerzo al interior del molde, al cual posteriormente se le inyectará al polímero matriz.

Generalmente este proceso se utiliza con polímeros termoplásticos (los más comunes son polipropileno, polietileno, nylon y PET), junto a refuerzos de fibras (el más común es la fibra de vidrio, de carbón, y el kevlar). En este proceso se utiliza una extrusora a la cual se le agrega en la parte final un molde de acero con el molde final, dentro del cual será vaciado el polímero en estado líquido para posteriormente enfriar y llegar a su forma final. El proceso de producción es el siguiente:

- Se secan los pellets en hornos para evitar la humedad.
- Se vacían los pellets en una tolva, en la que se mezclan con aditivos y colorantes previo a su paso por la extrusora
- Se fijan parámetros de temperatura, presión y velocidad del tornillo (pieza clave de la extrusora)
- Los pellets son llevados a través del tornillo el cual mediante la aplicación de presión y temperatura, son fundidos, lo que permite su paso a través de la boquilla.
- Se inyecta el polímero fundido al molde de acero con una presión aproximada de entre 100 y 200MPa (presión de inyección)
- Dentro del molde, el aire es reemplazado por el polímero, el cual toma la forma del molde, el cual se mantiene a una presión de entre 50 y 100MPa (presión de empaque)
- El molde se enfría a una temperatura de entre 50 y 100°C, lo que permite la solidificación del polímero.
- Finalmente, el molde es abierto, la pieza extraída, y se prepara el ciclo siguiente de inyección.

Cada ciclo tiene una duración de entre 20 y 60 segundos, de los cuales al menos la mitad corresponde al enfriamiento de la pieza. Este tiempo está relacionado directamente al tamaño y geometría de cada molde. La calidad de las piezas depende de la presión de inyección, presión de empaque, temperatura de llenado, temperatura de moldeo y tiempo de llenado.

La ventaja de este proceso es la gran cantidad de volúmenes que se pueden producir, de manera automatizada y en ciclos cortos, abaratando costos productivos. Las piezas obtenidas pueden tener geometrías complicadas, y en tamaños muy variados que van desde 5 gramos hasta 85 kilogramos. Durante este proceso se pueden utilizar algunos polímeros de reciclaje, puede aportar acabados finales, y se tiene un control dimensional bastante bueno.

Su principal desventaja es el costo principal de inversión en el equipo, puesta en marcha y mantenimiento; el alto costo de los moldes de acero, y que solo es rentable cuando se realizan volúmenes de producción muy elevados.

De este proceso se fabrican piezas automotrices, partes de computadoras, artículos deportivos, electrodomésticos, botellas y desechables, entre otros.

Inyección de resina: En este proceso, se acomodan las fibras en forma de tejido dentro del molde, el cual es cerrado posteriormente. Se inyecta la resina a baja presión en la cavidad, fluyendo entre las fibras hasta llenar los espacios en el molde. Una vez curada la resina se procede a desmoldar y a retirar la pieza consolidada.

Inyección de relación forzada (RRIM): Las fibras de refuerzo se colocan en el molde cerrado previo a la inyección o bien pueden ser recortadas y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla previo a la inyección. El proceso consta de una resina de curado rápido que se compone de dos partes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección.

Prensado en frío: También conocido como método por compresión, funciona a través de moldes macho-hembra que permiten la compresión de manera simple dejando al interior de los moldes el material compuesto que tomará la forma de los mismos. Éste método se utiliza muy comúnmente en materiales con matrices termoplásticas, y termoestables. Consiste en intercalar láminas de matriz y refuerzo en forma de impregnados que son cortados según la forma deseada, que se colocan dentro de la mitad inferior del molde (hembra), que es precalentado (120 a 170°C) para posteriormente cerrar con el molde macho rápidamente, aplicar la presión y esperar al curado del material. Para materiales termoestables, la consolidación puede o no requerir de calentamiento según el tipo de resina utilizada. El máximo porcentaje en volumen de refuerzo que se puede utilizar es del 30%. El proceso de producción está en variable de la temperatura, presión y tiempo, y el proceso es el siguiente:

- Precalentamiento. Se colocan alternadamente láminas de refuerzo orientada según las necesidades y polímero termoplástico dentro del molde tratado previamente con un agente desmoldante
- Se cierra el molde macho, y se procede a la aplicación de presión baja o nula hasta alcanzar la temperatura de fusión de la matriz.
- Al alcanzar equilibrio térmico, se comienza con la aplicación de mayor presión para el moldeo, haciendo que la matriz fluya a través de los espacios (intersticios) del refuerzo.
- Se consolida el material a través de un proceso de enfriamiento provisto por un sistema de refrigeración dispuesto en la prensa.

- Finalmente se retira la pieza del molde.

Es de vital importancia garantizar un contacto íntimo entre la matriz y el refuerzo, evitando que haya aire atrapado al interior. Esto se logra con un molde adecuado, sometido al calor suficiente para que se realice la adhesión en la zona de interface, generalmente se logra la consolidación en un tiempo de entre 5 y 30 minutos.

Los moldes para este método son de acero inoxidable o aluminio, y generalmente son diseños simples que facilitan la aplicación de calor y presión. Algunos materiales utilizados con este proceso son matriz de polipropileno reforzado con fibras naturales, o materiales compuestos tipo sándwich. Algunos materiales usados con esta técnica pueden ser reutilizados, y pueden ser trabajados a pequeña escala lo que resulta útil en investigación.

Sus desventajas son que únicamente pueden elaborarse piezas de geometría simple como placas planas con espesor homogéneo, y que en la mayoría de casos, una segunda etapa de producción es requerida en la que se lijen y den acabados finales a través de otros procesos como el desbaste.

Compresión en caliente: A este método también se le conoce como compresión por vía húmeda, y consiste en un molde que es sometido a presión y que es calentado a través de un fluido térmico o resistencias eléctricas, durante un lapso que depende de la polimerización de la resina y espesor de la pieza. Los moldes utilizados aquí, pueden ser producidos de dos maneras:

- A través de preformas de material reforzado (comúnmente fibras unidireccionales)
- A través de un arreglo de la matriz y refuerzo dentro del molde, mismos que son sometidos a presión y calor para consolidar la pieza.

En general, se utilizan preimpregnados de termoplásticos como sulfuro de polifenileno, reforzado con fibras unidireccionales como fibras de carbón, con un porcentaje volumétrico de refuerzo superior a un 60%.

Las ventajas de éste método son una velocidad de producción superior al prensado en frío, y se pueden conseguir muy buenas propiedades mecánicas debido al porcentaje de refuerzo que puede utilizarse. Algunas desventajas son que la inversión es mayor en comparación al prensado en frío, y que las piezas obtenidas son de geometrías simples como placas para circuitos integrados o envases.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.

PARTÍCULAS GRANDES

Este tipo de materiales, las partículas pueden tener gran variedad de geometrías, sin embargo lo ideal es que sean equiaxiales, es decir, tengan la misma dirección en todas las direcciones. En general, el comportamiento mecánico que presentan estos materiales es más eficiente en cuanto más pequeñas sean las partículas y mejor distribuidas se encuentren, además de que existe una relación proporcional entre el contenido de partículas y las propiedades mecánicas. Existen relaciones matemáticas conocidas como la regla de las mezclas cuyas ecuaciones se describe la relación entre el volumen de las fases constituyentes de un material compuesto por partículas con el módulo de elasticidad del mismo, y en ellas se determina que estarán determinados por un máximo: $E_c = E_m V_m + E_p V_p$ y un mínimo: $E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$.

En estas ecuaciones se representa con E y V el módulo elástico y la fracción de volumen; mientras que los subíndices c , m , y p , representan material compuesto, matriz y fase dispersa o particulada.²⁵

FORTALECIDAS POR DISPERSIÓN

La resistencia mecánica de los compuestos reforzados por dispersión, se da nuevamente por la interacción entre las partículas y las dislocaciones que circulan por la matriz. El aumento de resistencia por dispersión no es tan pronunciado como el endurecimiento por precipitación, sin embargo es un aumento de resistencia que se mantiene en temperaturas elevadas durante prolongados periodos de tiempo; esto debido a que las partículas se han seleccionado por la carencia de reacción con la matriz.

REFORZADOS POR FIBRAS

Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados por fibras no dependen únicamente de las propiedades mecánicas de las fibras, sino que se agregan algunas propiedades que tienen que ver con su tamaño, relación de diámetro-longitud, orientación y distribución:

Longitud de la Fibra

Las cargas se transmiten a las fibras a través de la matriz, y es muy importante la fuerza de adhesión entre las dos fases. Sin embargo, al aplicarse una fuerza de tensión, no se transmiten homogéneamente los esfuerzos a la fibra, siendo los extremos los menos castigados con la carga, es decir, que en los extremos

²⁵ Pérez Alonso.

no hay una transmisión de carga desde la matriz. Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y rigidez del material, siendo una relación entre el diámetro de la fibra, la resistencia a la tensión de la fibra, y la resistencia entre la unión matriz-fibra. La longitud crítica de la fibra entonces se puede resumir en la siguiente ecuación²⁶:

$$L_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

Según la relación de esta medida, se conocen como fibras cortas o discontinuas cuando la longitud de la fibra es menor a 15 veces la longitud crítica, y fibras largas o continuas cuando esta medida la longitud es mayor a 15 veces la longitud crítica. Entre más largas son las fibras, reciben un mayor esfuerzo, consiguiendo un material más eficiente porque las cargas las absorbe de mejor manera la fibra, de la siguiente manera:

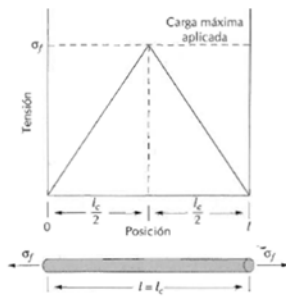
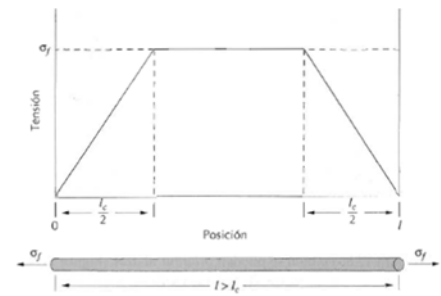
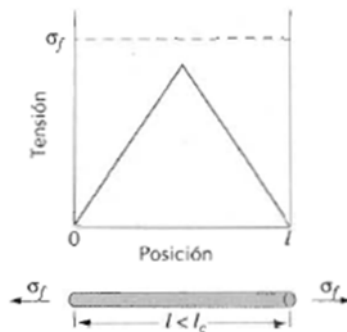


Diagrama de ubicación del esfuerzo máximo en una fibra. Imagen recuperada de callister.



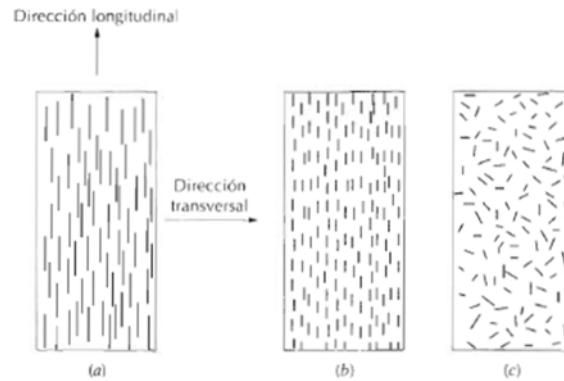
relación entre resistencia y longitud de las fibras. Fibras Largas tienen un mejor desempeño debido a que toman un mayor esfuerzo. Imagen recuperada de callister



Relación entre resistencia y longitud de las fibras. Fibras cortas están subutilizadas. Imagen recuperada de callister

De igual forma, un impacto a la resistencia del material es la forma en la que se encuentran las fibras, ya sea alineada o desalineada. Esto adicionalmente tendrá un impacto en la manera en que se desempeña el material antes los esfuerzos, es decir, que tenga un comportamiento distinto en sentido longitudinal o transversal, como se observa en el siguiente esquema:

²⁶ Callister, XCIV.



Posibles orientaciones de fibras dentro de un material compuesto. A) fibras largas, acomodo longitudinal. Comportamiento anisotrópico b) fibras cortas con arreglo longitudinal. Comportamiento anisotrópico c) fibras cortas con arreglo aleatorio. Comportamiento isotrópico. Imagen recuperada de callister²⁷

Orientación de la fibra

La orientación, concentración y distribución de las fibras va a influir radicalmente en las propiedades del material.

En cuanto a la orientación existen dos posibilidades:

- Orientadas alineadas a cualquiera de los ejes (Generalmente son las fibras continuas) Estos materiales compuestos tienen un comportamiento altamente anisotrópico, es decir, dependiendo de la dirección en que se mida, es la respuesta que se obtendrá. De suponer que la unión matriz y fibras son muy fuertes, la resistencia de este tipo de refuerzo está dado por la suma de resistencias de la matriz y la resistencia de la fibra: $F_c = F_m + F_f$, y si consideramos que los módulos de elasticidad son iguales en matriz y fibras, se obtiene el módulo de elasticidad final del compuesto con la siguiente ecuación: $E_c = E_m V_m + E_f V_f$ en donde E representa el módulo de elasticidad y V el volumen de matriz y fibras
- Desalineadas completa o parcialmente (fibras cortas generalmente)

La resistencia de los materiales reforzados por fibras discontinuas es menor a los reforzados con fibras continuas, sin embargo cuando la longitud de las fibras es mayor a la longitud crítica, se cumple con la siguiente relación: $(TS)_c = (TS)_f V_f \left(1 - \frac{L_c}{2L}\right) + (TS)_m (1 - V_f)$ donde $(TS)_f$ y $(TS)_m$, representa la resistencia a la fractura de la fibra y la tensión en la matriz cuando el material compuesto se rompe respectivamente.

²⁷ Callister, XCIV.

Si la longitud de la fibra es menor que la longitud crítica el valor de la resistencia longitudinal es:
 $(TS)_c = \frac{L t_c}{d} V_f + (TS)_m (1 - V_f)$ en donde d es el diámetro de la fibra.

Cuando las fibras son discontinuas y orientadas al azar, se sigue conoce la resistencia mediante la siguiente ecuación: $E_c = K E_f V_f + E_m V_m$ en donde K es el parámetro de eficiencia de la fibra, que depende del módulo de elasticidad de la matriz y la fibra.

En general, para todos los tipos de refuerzo por fibras, el módulo elástico del material aumenta proporcionalmente al amentarse el volumen de fibras utilizadas. Concluyendo, pongo una tabla en la que se resume la eficiencia del refuerzo por fibras según el tipo de fibra

Eficiencia del reforzamiento de compuestos reforzados por fibra orientada en varias direcciones y esfuerzos aplicados en varias direcciones		
Orientación de la fibra	Dirección del Esfuerzo	Eficiencia del reforzamiento
Todas las Fibras paralelas	Paralela a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en un plano específico	Cualquier Dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en el espacio de tres dimensiones	Cualquier dirección	1/5

Tabla de eficiencia del refuerzo según la orientación de la fibra. Imagen recuperada de callister²⁸

COMPOSITOS ESTRUCTURALES

Estructuralmente, el núcleo tiene dos funciones, separar las caras y resistir la deformación perpendicular a los planos de las caras; en segundo lugar, aporta cierto grado de resistencia a la cizalladura a lo largo de los planos perpendiculares de las caras. Están compuestos de materiales homogéneos y compuestos, su característica principal, es que sus propiedades no dependen de los materiales que lo conforman, sino también del diseño estructural que se les da. De aquí podemos clasificarlos en dos, según el diseño que tiene su estructura:

COMPOSITOS LAMINARES

Los paneles laminares tienen propiedades isotrópicas en las dos direcciones del plano, esto se consigue mediante varias capas de materiales anisotrópicos que se unen entre sí mediante un adhesivo; se acomodan de forma que la dirección de las capas varíe entre cada una de ellas. Los laminados también pueden ser contruidos utilizando telas como el algodón, el papel o fibras de vidrio tejidas embebidas en una matriz polimérica. Un ejemplo de compuesto laminar es en la madera contrachapada, en donde las láminas son alineadas con la dirección de las fibras en ángulos rectos entre ellas.

²⁸ Callister, XCIV.

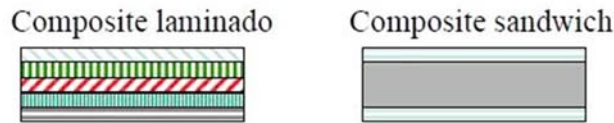


Imagen comparación entre compuesto laminado y compuesto sándwich. Imagen recuperada de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>

PANELES SÁNDWICH

Están diseñados para constituirse en vigas o paneles de bajo peso y alta rigidez y resistencia. Consiste en dos láminas externas o caras que están separadas por un núcleo mucho más grueso. Las caras externas son de materiales rígidos y fuertes, generalmente aleaciones de aluminio o plásticos reforzados con fibras, titanio, madera contrachapada, entre otros. Su función es la de proveer de resistencia, rigidez al compuesto. Deben ser de un grosor suficiente para soportar los esfuerzos de tensión o compresión según sea el caso. El núcleo generalmente es un material ligero, de un bajo módulo de elasticidad, generalmente se pueden resumir en tres categorías: espumas poliméricas rígidas (fenoles, epoxis, poliuretanos), madera (madera balsa) y panales. La función del núcleo es la de mantener ambas caras unidas a un soporte (núcleo). Este núcleo debe de resistir cargas cortantes transversales, y debe ser lo suficientemente grueso para proveer mayor rigidez y evitar que el panel se doble. Los esfuerzos a compresión y tensión, serán soportados por las caras. Un panal o honeycomb, consiste en láminas delgadas, diseñadas mediante estructuras hexagonales con ejes orientados perpendicularmente a las caras externas. La resistencia y rigidez de este diseño está relacionado con el tamaño de las celdas, el espesor de la lámina y el material del que está hecho (generalmente aleaciones de aluminio, o polímeros como aramida). Estos materiales tienen aplicación en la industria de la construcción en pisos, techos y muros; en la industria aeronáutica y aeroespacial (alas fuselaje, etc.) ²⁹

²⁹ Askeland and Phulé.

ENSAYOS Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

La manera en la que se evalúan las propiedades mecánicas de los materiales es a través de ensayos destructivos, en los cuales se llevan al límite los materiales. Este proceso consiste en tomar una cierta cantidad de muestras, y realizarle un número de pruebas al mismo, con la intención de conocer el comportamiento del material ante dichas pruebas. Para que estos ensayos tengan validez, deben de realizarse bajo circunstancias simuladas, con equipo adecuado y bajo un proceso determinado. Generalmente en la sección de control del proceso, encontramos las normas que van a regular la calidad de las pruebas para determinar la fiabilidad. A nivel mundial, la normativa es extensa (ASTM, ASME, ISO, UNE, ICONTEC, INEN, etc.), sin embargo unas de las más utilizados son las que emite la ASTM (sociedad americana para ensayos y materiales, por sus siglas en inglés), y en las cuales se encuentran las normas que rigen las pruebas mecánicas en materiales compuestos. Estas normas hablan principalmente de tres esfuerzos mecánicos, aunque es importante recalcar que solo habla de estos tres pensando en materiales reforzados por fibras, cuyo refuerzo es especialmente útil en estos tres esfuerzos. Igualmente, vale la pena resaltar que no son los únicos tres ensayos existentes, sin embargo si los más utilizados para materiales reforzados por fibras:

EL ENSAYO DE DUREZA

Mide la resistencia de un material a la penetración, da una medida de resistencia al desgaste y la abrasión. Generalmente la dureza se relaciona con otras propiedades mecánicas, particularmente con la resistencia a la tensión. Existen diversas pruebas de dureza, sin embargo las de uso más común, son el ensayo Rockwell y Brinell. El de Brinell consiste en una esfera de acero duro (aprox. 10mm de diámetro) se oprime sobre la superficie del material, se mide el diámetro de la impresión y después se calcula el número de dureza o índice de dureza Brinell.

EL ENSAYO A LA FATIGA

Permite comprender el comportamiento de un material cuando se le aplica un esfuerzo cíclico. Propiedades importantes que se obtienen de éste ensayo son el esfuerzo límite para fatiga (El esfuerzo máximo que se puede aplicar a un material sin que sufra ninguna ruptura nunca), resistencia a la fatiga (Esfuerzo máximo para que la falla ocurra en un número dado de ciclos), y la vida en fatiga (número de ciclos que resistirá un material a un esfuerzo dado).

EL ENSAYO DE TERMOFLUENCIA

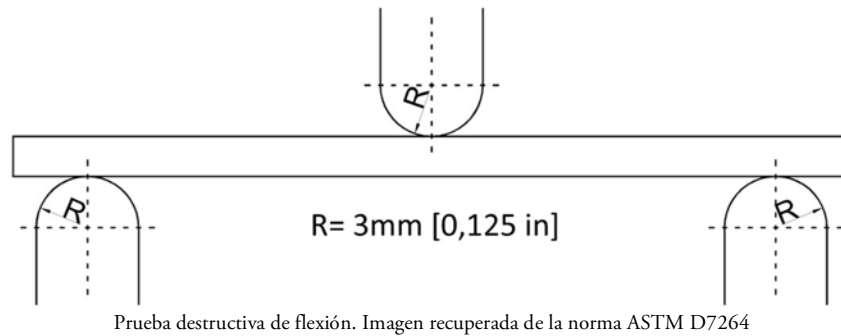
Proporciona información sobre la capacidad de un material para soportar cargas a altas temperaturas tomando en cuenta la relación que tiene su resistencia en cuanto al cambio de temperatura. La rapidez de termofluencia (velocidad con la que cambia de una deformación elástica a plástica en relación al tiempo) y el tiempo de ruptura son propiedades obtenidas a partir de este ensayo.

ENSAYO DE TENSIÓN

Este ensayo es de los más comunes dentro de las pruebas destructivas de laboratorio. Consiste en estirar al material hasta su falla, mediante una aplicación de fuerza uniaxial a lo largo del eje principal y que aumenta de manera gradual. Existen normas que regulan las pruebas de tensión, según el material del que se trate, siendo para materiales compuestos reforzados por fibras, D3039/D3039M-08. Es importante resaltar que en estas normas, se debe de tomar en cuenta algún elemento mecánico que garantice la sujeción de la probeta, disminuyendo al mínimo el deslizamiento de la probeta. Generalmente se utilizan mordazas cuneiformes, así como un extensómetro que ayudará a tener resultados con un margen de error mucho menor. Las dimensiones de las probetas deben de ser según la especificación para las normas, así como evitar cualquier desperfecto que afecte el resultado, como fisuras, imperfecciones, y cualquier otro defecto visible.

ENSAYO DE FLEXIÓN

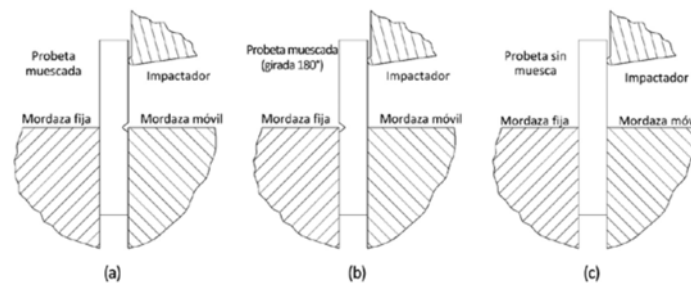
Para materiales compuestos, es un ensayo que está regido por la norma ASTM D7264/D7264M-07. En este ensayo se determina la rigidez a flexión, y propiedades de resistencia de un compuesto de matriz polimérica. El procedimiento aplicado consiste en una carga aplicada al centro, con apoyos simples en dos puntos a la orilla. Se debe de intentar en medida de lo posible que la probeta sea completamente simétrica para evitar variación en los datos. También se debe cuidar el espesor de la probeta, ambientes condicionantes del ensayo, la velocidad de aplicación del esfuerzo, en los que para todas las probetas, deben ser iguales para tener datos consistentes equivalentes a todos los datos obtenidos. Se requieren un mínimo de 5 probetas por cada condición de ensayo; igualmente las normas en cuanto a las dimensiones de las probetas se encuentran dentro de la misma norma, así como las ecuaciones que permiten calcular los valores para las propiedades a flexión analizadas. Al igual que en los demás ensayos, se deben de cuidar los acabados superficiales, así como cualquier desperfecto que pueda afectar el resultado.



ENSAYO DE IMPACTO

Para este tipo de ensayo, existen dos tipos de prueba:

- **Caída de Dardo:** Este ensayo está regido por la norma ASTM D5628. Para comenzar esta prueba, se debe garantizar que no hay ningún tipo de falla previa. Mediante este análisis, se determina la energía de falla del material, en la cual se presentan fisuras al caer un dardo sobre la probeta de prueba. Es importante resaltar, que el dardo no puede rebotar en la probeta. Se considera falla, cuando ésta es detectable a simple vista, bajo condiciones normales de luz. Se considera que la energía de impacto es aquella necesaria para producir fallas en al menos el 50% de las probetas; se utiliza este mismo criterio para determinar la altura de caída, así como el peso del dardo.
- **Impacto IZOD por péndulo:** Este ensayo se especializa en determinar la resistencia de impacto de materiales plásticos, para lo cual se utiliza una máquina con un martillo en forma de péndulo, con la intención de romper la probeta al momento del impacto, tomando registro de la energía necesaria durante el impacto. Hay experimentos que utilizan la misma técnica pero con alguna variación, como por ejemplo, probetas que tienen una “cortada o muesca” justo al centro, para generar una concentración de los esfuerzos, aumentando la probabilidad de una fractura frágil en lugar de una dúctil. De igual forma se puede variar la dirección del impacto, ya sea del lado con la muesca o el opuesto. Estas variaciones, igualmente están reguladas por la norma ASTM D256-10.



Variación del impactador sobre las probetas. Imagen recuperada de la norma astm d256

- Igual que en las pruebas anteriores, las probetas deben estar libres de defectos, así como tener las dimensiones especificadas en las normas. Para las probetas con muesca, se utiliza un micrómetro

que es un instrumento para verificar la manufactura de la probeta, de manera que se puedan garantizar los resultados.

ENSAYO DE COMPRESIÓN

Para este tipo de ensayo, al igual que los anteriores, no existe una única norma que regulariza todos los materiales compuestos que existen. En las normas ASTM se encuentran una serie de normas para cada tipo de matriz, y otras que además toman en cuenta la orientación o tejido de las fibras. Dentro de éstas, la norma que más importa para los fines de mi proyecto es la norma “ASTM D 695 – 02a” que lleva por título “Método de prueba estándar para propiedades compresivas de plásticos rígidos”. Este método de prueba cubre el análisis de las propiedades mecánicas de los plásticos rígidos reforzados y no reforzados, que se someten a esfuerzos de compresión a velocidades uniformes relativamente bajas de esfuerzo o carga. Se emplean probetas de forma estándar con relación 1x1x2 dispuestas al centro de la máquina de compresión quien efectuará la carga a una velocidad de 1.3 mm/min. En esta prueba se puede calcular el esfuerzo máximo

Para que se considere válida la prueba deben de ser reportados los siguientes aspectos:

- Identificación del material probado, incluida el origen, el tipo, manufactura hecha, forma, dimensiones, e historia previa.
- Método de preparación del espécimen
- Tipo de prueba a realizar a la muestra y sus dimensiones
- El proceso seguido durante la prueba
- Condiciones atmosféricas de la sala de pruebas
- El número de muestras probadas
- Velocidad de la máquina durante la prueba
- Resistencia máxima a la compresión, promedio de las muestras, y desviación estándar
- Límite de la zona elástica, promedio, y desviación estándar
- Módulo de elasticidad a la compresión, valor promedio, y desviación estándar
- Fecha de la muestra y fecha del método utilizado para las pruebas.

RESUMEN CAPÍTULO

Como vemos, los materiales compuestos, tienen distintas ventajas sobre los materiales comunes, ya que son versátiles, se les puede controlar sus propiedades, lo que puede resultar en materiales ligeros y resistentes, o flexibles y pesados, de alta rigidez y resistencia, o de gran capacidad estructural en condiciones extremas, entre otras muchas. Todas estas ventajas, pueden encontrar un lugar en casi cualquier industria, ya que siempre es de utilidad materiales innovadores de mejores prestaciones mecánicas, ya que con esto pueden alcanzarse metas que antes parecían imposibles, como elevar la velocidad de un auto, o mandar al espacio máquinas que trabajen, o aplicado a la arquitectura, estructuras más ligeras, más rápidas de construir, y el doble de resistentes, lo que puede abrir las puertas a una nueva generación de construcciones, más altas, más fuertes y con más espacio útil.

A través de éste capítulo podemos apreciar todos los beneficios que nos puede brindar una correcta selección de compuestos para crear materiales nuevos, a los cuales podemos encontrarles nuevas aplicaciones particularmente para nuestra área al utilizarlos en la arquitectura. En este contexto, los materiales compuestos nos permiten una serie de propiedades, que no tenemos de ningún otro material, como ligereza y muy buena resistencia mecánica, o bien flexibilidad acompañada de resistencia mecánica, resistencia a la abrasión, entre otras muchas.

Es de mi interés saber cómo se compone su estructura, como se producen y comportan los materiales compuestos, de manera que podamos aplicar en mi proyecto de investigación el uso de uno de éstos.

Mi proyecto de investigación, consiste en construir un block prefabricado construido a partir de bambú molido y aglomerado con una matriz de resina epoxi, que va a tener por objetivo tener aplicaciones estructurales a pequeña escala, alcanzando una resistencia mínima de 80kg/cm^2 ; misma resistencia que alcanza un block hueco de cemento, con lo que se plantea que mi prototipo pueda competir con estos.

Como ya vimos, un material compuesto, es aquel que se compone de dos fases, encontrando cada una en un material distinto, de manera que obtenemos características que no se encuentran en ninguno de los materiales si los analizamos de manera individual, y tiene propiedades mecánicas que son el resultado de las tres variables principales de cualquier material: su composición, su estructura y su proceso de fabricación.

Para poder cumplir con el objetivo, es necesario recapitular la información mencionada en éste documento, resultando en el análisis de las características de nuestro material.

La fase conocida como **matriz** o fase continua en el contexto de esta investigación, será la resina epoxi, pues es ésta la que encontraremos de manera continua a lo largo de todo el material, embebiendo a la fase de refuerzo, protegiéndola de la intemperie, del desgaste, de la humedad, va a mantener a todo el compuesto consolidado o unido una vez que se solidifique la mezcla, pero sobre todo, transmitirá todos los esfuerzos a la fase de refuerzo. Debido a las características y objetivos del material que se proponen, la función principal de la matriz, es la de aglomerar todo el compuesto, ya que la idea es tener el mayor porcentaje posible de fase discontinua, razón por la que se plantea utilizar entre 5 y 20% de resina, porcentaje suficiente para mantener al material unido, y que durante el proceso de fabricación nos permitirá utilizar al material en elementos prefabricados.

La fase conocida como de **refuerzo** o discontinua será el material de bambú molido, que se compone por un alto porcentaje de fibras y lignina. Ambos materiales tienen propiedades mecánicas bastante buenas, siendo las fibras muy resistentes a la tensión y simultáneamente muy flexibles, y la lignina un material muy rígido de extraordinaria resistencia a la compresión. Al momento en que sea molido y tamizado en partículas de 250um, perderán su clasificación en fibras, convirtiéndose en material de refuerzo dentro de la clasificación de refuerzo por partículas grandes, y que por tanto, sus propiedades mecánicas serán mejoras directamente proporcionales al aumento volumétrico de las mismas. Al ser un refuerzo por partículas, las propiedades mecánicas del mismo serán anisotrópicas, ya que no es posible ordenar a las partículas resultando un material resistente a la compresión en todas direcciones.

La relación que existe entre las fases de matriz y refuerzo, está determinada por la zona conocida como **interface**, está determinado principalmente por dos tipos de interfaz: Mecánica y química. Se menciona una interfaz mecánica, puesto que al ser partículas, la unión entre éstas y la matriz, va a ser definida por la rugosidad que tengan las partículas, mientras que la organización de éstas va a rigidizar más o menos al material evitando deslizamientos de la matriz, aumentando la resistencia mecánica. La unión química se determina porque la resina tiene componentes que van a reaccionar con grupos hidroxílicos (OH) generando uniones covalentes entre el grupo hidroxílico y el compuesto de la resina. Estos grupos OH los encontramos a lo largo de todo el bambú, el cual quedará unido a la resina mediante una unión a nivel químico, lo que garantiza una unión aún mejor, lo que resulta en propiedades mecánicas eficientes. Para garantizar que la resina y el bambú queden unidos por este tipo de unión, es necesario deshidratar al bambú para que la reacción no se vea afectada por grupos OH que encontramos en el agua, que se encuentra impregnada previamente en el bambú, en forma de humedad.

El **proceso de fabricación** que se le dará al material será de molde abierto, a través de un proceso de contacto manual en el cual se mezclará el bambú molido con la resina ya con el iniciador y catalizador mezclados, que se dejará curar dentro de un molde prefabricado previamente recubierto en un agente

desmoldante, lo que facilitará el proceso de retiro de la pieza. Se utilizará este método por la versatilidad que este proporciona al utilizar altos porcentajes de refuerzo, así como ser el más simple de producir como para realizar prototipos disponibles para llevar a pruebas destructivas del material. Si bien, no es el método más eficiente para la producción de grandes volúmenes, si es el método que más fácil puede producirse artesanalmente, tomando en cuenta que mucha de la calidad de éste depende de la experiencia del operario. A través de éste método se llevarán a cabo prototipos en los que se analizarán únicamente la variable de proporción volumétrica en cuanto a refuerzo y matriz, dejando abierta la investigación a una mejora y optimización del material mediante su proceso de fabricación, en el cual podría aplicarse algo de presión a través de un moldeo por compresión en caliente, en el cual se puede acelerar el proceso de curado, mientras se aplica presión que disminuya e espacio entre partículas, aumentando su densidad, la cantidad de refuerzo, y por tanto sus propiedades mecánicas.

Finalmente, el resultado de nuestra propuesta de material debe ser comprobado a través de **ensayos y evaluaciones** que determinen las propiedades mecánicas del material, dentro de las cuales, la más importante para nuestro proyecto es la prueba mecánica a compresión debido a que es el esfuerzo al cual trabajará el material dentro de un prototipo de block estructural. Para llevar a cabo esta muestra se seguirá la norma “ASTM D 695 – 02a” que lleva por título “Método de prueba estándar para propiedades compresivas de plásticos rígidos” en el que se hace el análisis de las propiedades mecánicas de los plásticos rígidos reforzados y no reforzados, que se someten a esfuerzos de compresión a velocidades uniformes relativamente bajas de esfuerzo o carga. En esta norma también se establecen las variables a tomar en cuenta para el desarrollo de la prueba. Se incluyen también en la norma, los métodos que se deben de utilizar para realizar el análisis de las muestras, ya sea el cálculo de módulo de elasticidad, resistencia máxima y resistencia máxima en la zona elástica, así como los procesos estadísticos que deben de utilizarse para mostrar los resultados.

BAMBÚ

Solo en el continente asiático se ha logrado generar una industria del bambú que es estable y de gran tamaño como para poder seguir vigente aún con las industrias de acero y concreto. La utilización del bambú leñoso es muy diversa ya que través de su pulpa podemos producir papel, periódico, cartón, fibras textiles, etc. Y con sus varas y ramas se hacen muebles, artesanías, laminados para pisos, artículos de cocina, alimento, utensilios y como material de construcción, ramo en el cual se utiliza como para construir casas, puentes, molinos y hasta generadores eléctricos. Tanto así que como ejemplo podemos escribir que se utilizó bambú para cubrir el techo de una de las terminales aéreas del aeropuerto de Madrid barajas, en donde es un total de 20,000m² de contrachapado.

El bambú es considerado como uno de los vegetales más versátiles, debido a que lo encontramos todas las partes del planeta. Esta planta se puede utilizar con diferentes fines, y así obtener una gran variedad de productos. Como material de construcción tiene antecedentes prehispánicos: Los totonacas en Veracruz, los huastecos en hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, los mayachontales en tabasco³⁰. Todos ellos han construido casas de bambú y las culturas que aún perduran, los siguen haciendo hoy en día; Algunas culturas deciden usar al bambú como material constructivo porque es un material que al utilizarse proporciona frescura en climas cálidos y húmedos, es fácil de producir, de cortar y de fácil uso en la construcción. Hoy en día su utilización se ve muy reducida en relación a su potencial pues en el mejor de los casos lo veremos como la parte estructural de la cubierta de alguna vivienda rústica, mientras que a nivel industrial, su utilización es casi nula. Es por ello que el problema viene cuando se busca un aprovechamiento industrial o semi-industrial del bambú, que es cuando prácticamente desaparece del mapa, dejando el potencial que tiene esta planta en artesanías y/o construcciones artesanales. Un ejemplo de esto, es que a pesar de que el bambú tiene una capacidad de carga similar o superior a la madera, ni siquiera se menciona como material constructivo en el reglamento de construcciones para el distrito federal, mismo que se usa como referencia en cuanto a normas en gran parte de nuestro país.³¹

En México se busca potencializar el desarrollo del bambú, principalmente en los estados del trópico húmedo, con bosques mesófilos de montaña y tropicales, con una precipitación promedio de 1,000mm o superior, como son los estados de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Hidalgo, Michoacán, Jalisco, Sinaloa entre otros. Existen diferentes asociaciones en México que buscan el desarrollo

³⁰ Dávila Moreno and Brugger Jakob.

³¹ Cortés Rodríguez.

productivo en diferentes usos; algunas son: INBAR, AMEB, BAMBUMEX.ORG, AGROMOND S.A., BAMBUVER A.C., etc. Dentro de éstas, destaca BAMBUVER en huatusco, Veracruz, que es una empresa que se dedica a la producción en masa de la planta. Es aquí donde se fundó el centro de desarrollo tecnológico del bambú de Veracruz.³²

México ha sido clasificado como de “moderada diversidad” pues solamente tenemos 8 géneros y 36 especies de bambúes leñosos y tres géneros con cuatro especies de bambusoides herbáceos que habitan principalmente los estados del sureste a una altitud que va desde el nivel del mar hasta casi los 3000 metros. Dos características de la biología de los bambúes que los hacen ser plantas extraordinarias, son su floración y su rápido crecimiento. Se sabe de algunas especies de bambú pueden llegar a crecer hasta 1.25 centímetros cada 24 horas; el bambú es la planta de crecimiento más rápido del planeta, crece entre 75 y 400mm por día dependiendo la especie. Se estima que en 35 años, una planta de bambú puede producir hasta 15km de postes aprovechables. Su ligereza, altos módulos de elasticidad y rotura convierten al bambú en un material ideal para la construcción.

Dependiendo de las condiciones climáticas, edáficas, y de la época de brotamiento, puede demorar entre 4 y 6 meses para desarrollar su altura definitiva. El culmo de ésta especie es un cilindro hueco y adelgazado, dividido en segmentos o internodos separadas por diafragmas (nodos) que en conjunto con una pared maciza dan al tallo una increíble resistencia mecánica. Los internodos pueden alcanzar diámetros entre 10 y 14cm y alturas entre 17 y 23 cm.³³

Las fibras vegetales con celulosa son un recurso renovable disponible mundialmente, son biodegradables, no generan gases tóxicos, ni dejan residuos sólidos en combustión, no producen abrasión en las máquinas de procesamiento, presentan un módulo de elasticidad muy alto, y soportan las temperaturas de procesamiento como las de polipropileno.³⁴

La mayoría de las fibras naturales que son industrializables, son desechos agro-industriales, con alto contenido en lignina y celulosa, por lo que se convierten en un material atractivo por su abundancia, bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, la principal desventaja que presentan estas fibras frente a las sintéticas es su carácter hidrofílico, lo que las hace incompatibles con el polímero al momento de incorporarlas a la matriz polimérica, y que por su misma estructura química, se degrada fácilmente por

³² Alberto Cedeño Valdiviezo and Jaime Irigoyen Castillo, ‘El Bambú En México’, *Arquitectura E Urbanismo*, 1.6 (2011), 223–43.

³³ Universidad De Oviedo, ‘Síntesis de Polímeros. Técnicas de Polimerización’, *Escuela de Ingeniería de Minas, Energía Y Materiales* (Oviedo, España, 2012), p. 160 <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T2.1-MPyC.Tema2.TecnicasPolimerizacion.pdf>> [accessed 16 November 2017].

³⁴ Agustín Hernández Hernández and Magdalena Trujillo Barragán, ‘Metodología Para Determinar Esfuerzos de Diseño Del Bambú’, *Academia XXII*, 7.13 (2016), 39–55.

acción de los microorganismos. Para disminuir el carácter hidrofóbico, es necesario recurrir a procesos químicos, físicos o combinados que permitan mejorar la compatibilidad con la matriz polimérica.

En algunos casos se emplean sustancias reactivas con el polímero, o en otras se retiran componentes que dificultan la compatibilidad. Mediante estos tratamientos físicos, químicos o enzimáticos es posible modificar la pared celular compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, mejorando así la adhesión a la matriz polimérica.

Las mejores opciones de preparamiento existentes son las que combinan procesos físicos y químicos del material lignocelulósico.³⁵

BOTÁNICA

Los bambúes pertenecen a la subfamilia Bambusoideae, tribu bambusae, familia botánica de las gramíneas; y son la subfamilia más diversa dentro de las gramíneas. En general son plantas y robustas. La subfamilia de los bambúes, una de las más numerosas y más diversas. Actualmente hay registradas más de 90 géneros y 1500 especies de bambú a nivel mundial. Su distribución geográfica es muy amplia, ya que se puede encontrar especies desde los 45° de latitud tanto al norte como al sur, y en un rango altitudinal que va desde el nivel del mar hasta los 4000 msnm.³⁶ Dentro de América se han reportado 21 géneros y 345 especies, que se localizan desde el sur de Estados Unidos, México, a lo largo y ancho de Centro y Sudamérica, en las islas del Caribe y hasta el sur de Chile. La mayor parte de los bambúes tardan varios años en florecer a diferencia de otras gramíneas en las que su crecimiento es generalmente anual.

Existen distintas variedades que pueden tener desde sólo 3mm de ancho y poca altura hasta algunas especies que pueden tener hasta 40 metros de altura, y 40 cm de ancho. Dentro de éstos extremos situamos a las especies generalmente conocidas como bambúes, con una gran variedad de formas y tamaños.

Las características que hacen del bambú distinto a las demás gramíneas es que tienen un hábito perenne (sus hojas no se caen con facilidad, ni por temporada), los tallos y culmos son siempre lignificados y fuertes, sus hojas presentan un pseudopédoclo (ramas falsas que sostienen más hojas), su periodo de floración puede tomar muchos años.³⁷

³⁵ Luis Edgar Moreno Montoya, Lina Rocío Osorio Serna, and Efraín Eduardo Trujillo De los Ríos, 'Estudio de Las Propiedades Mecánicas de Haces de Fibra de Guadua Angustifolia', *Ingeniería & Desarrollo*, 1.20 (2006), 125–33.

³⁶ Cedeño Valdiviezo and Irigoyen Castillo.

³⁷ Cedeño Valdiviezo and Irigoyen Castillo.

La guadua es una especie de bambú, que puede alcanzar una altura de hasta 25 metros, con diámetros entre 10 y 20 centímetros. Sus entrenudos tienen paredes hasta de 2 centímetros de espesor. El nombre genérico “guadua” derivó del nombre vernáculo común dado por las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador. El 45 % de las especies del género son de origen amazónico y se distinguen por sus cúmulos gruesos, largos y espinosos, por las bandas de pelos largos en la región del nudo y por las hojas de forma triangular. Las guaduas se clasifican dentro de la familia de las Poáceas, subfamilia Bambusoideae, Subtribu Guadinae, y género Guadua. De éste género guadua existen 26 especies en América, desde el centro de México hasta el norte de Argentina y Uruguay, Perú, Cuba Puerto Rico y Trinidad. Las cinco especies del género Guadua que habitan en México, son las más grandes y frondosas: *Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia*, *Guadua longifolia*, *Guadua paniculata*, *Guadua velutina*. Hay que recalcar que no son las únicas especies en México, que existen otras que también se utilizan, y algunas otras que han sido introducidas como lo es la *Guadua angustifolia* que se caracteriza por una banda blanca bien marcada sobre y en ambos lados de los nudos, es también la especie nativa de América más ampliamente utilizada en Colombia, Ecuador y otros países de centro y Sudamérica, fue introducida en México en 1995 y es procedente de Viveros, Colombia.³⁸

COMPOSICIÓN DE LAS FIBRAS DE BAMBÚ

Las fibras de *Guadua Angustifolia* Kunth tienen una composición química de agua en 8.97%, celulosa 47.06%, lignina 21.88%, hemicelulosas 11.82%, extractivos 6.47% y cenizas 3.80%. Las fibras internas de los culmos de la basa y la sobrebasa son las que se caracterizan por más resistencia física. Para mejorar la adhesión en compuestos, se utiliza una solución alcalínica que reacciona con los componentes de la guadua, destruyendo la estructura y dividiendo las fibras en filamentos, incrementando el área superficial disponible de contacto, mejorando la unión de la fibra con la matriz.

En general las fibras utilizadas como refuerzo deben tener una gran resistencia a la tensión, un alto módulo de elasticidad, y rigideces, por lo que la fibra de *guadua angustifolia* es ideal como material refuerzo, en materiales compuestos, donde la fibra es la encargada de soportar grandes esfuerzos sin deformarse antes de romperse, por lo que es apropiada para refuerzos estructurales.³⁹

³⁸ Cortés Rodríguez.

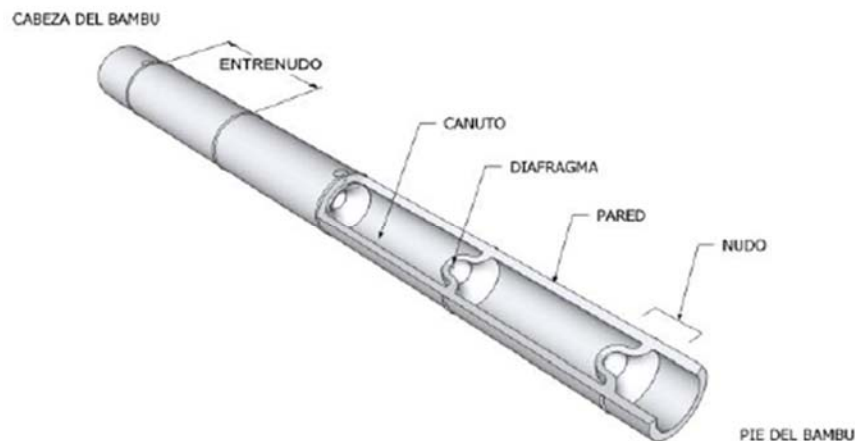
³⁹ Delgado Trujillo and others.

ESTRUCTURA DEL BAMBÚ

El bambú es un material anisótropo (diferentes resultados a pruebas según la dirección en la que se ensaye) formado por fibras longitudinales unidas por células denominadas parénquima, menos resistentes, por ello el esfuerzo cortante resulta menor paralelo a la fibra.⁴⁰

En el tallo se identifican tres partes importantes: Basal, Medio y Apical, cuyos diámetros promedios son: 11.5, 11.05, 5.84cm respectivamente. La sección transversal del tallo presenta tres componentes típicos muy bien diferenciados en cuanto a la anatomía: la epidermis o corteza exterior, la capa interior de la pared del tallo y el área fibro-vascular, ésta última está localizada entre las dos anteriores, siendo ésta misma donde aparecen células parenquimáticas que constituyen el tejido del tallo: los haces vasculares como tejido conductor y las fibras.⁴¹

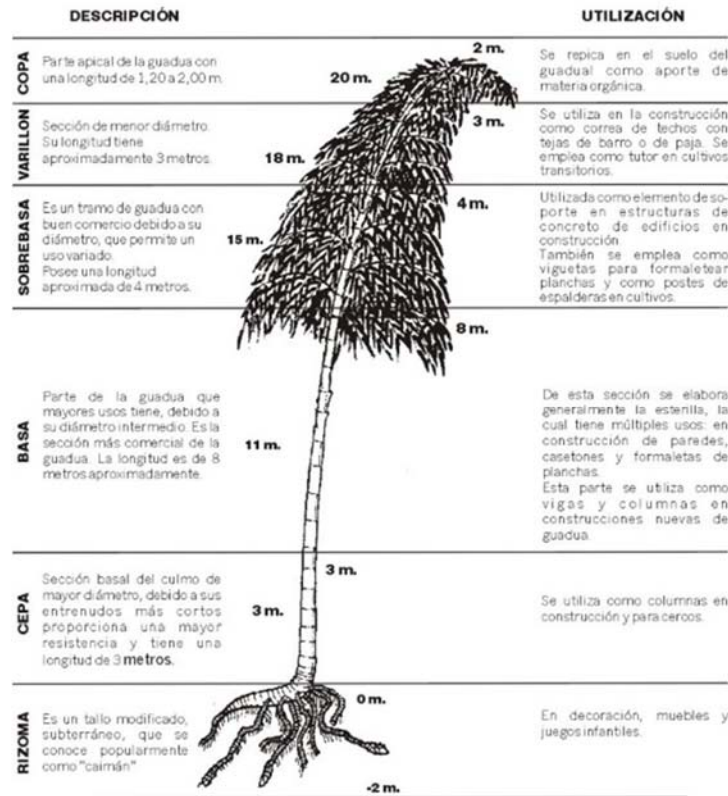
La sección transversal de la pared del tallo de los bambúes está compuesta por un 52% de tejido de parénquima, un 40% de fibras y un 8% de tejido conductor. A través de la pared del tallo en otros bambúes, el porcentaje de fibra decrece de la zona externa a la interna, mientras que el porcentaje de parénquima es mayor en la zona interna que en la externa. El tejido conductor crece de la zona externa a la zona interna.



Partes de una guadua. Imagen recuperada de cigarroa espinosa.

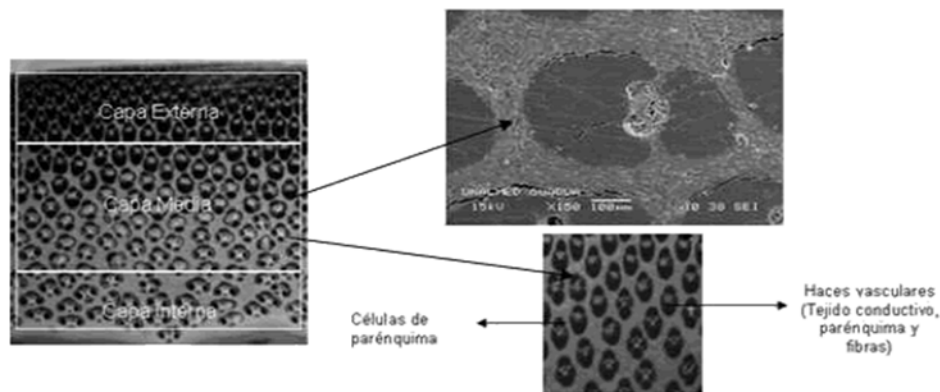
⁴⁰ Ordóñez Candelaria Victor Rubén y Bárcenas Pazos Guadalupe Martha, 'Propiedades Físicas Y Mecánicas de Tres Especies de Guaduas Mexicanas (Guadua Aculeata, Guadua Amplexifolia Y Guadua Velutina)', *Madera Y Bosques*, 20.2 (2014), 111–25.

⁴¹ Martha.



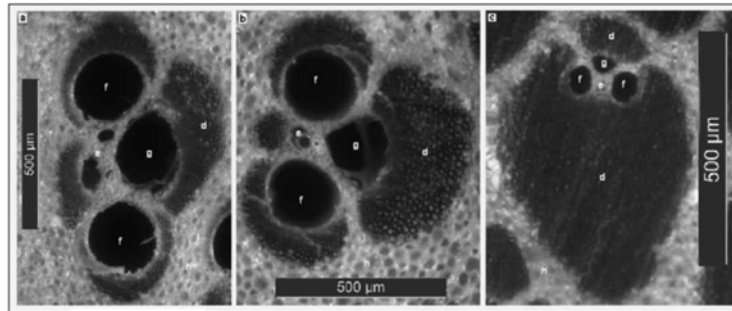
Partes de una guadua. Imagen recuperada de cigarroa espinosa ⁴²

En un corte transversal del culmo de *Guadua angustifolia* se diferencian cuatro zonas cuyas diferencias se deben a la forma y tamaño de los haces vasculares en cada una de ellas: A) periferia que corresponde al 4.5% del espesor de la pared del culmo B) Transición al 10.7% C) media al 73.9% y D) interna, que corresponde al 10.8% del espesor de la pared del culmo.



Morfología interna de una guadua. Imagen recuperada de ⁴³.

⁴² Cigarroa Espinosa.



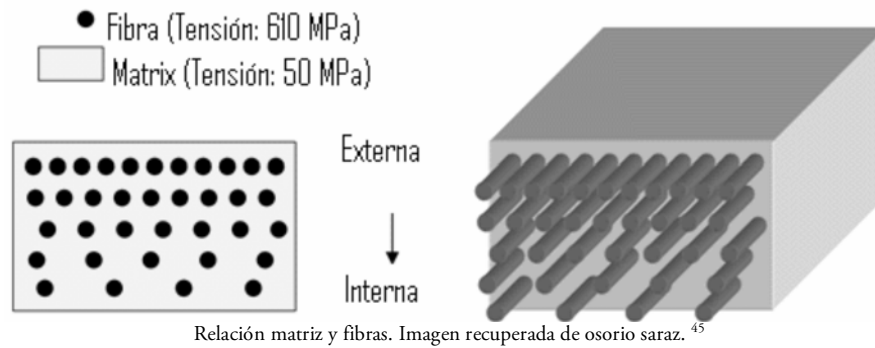
Haces vasculares de la sección interior (a), media (b) y exterior (c) del culmo; los tejidos que lo componen son las fibras (d), protoxilema (e), el metaxilema (f), el floema (g) y el parénquima (h). Protoxilema, metaxilema y floema, son parte del conjunto de haces vasculares. Imagen recuperada de ⁴⁴

La estructura interna de los bambúes se encuentra conformada por una matriz de parénquima (tejido vegetal esponjoso de las células vivas que rellena los intersticios dejados por los vasos y que puede tener funciones diversas según su ubicación, como reservar sustancias, fotosintetizar o rellenar), y haces vasculares, los cuales componen a su vez de tejido conductor (Conjunto de células de un organismo que tienen la misma función y diferenciación morfológica y que constituyen la estructura fundamental de los diferentes órganos) y fibras (celulosa de alto peso molecular, en estructura de cadena lineal proveniente de azúcares que son polimerizados en las plantas, y obtenidos a través del proceso de fotosíntesis; se clasifica como un biopolímero; es un polisacárido con 600 a 1.000 unidades de sacarosa que se mantiene unida mediante enlaces de hidrógeno).

Las células de parénquima recubren el tejido conductor y las células de fibra. Las células de parénquima son más pequeñas en la zona de la pared del culmo y aumentan su tamaño hacia la zona interna. La longitud de éstas varía entre 20 y 80 µm y su espesor entre 25 y 40µm. Se encuentran unidas por conectores especiales que le dan la apariencia de un material sólido. Se han encontrado distintas distribuciones de fibras en el culmo de bambú en las que se pueden diferenciar una serie de fibras cortas y largas. A través de distintas investigaciones se concuerda en describir que a nivel anatómico, las partes de la estructura de los bambúes que mayor influencia presentan en el comportamiento mecánico de los mismos, son el porcentaje de fibras, el porcentaje de los tejidos conductivos y el porcentaje de parénquima.

⁴³ Jairo Alexander Osorio Saraz, Albeiro Espinosa Bedoya, and Eduard A. Garcia Galeano, 'Evaluation of Mechanical Properties of the Internal Structure of the Guadua With Mathematical Modelling', *Dyna*, 76.160 (2009), 169–78 <http://dyna.unalmed.edu.co/ver_resumen.php?id_articulo=a16v76n160>.

⁴⁴ Zaragoza Hernández Idalia; Borja de la Rosa Amparo; Zamudio Sánchez Francisco; Ordoñez Candelaria Victor; Bércenas Pazos Guadalupe, 'Anatomía Del Culmo de Bambú', *Madera Y Bosques*, 20 (2014), 87–96.



Las fibras constituyen el tejido que soporta todo el esfuerzo mecánico al que está sometido el tallo debido al viento, y otros factores externos, además de su peso propio. Las fibras de bambú en general se caracterizan por su forma delgada, ahusada en ambos lados y en algunos casos bifurcada en los extremos. Se encuentran en los internodos rodeando los haces vasculares y constituyen entre el 40 y el 50% del tejido total y entre el 60 y 70% del peso total del culmo.

La estructura interna de la fibra posee paredes interiores alternadas entre capas gruesas y delgadas con diferente orientación, a ésta estructura se le denomina “estructura polilaminar” y aparece especialmente en las fibras ubicadas en la periferia del culmo y el número de capas alternadas o laminadas varía de fibra a fibra.

Sus fibras están dispuestas de manera axial y longitudinalmente por lo que sus propiedades físicas y mecánicas varían según el plano considerado por lo que se conoce como material anisótropo. Presenta cambio de dimensiones debido a la expansión térmica y cambio de volumen a causa de la humedad.

PRODUCCIÓN DE BAMBÚ

El bambú puede reproducirse de manera sexual o asexual, ya sea mediante el uso de semillas, siembra de rizomas, siembra de tallos jóvenes, o por corte de secciones de tallos. Si se planta con objetivos de producción comercial, se necesita un rápido crecimiento, es decir, una producción más vegetativa; por ejemplo, un tallo que crece de estacas puede tener su altura total en dos o tres años, mientras que una que crece por semillas, puede requerir hasta ocho años⁴⁶.

⁴⁵ Osorio Saraz, Espinosa Bedoya, and Garcia Galeano.

⁴⁶ Ramón Mercedes José, *Serie de Recursos Naturales Guía Técnica Cultivo Del Bambú*, Primera Ed (Santo Domingo, República Dominicana: Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, Inc. (CEDAF), 2006) <<https://doi.org/10.1007/s11250-012-0216-z>>.

Existen distintos métodos que se utilizan para garantizar la reproducción del bambú. Generalmente se dividen en métodos sexuales o a través de semillas, y métodos asexuales que a su vez se subdividen en: reproducción por cortes, siembra de tallo, método de chusquines y propagación in vitro.

REPRODUCCIÓN SEXUAL O POR SEMILLAS

Es un método que no tiene ningún problema alguno si la semilla está disponible, sin embargo, debido al largo periodo de floración, no es muy común que se use éste método, además de que en algunas especies, existe un 50% de germinación, y en la mayoría de especies, las semillas salen vanas.

REPRODUCCIÓN VEGETATIVA O ASEXUAL

Debido a la dificultad de reproducción sexual, existen distintas maneras de reproducción asexual, destacando los que involucran el corte y replantación de las distintas partes de la planta. Estos métodos permiten la reproducción de la planta en volúmenes masivos que son eficientes para la comercialización.

Reproducción por cortes: Este es un método que se subdivide en tres variantes, siendo la diferencia entre ellos, la parte del culmo que se corta y por ende, las distintas necesidades de cada parte:

- Cortes de Rizoma

Es la forma más efectiva, con eficacia de casi un 100%. Se cortan secciones de 30cm de rizomas de entre 1 y 2 años de edad. Se replantan y se aprecian brotes a partir de los 30 o 35 días de haberse sembrado.

- Corte y trasplante de plantitas o tallos

Se requieren tallos jóvenes de 2 a 3 años de edad. Se cortan secciones que tengan dos o tres entrenudos, con buenas yemas (cortes naturales en la “corteza”) y ramas. Entre cada dos nudos se hace un hueco, y se llena de agua, para posteriormente cubrirse con tierra. Se planta y agrega arena al hoyo para facilitar el enraizamiento.

- Corte de tallos

Se escogen tallos enteros sin cortarse de entre 1 y 2 años de edad. Se prepara una zanja lo suficientemente grande como para sembrar el tallo completo de manera horizontal. Se agujera en cada entrenudo, para rellenar con agua y se vuelve a tapar. Se entierra con 5-10 cm de tierra y se verán repollos en un tiempo de 2-4 semanas.

Reproducción In Vitro: Este es un método que se utiliza por taxónomos que permite manipular con precisión las condiciones de reproducción, permitiendo que pocas células se conviertan en plantas completas. Éste método permite que la floración de las plantas se de varios meses después de ser cultivado, y permite la producción masiva de plántulas, que posteriormente se desarrollarán en plantas completas.

NECESIDADES DE CRECIMIENTO

Las necesidades de crecimiento en cuanto a lluvias, temperatura, humedad, suelos, y hoyo de siembra son necesarias casi equitativamente para cualquier especie de bambú. A continuación las describo:

- **Lluvia:** Se requiere un mínimo de 1,000mm anuales hasta más de 4,500mm. Se requiere un mínimo de 100mm mensuales durante los primeros 6 meses para garantizar el desarrollo. Los rizomas requieren un mínimo de 200mm y los brotes un promedio de 100mm, generalmente al finalizar el verano.
- **Humedad:** Puede variar según la especie, sin embargo en promedio la mayoría de especies requieren una humedad cercana al 80%.
- **Temperatura:** La mayoría de especies crecen eficientemente en un rango de temperaturas de entre 9 y 36°C; sin embargo existen especies cuyo desarrollo es viable a temperaturas más frías.
- **Suelo:** Casi ninguna especie resiste suelos salinos, por lo que se debe de plantar en suelos aluviones y bien drenados. El pH óptimo para su desarrollo es de entre 5 y 6.5. Generalmente las especies de bambú son de ámbito forestal, por lo que se recomienda que tenga cubierta vegetal que la cubra del sol. Es preferible que el suelo tenga lombrices que airén al suelo. Las hojas que se caigan, deben de colocarse cerca de los culmos, ya que esto favorece el reciclaje de sílica, y otros elementos que favorecen el crecimiento.
- **Luz:** Las plantas de bambú exigen abundante luz, sin embargo no estar expuestos directamente a los rayos solares. Pueden crecer bien en terrenos empinados.
- **Plantación:** Los hoyos para la plantación deben ser de 70cm x 50cm y 30 cm de profundidad. Con una separación preferible de 5 metros.

ETAPAS DE DESARROLLO Y APROVECHAMIENTO

El bambú es aprovechable desde que es apenas un pequeño rizoma, hasta que es un culmo maduro, sin embargo durante cada etapa tiene un fin distinto. A continuación describo sus principales usos durante cada etapa:

- **Renuevo o Brotación:** Está emergiendo y no se ha elongado. Edad menor a 180 días. En esta etapa se utiliza como alimento humano.
- **Juvenil:** Se desarrollan las ramas, brotes verde intenso. Se han desarrollado los entrenudos mientras que los nudos se ven blanquizcos. Período entre 6 y 12 meses. Se utiliza para elementos artesanales como canastos y bolsas y tejidos.
- **Madura, adulta o comercial:** Los tallos son verdes pálidos, ramas desarrolladas, y madera resistente. Edad de entre 1 y 4 años. Se utiliza para tableros de esterillas y cables de bambú y estructuras.
- **Sazonamiento:** La madera empieza a perder resistencia. Follaje poco denso, color verde pálido o amarillento. Edad de 4 a 6 años. **Sobremadura o vieja:** Se ven culmos degradados con quebraduras o rajaduras. Poco follaje, tiene apariencia y sensación de estar seco. Se utiliza como estructuras, y para la creación de papeles y artesanías.



Imagen descriptiva de usos de bambú según la edad. Fuente; *serie de recursos naturales guía técnica de cultivo de bambú*⁴⁷

⁴⁷ José.

ESPECIES DE BAMBÚ EN MÉXICO

En México existen 8 géneros y 36 especies de bambú nativas de bambúes leñosos, de las cuales 30 son endémicas, también se han introducido cerca de 30 especies principalmente desde California y Colombia. La especie que más se utiliza para la construcción es la guadua⁴⁸. Actualmente el estado de Chiapas es el que ha sido señalado como el de mayor importancia relacionada al número de especies de bambú leñoso, aunque es en Oaxaca en donde encontramos el mayor número de especies endémicas. En Veracruz sobresale la zona montañosa de los alrededores de Orizaba y Xalapa, y es justo de aquí, de donde se ha impulsado más el uso de bambú para la construcción, especialmente la especie de la guadua⁴⁹

Los estados con la mayor riqueza de especies de bambú son Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Jalisco y Nayarit. En éstas seis entidades se encuentran más de la mitad de especies del país, además de que en Veracruz, Oaxaca y Chiapas se ubica el 70% de las especies endémicas. Los requerimientos de humedad para el desarrollo óptimo de las especies de bambú son elevados, por lo que generalmente los encontramos en donde la humedad es abundante, como son las orillas de ríos, arroyos o cañadas. Estas son algunas especies de bambú que se dan con facilidad en México:

LA GUADUA ACULEATA

Llega a medir 25 metros de alto, y sus tallos tienen un diámetro de 25 centímetros en la base, y tiene espinas en todas las ramas⁵⁰. Es el más frondoso de los bambúes nativos de México, sus fuertes rizomas producen culmos robustos con entrenudos relativamente cortos a la base. Es y ha sido una de las especies más utilizadas en México, ha sido utilizada tradicionalmente en la construcción de viviendas rurales, principalmente en el norte del estado de Veracruz y Puebla.

LA GUADUA PANICULATA

Se caracteriza por tener espinas en los nudos, láminas de hojas caulinares prontamente caedizas. Los culmos secos de ésta especie han sido utilizados en la construcción tanto en México como en otros países. Sus rizomas paquimorfos (de crecimiento por medio de pencas anuales) con producción de culmos (falso tallo de cualquier tipo de planta) separados es determinante en la identificación de la planta, pues no se aprecia como una planta amacollada (conjunto de vástagos, flores o espigas que nacen de un mismo pie) como otras guadas, su nombre común en Oaxaca es Otate.

⁴⁸ Cedeño Valdiviezo and Irigoyen Castillo.

⁴⁹ Cortés Rodríguez.

⁵⁰ Dávila Moreno and Brugger Jakob.

LA GUADUA AMPLEXIFOLIA

Se caracteriza por su alto porte y tallos gruesos, es espinoso, se forma por grandes grupos de tallos que muy sólidos, sus vainas son de gran tamaño y de color pardo que envuelve al tallo. Estas vainas pueden alcanzar hasta 25 centímetros de largo y 20 de ancho, cubiertas de pelo fino y rígido. Su madera se utiliza para producir vigas, alfardas, techos, cercas, y leña. Se encuentra en el sur de México, en todo Centroamérica, en el oriente de Colombia y Venezuela. En México se registra para los estados de Sinaloa, Tamaulipas, Hidalgo, San Luis Potosí, Hidalgo, Veracruz, Morelos, Oaxaca, Tabasco y Chiapas. Se encuentra en el sur de México, en todo Centro América, en el oriente de Colombia y en Venezuela. Es un Bambú espinoso, con culmos sólidos (no son huecos), erectos y arqueados en su parte apical. Su altura no supera los 12 metros. Tiene una distribución menos común que la guadua *Angustifolia*.

GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

Es el bambú endémico de América y se considera como nativo de Colombia, Venezuela y Ecuador. También ha sido introducida a México y varios países centroamericanos. Es un bambú gigante, espinoso, con culmos erectos y huecos que alcanzan alturas hasta de 25 metros y diámetros entre 10 y 25 cms. Sus entrenudos tienen paredes hasta de 2 cms de espesor.

GÉNERO OTATEA

Es el género de bambú leñoso y nativo de México más abundante en cuanto a sus poblaciones, ocupa grandes superficies en donde a veces es la única planta que se desarrolla. Se subdivide en dos especies: *Otatea acuminata* y *Otatea aztecorum*. La primera es la especie más utilizada por las poblaciones rurales en México, pues con sus tallos se construye el bahareque (tallos mezclados con lodo y zacate) que sirven como paredes de viviendas tradicionales, principalmente en los estados de Veracruz y Jalisco.

LA BAMBUSA OLDHAMMI

Nativa del sur de china, no crece en cualquier parte, limitando su producción exclusivamente bajo cultivo. Puede alcanzar dimensiones de 55 pies (16.7 metros) de altura y 5 pulgadas (12.5 centímetros) de diámetro cuando ya está maduro. Sus culmos son de color verde y tiene la capacidad de soportar bajas temperaturas.

LA BAMBUSA VULGARIS

Tiene culmos amarillos que llaman mucho la atención, y que son útiles para las construcciones temporales. Ésta planta en Cuba fue declarada como muy adecuada para paneles y usos estructurales para la construcción usando el acetato de polivinilo como adhesivo.⁵¹

GÉNERO CHUSQUEA

Es el género de bambúes más diverso en el mundo; es un género americano que incluye unas 200 especies, de las cuales al menos 17 se encuentran disponibles en México, y habitan principalmente las montañas húmedas de Veracruz, Oaxaca, Chiapas, y Jalisco, aunque se ha encontrado una especie que vive en las montañas de Nuevo León.

GÉNERO AULONEMIA

Disponemos de tres especies que habitan principalmente las montañas húmedas de Oaxaca, Veracruz y Chiapas; se trata en general de bambúes con su tallo principal no mayor de 3 centímetros de diámetro, y son plantas poco conocidas por los botánicos.⁵²

Existen otras plantas del género, provenientes de Asia que ya se han involucrado en el sistema de producción dentro del país que también se utilizan en la construcción, y llaman la atención por sus características estructurales. Algunas especies que destacan son: *Bambusa oldhammi*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa vulgaris striata*, *Bambusa aculeata*.

USOS DEL BAMBÚ EN MÉXICO

Actualmente en México, se utilizan variadas especies de bambú para distintos fines, siendo uno de los principales la construcción (generalmente de vivienda de tipo rústico). En general, de todas las especies, la parte del bambú que más se utiliza es la del culmo, particularmente para la región mexicana el culmo de la especie de guadua, por sus características (gruesos, altos y resistentes) que permiten una gran versatilidad en la construcción. La subespecie de guadua *aculeata*, puede alcanzar una longitud mayor a 20 metros, y con este comúnmente se elaboran paredes, puertas, marcos de ventanas, techos, travesaños y cercas, se utiliza principalmente en Veracruz y Puebla. La *guadua paniculata*, también es usada en la

⁵¹ Cedeño Valdiviezo and Irigoyen Castillo.

⁵² María P Lucena, Alejandro Suarez, and Ivonne Zamudio, 'Desarrollo de Un Material Compuesto a Base de Fibras de Bambu Para Aplicaciones Aeronauticas', *Revista Latinoamericana de Metalurgia Y Materiales*, 1.3 (2009), 1107–14.

construcción, sin embargo es usada en construcción de silos para almacenar el maíz en la sierra de Manantlán, en Jalisco. La *Bambusa Vulgaris* se utiliza en la región del soconusco en Chiapas para construir cercas y postes. Con el género *Otatea* se tejen generalmente canastas, fruteros y maceteros, con un método que consiste en cortar las varas de bambú longitudinalmente y aplastarlas. El género *Chusquea* se utiliza para el alimento de ganado bovino, caprino, equino y ovino.⁵³

Existen también distintas maneras de usarlo en la construcción, como parte de elementos estructurales con uniones especiales para el bambú, como son las bocas de pescado, su ahogamiento en concreto, reforzamiento por codales y arcos, estructuras en cúpulas, muros inclinados, paneles para muros. En techos se han probado estirilla con teja, planchado con láminas, planchado y entrepisos de concreto, hasta mallas ligeras recubiertas con concreto. En el caso de muros se han probado sistemas de estirilla tejida, planchados adheridos a un panel, paneles con bambú, mallas plafones, y cañas abiertas. Para los acabados se han probado con cancelerías de bambú en puertas, ventanas, detalles de baño, etc.⁵⁴

MÉTODOS PARA LA PRESERVACIÓN

Se han experimentado distintas maneras de tratar al bambú para aumentar su vida útil, aumentando la resistencia de éste ante efectos externos, principalmente la resistencia a la intemperie, y a los organismos vivos, como insectos y hongos. Existen métodos de preservación tradicionales comprobados empíricamente, y métodos químicos que deben aplicarse adecuadamente o se verá afectada la resistencia del culmo, así como la salud de los usuarios. Se recomienda utilizar un método tradicional y un método químico⁵⁵ seguido de un proceso de secado que finalice con el proceso de tratamiento.

MÉTODOS TRADICIONALES

Estos métodos son los que a través del tiempo han sido implementados por comunidades que utilizan el bambú, éstos métodos se han desarrollado según los recursos disponibles en cada zona, y han sido probados y comprobados por la sabiduría popular. Algunos métodos tradicionales son: Curado, Inmersión en agua, encalado, tiempo de corte de la cosecha y ahumados.

⁵³ Alneira Cuéllar and Ismael Muñoz, 'Fibra de Guadua Como Refuerzo de Matrices Poliméricas', *Dyna*, 77.162 (2010), 137–42 <<https://doi.org/10.15446/dyna>>.

⁵⁴ Jairo Alexander Osorio, Juan Manuel Vélez, and Héctor José Ciro, 'Estructura Interna De La Guadua Y Su Incidencia En Las Propiedades Mecánicas', *Dyna*, 74.153 (2007), 81–94.

⁵⁵ Jorge Morán Ubidia, *Construir Con Bambú*, ed. by Yann Barnet and others, 3a edn (Lima, Perú: INBAR, 2015).

Curado: Se deja la caña apoyada sobre piedras o bambúes vecinos durante 3 semanas, dejando hojas y ramas intactas. De esta manera se disminuyen los almidones, azúcares y humedad, lo cual disminuye la vulnerabilidad al ataque de insectos y microorganismos, la caña cambia de color de verde a naranja, y emana un olor a alcohol producido por los almidones, y es quien ayuda a repeler eficientemente a los agentes biológicos degradadores.

Inmersión en Agua: En éste método se colocan los culmos recién cortados en corrientes de agua como ríos o estanques, en los cuales se quedan sumergidos durante 4 semanas, evitando que floten. Durante este proceso, el agua lava el almidón que está contenido en las paredes, de ésta manera se evita el ataque por insectos. Con este proceso el bambú puede quedar manchado.

Encalado: Este proceso es simple, y consiste en pintar el culmo con cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). De esta manera se logra que la cal absorba la humedad, reduciendo el riesgo de ataque por hongos.

Tiempo de corte de la cosecha: Se procura cortar durante el cuarto menguante de la luna ya que en éste momento es cuando existe la menor influencia de la luna sobre los líquidos de la planta, por lo que la humedad no sube tan fácilmente por los tallos, a esto se acompaña con un corte durante las primeras horas de la madrugada, debido a que al ser el bambú una planta fotosintética y fisiológicamente activa, el contenido de humedad en la misma disminuye sobre la noche, tiempo en el que la humedad de la planta regresa al rizoma y al suelo ⁵⁶

MÉTODOS QUÍMICOS

Los métodos químicos son por mucho, más eficientes que los métodos tradicionales, sin embargo, el costo económico es también mucho mayor. En general consisten en hacer que el líquido preservativo penetre todas las capas del culmo, ya sea que el bambú se encargue de repartirlo, o ayudarlo mediante algunos procesos.

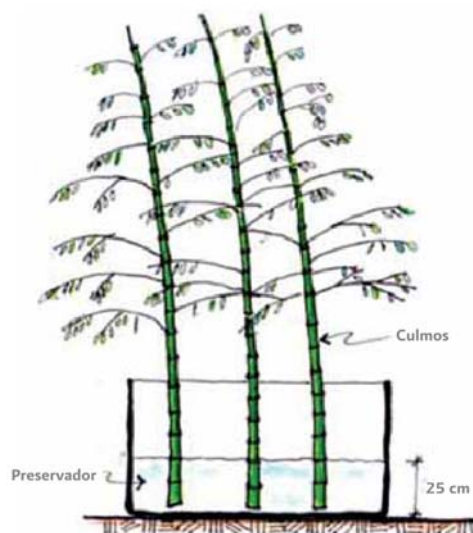
El tratamiento químico más usado por la relación eficiencia-costo-seguridad, es el preservativo producido con base en la mezcla de ácido bórico y bórax. Ésta solución debe prepararse en una solución al 3% es decir, 1kg de ácido bórico, 0.5kg de bórax, y 48.5 litros de agua. Esta cantidad es suficiente para tratar hasta 40 metros lineales de bambú que se utilizará en situaciones de bajo riesgo. Para culmos expuestos a mayor riesgo, se utiliza una solución más concentrada: 100litros de agua, 5kg de ácido bórico, y 3.7kg de

⁵⁶ Victor Rubén Ordóñez Candelaria and others, *Manual Para La Construcción Sustentable de Bambú* (CONAFOR, Comisión Nacional Forestal, 2011) <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>.

bórax decahidratado. En ambas soluciones se necesita calentar el agua a 80°C para facilitar la mezcla entre los compuestos ⁵⁷.

Existen distintas variantes, que funcionan con el mismo principio. Las más conocidas son: Tratamiento por los extremos, tanque abierto, método de Boucherie y Boucherie modificado.

Tratamiento por los extremos: Muy similar al vinagrado, consiste en elevar a los culmos del suelo, sin embargo, ahora se dejarán elevados del suelo, pero dentro de una “alberca” que contiene el preservativo, mismo que será transportado por el bambú mismo. Este proceso requiere que los culmos contengan un elevado porcentaje de humedad. Generalmente se aplica solo en bambúes cortos.



Método de tratamiento por los extremos. Fuente: *manual para la construcción sustentable* ⁵⁸

Tanque abierto: Para éste método, es también indispensable que los culmos contengan un alto contenido de humedad, y de lignificación. Esta es la razón por la que funciona mejor con tallos inmaduros que en maduros. Se recomienda agregar más preservador a los tallos verdes cuya absorción es menor. Este método consiste en sumergir por varios días al culmo en tanques llenos de la solución preservadora, misma que por difusión penetrará a toda la planta. El tratamiento es más eficiente si se sumerge en soluciones calientes, o cuando se alternan baños fríos y calientes. Es recomendable también, hacer orificios en los entrenudos, o perforaciones a lo largo del culmo, de manera que la solución penetre más fácilmente la capa interior. El tiempo total de sumergido depende de las condiciones climáticas, la especie, el estado del culmo, la solución preservativa o la edad. Generalmente se sumerge durante ocho horas, y se deja escurrir otras dos.

⁵⁷ Ordóñez Candelaria and others.

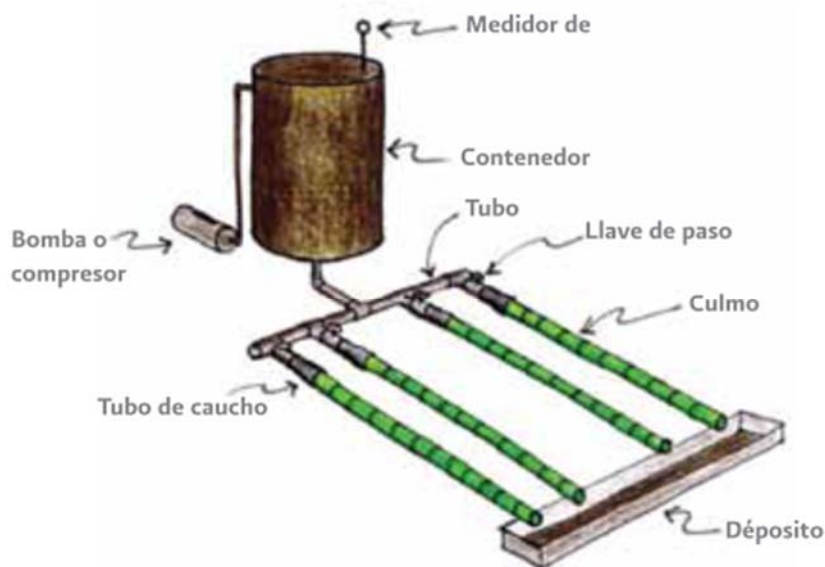
⁵⁸ Ordóñez Candelaria and others.

Método Boucherie: Consiste en dejar fluir la solución de preservativo a través del culmo, de la parte superior a inferior. Se puede usar un tubo de caucho como contenedor de la mezcla, o el mismo culmo como contenedor. Se deja entre 5 y 6 días, utilizando preservadores hidrosolubles.



Método boucherié modificado. Fuente: *manual para la construcción sustentable*⁵⁹

Método Boucherie Modificado: Es el mismo sistema que el método boucherie, con la variante de que los culmos son procesados mediante un sistema que genera presión, acelerando el proceso y permitiendo que se pueden tratar más de un culmo simultáneamente. El tiempo de tratamiento se reduce a unas cuantas horas, logrando la eficiencia de tratamiento para grandes volúmenes de producción.



Método boucherié modificado. Fuente: *manual para la construcción sustentable*⁶⁰

⁵⁹ Ordóñez Candelaria and others.

⁶⁰ Ordóñez Candelaria and others.

SECADO

Finalmente, terminados todos los procesos de tratamiento, es vital secar al culmo. Esto puede realizarse de distintas maneras, ya sea al aire libre, al horno, por inyección de aire caliente, o secadores solares pasivos o activos.

Secado al Aire Libre: Puede realizarse mediante el uso de caballetes que aíslen los culmos del contacto directo con el suelo natural. Es recomendable girar a los culmos para garantizar la uniformidad del secado. Puede demorar entre 2 y 6 meses el secado, dependiendo de las condiciones climáticas.

Secado Bajo techo: En este método, se secan los culmos bajo techo, cosa que evita posibles cuarteaduras o torceduras en los tallos. Se deben colocar separadores entre los tallos, para garantizar el flujo de aire.

Secado con secador solar pasivo: Consiste en colocar las piezas de bambú al interior de un invernadero de plástico o cristal, lo que se generan mayores temperaturas al interior, por lo que se acelera el proceso de secado.

Secado con secador solar activo: Igual al método pasivo, con la adición de ventiladores al invernadero, que aceleran el proceso.

Horno: Se utilizan los mismos hornos que se usan para secar madera. Con un proceso similar.

Inyección de Aire Caliente: Se conectan ventiladores que emanan aire caliente a mangueras de plástico que a su vez llegan al interior de cada culmo.

RESUMEN CAPÍTULO

En general por lo que hemos visto, el bambú es una planta sumamente práctica, es de rápido crecimiento, tiene una muy buena capacidad de reproducción, y se puede dar en una gran parte del mundo, bajo muy variados climas, pero sobre todo, es de gran resistencia mecánica. Por lo que se considera el material ideal como para formar parte de la industria de la construcción, de manera que se disminuya el impacto ambiental. Existen demasiadas especies como para analizarlas todas, razón por la cual dentro de la literatura, de las más de 90 especies que se encuentran en México, me limité a revisar únicamente las más comunes, como para tomarlas en cuenta en la selección de la especie correcta. En el análisis realizado, se llegó a la conclusión de que la resistencia mecánica de las diferentes especies es muy similar, puesto que la resistencia mecánica está relacionada directamente con la matriz y las fibras de las especies, y por tanto, directamente relacionada con la densidad. En los artículos analizados, en todos se llega a la conclusión de

que la parte más resistente de las guaduas, es la parte externa de los culmos, debido a una mayor concentración de fibras. Es importante destacar, que si bien, las fibras son las que soportan los esfuerzos mecánicos de tensión y flexión, es el parénquima, el que soporta los esfuerzos de compresión. Ahora bien, debido a la intención del proyecto, sería contraproducente desfibrar al bambú para involucrarlo en una matriz polimérica, debido a que habría una pérdida de resistencia ante los esfuerzos de compresión. Por consiguiente, llego a la misma conclusión que el Dr. Agustín Hernández, y que en su artículo “metodología para determinar esfuerzos de diseño del bambu” ⁶¹ en el que publica que la mejor opción para un bambú que tenga por objetivo el ser usado como material estructural, es el que tenga la mayor densidad.

Como parte de la investigación, se utilizará el desperdicio de taller de dos especies de bambú distintas, y en ambos casos se usarán piezas secas, puesto que representan mejor comportamiento mecánico: Oldhami, y Angustifolia Kunth. La primera por sus características de buena densidad y propiedades mecánicas estables, y la segunda por su fácil obtención y reproducción dentro de los estados productores de bambú en la república mexicana, así como el resto de Latinoamérica. Se utilizará un porcentaje desconocido de ambas especies, ya que durante el proceso de producción de estructuras en taller se mezcla el desperdicio de ambas especies. En ambas especies, encontramos la resistencia necesaria en cuanto a esfuerzos de compresión, por lo que se procede con una proporción desconocida, garantizando que no importa cuánto cambie la relación entre Guadua Oldhami y Guadua Angustifolia, la mezcla final tendrá las características de resistencia mínimas adecuadas para el proyecto.

⁶¹ Hernández and Barragán.

POLÍMEROS

DEFINICIÓN

Son materiales que se caracterizan por tener largas cadenas de monómeros (molécula básica que permite ser unida a otras similares) que se repiten, y que están unidos entre sí generalmente mediante enlaces covalentes, aunque también encontramos enlaces iónicos, o de hidrógeno. Constituyendo moléculas gigantes llamadas macromoléculas. Tienen pesos moleculares entre 10,000 hasta 1, 000,000 g/mol.⁶²

Los polímeros se producen mediante un proceso conocido como polimerización, mediante el cual moléculas más pequeñas se unen para crear otras más grandes⁶³. Las propiedades que se pueden disponer de los polímeros están intrínsecamente relacionadas con la estructura molecular. En éste sentido, la estructura puede ser diseñada o modificada según las necesidades, y como resultado, tenemos una inmensa cantidad de propiedades. Por lo general, los polímeros comerciales son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja o nula conductividad eléctrica, de baja resistencia, baja rigidez, y no son muy adecuados para su utilización en altas temperaturas, sin embargo son fáciles de producir, de moldear y son de bajo costo. Los polímeros son más conocidos como plásticos en el mundo comercial, y como pueden imaginarse existe una infinidad de tipos de plásticos, desde muy suaves como para bolsas de supermercado, hasta muy duros como los que encontramos en los tableros de automóviles; pueden ser tan elásticos como una liga, o tan duros y rígidos como el policarbonato, que se usa como cristal a prueba de balas.

ORIGEN

Según la materia prima de la cual están constituidas estas macromoléculas conocidas como polímeros, podemos encontrar que existen orgánicos e inorgánicos.⁶⁴

⁶² Rodrigo Rafael Pérez Gonzalez, 'Reaprovechamiento Del Plástico En Elementos Arquitectónicos. PET Reciclado Para La Obtención de Elementos Modulares Plásticos' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

⁶³ Oviedo.

⁶⁴ Ricardo Flores Gómez, 'Diagnóstico de La Industria Del Plástico En México' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

LOS POLÍMEROS ORGÁNICOS

Son los que tienen un origen de materia prima natural que estuvo alguna vez viva o que es producto de microorganismos. Pueden subdividirse en naturales y sintéticos.

Los naturales son aquellos que se hallan en la naturaleza ya producidos por seres vivos, como ejemplo a escala molecular que encontramos en cualquier animal, están las proteínas, carbohidratos, los ácidos nucleicos, etc. A una escala más grande la lana o la madera, polímeros que son algunos de los materiales que fueron de los primeros en ser involucrados en la vida cotidiana del hombre.

Los que son sintéticos, son producto del procesamiento de materiales orgánicos como por ejemplo el pvc, que se obtiene por oxiclорación por reacción del etileno (procedente del petróleo y del gas natural) con cloro que se deriva del cloruro sódico, más conocida como sal.

LOS POLÍMEROS INORGÁNICOS

Son los que tienen un origen de materia prima que nunca estuvo vivo y no fue producto de microorganismos. Al igual que los orgánicos, puede subdividirse en naturales y sintéticos.

Los naturales son los que encontramos ya formados como producto de la naturaleza como el grafito o los diamantes que son largas cadenas de carbón moldeados a través de años sometidos a grandes temperaturas y presiones.

Los sintéticos son los que han sido creados netamente en laboratorio con materiales inorgánicos que a través de reacciones químicas y distintos procesos dan lugar a estos materiales. Como ejemplo la fibra de vidrio, que se produce con base en sílice, que se obtiene de la arena.

El género de polímero que más se utiliza en la actualidad con una variedad de usos en distintos campos, son los plásticos que son mezclas o formulaciones de uno o varios tipos de polímeros con un número generalmente grande de aditivos.

MÉTODOS DE POLIMERIZACIÓN

Para producir un polímero, como ya vimos, se necesita llevar a cabo una reacción de polimerización en la que se unen monómeros para formar una partícula más grande⁶⁵, con mayor peso molecular, y por tanto, propiedades distintas. Existen diversas maneras de llevar a cabo esta reacción química, debido a que

⁶⁵ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

dependiendo del origen de los monómeros, la reacción puede ser violentamente exotérmica, o liberar gases tóxicos, por lo que es necesario controlar las condiciones para evitar accidentes. Industrialmente se utilizan cuatro técnicas principales para la polimerización de un monómero, cada una con ventajas y desventajas⁶⁶:

POLIMERIZACIÓN EN MASA

Es el método más simple, y quizá el más utilizado para la obtención de polímeros de condensación, en los que las reacciones son ligeramente exotérmicas, por lo que pueden ser controladas de manera sencilla. Generalmente en este método se polimerizan los monómeros a través de una extrusora donde se mezclan con un iniciador (componente químico que da inicio a la reacción de polimerización). Esta máquina permite realizar un proceso en el que se someten los componentes a un aumento de temperatura y presión mientras son agitados provocando que se produzca una mezcla viscosa del polímero que pasando por un molde, produce hilos del polímero ya extruido. Dependiendo del polímero a producir, se pueden realizar con o sin un iniciador, o en moldes sin agitación. Esta técnica es económica y produce polímeros con un alto grado de pureza, donde se evita la creación de contaminantes. El problema de usar ésta técnica para algunos polímeros, es que se pueden generar reacciones exotérmicas incontrolables, que dan origen a zonas más calientes que otras, por lo que el proceso de la polimerización puede ir a velocidades distintas dentro del fluido mismo, produciendo un polímero no homogéneo, ya sea en color o estructura.

POLIMERIZACIÓN EN DISOLUCIÓN

En este método, además de tener un monómero y un iniciador, se tiene un disolvente, cuya función es la de disolver ambos componentes para obtener una mezcla homogénea, que disminuya la viscosidad del fluido, por tanto se facilita la agitación del mismo, mejorando la transferencia de calor, evitando el sobrecalentamiento⁶⁷. El disolvente se retira al finalizar el proceso, por lo que en un escenario ideal, éste debe de ser fácil de separar de la mezcla, ya sea en un proceso por filtración, o usando un no-disolvente para que se separe en forma de polvo, o fibras. El problema de usar este sistema, es que se pueden mezclar las cadenas moleculares del polímero con el disolvente, disminuyendo el peso molecular del polímero, afectando así las propiedades mecánicas del mismo, razón por la cual se debe seleccionar con mucha atención el disolvente a usar.

⁶⁶ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

⁶⁷ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

POLIMERIZACIÓN DE SUSPENSIÓN

Este método consiste en mezclar el monómero e iniciador mediante gotas en un medio acuoso en el que ambos sean insolubles, generalmente agua. La reacción de polimerización se produce en las gotas que forman glóbulos de un tamaño entre 2 y 10mm⁶⁸. Gracias a un estabilizador que se mezcla con el medio acuoso, se evita que los glóbulos se unan entre ellos y se logra que se dispersen homogéneamente en el agua evitando su precipitación. El sistema debe ser agitado continuamente hasta que la reacción de polimerización se haya realizado en cada glóbulo. Finalmente se separa el polímero del medio acuoso y obtenemos como resultado un polímero en forma de perlas, razón por la cual también se conoce como polimerización en perlas. La ventaja de este método es que con el agua se puede controlar la temperatura de reacción, además de que al igual que la polimerización en masa, se obtiene un polímero puro. El problema de éste método, es el de mantener la suspensión de los glóbulos durante el periodo crítico de polimerización, momento en el cual las gotas son muy viscosas y tienden a agregarse entre ellos.

POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN

Para entender este método, es importante revisar lo que es una emulsión. Una emulsión es la mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Uno de estos líquidos es conocido como la fase dispersa y es el que será dispersado en otro que será conocido como la fase continua o dispersante. Esto significa que son dos líquidos que no son mezclables entre sí, sin embargo pueden estar en una mezcla en la que ambos están separados pero dando una apariencia homogénea, aunque en realidad a nivel molecular no lo sean⁶⁹.

Para esta reacción se necesitan tres productos básicos: Iniciador de polimerización soluble en agua, monómero parcialmente solubles, y emulgente o estabilizador de la emulsión. La reacción se forma de la siguiente manera: En el emulgente se va a distribuir el iniciador homogéneamente. Una vez juntos, emulgente e iniciador, se formaran micelas que son un conjunto de entre 50 y 100 moléculas de coloide que se enlazan con sus extremos hidrofílicos orientados hacia la fase acuosa, dejando en su interior una especie de celda, en las que atrapan al monómero. Es aquí donde se lleva a cabo la reacción de polimerización (las moléculas siguen creciendo de tamaño molecular conforme se van juntando más y más monómeros), mientras que los monómeros, al no ser solubles en agua, andan sueltos en el sistema esperando una micela a la cual juntarse, por lo que son algo así como una reserva de monómero que se utiliza para seguir aumentando el tamaño de las micelas donde hay moléculas de polímero en crecimiento. En el sistema entonces, existen moléculas de monómeros dispersas, esperando juntarse a una

⁶⁸ Pérez Gonzalez.

⁶⁹ Pérez Gonzalez.

micela, que cuando se juntan, se pueden crear moléculas de polímeros de muy altos pesos moleculares. La ventaja de éste método es que la reacción ocurre muy rápido, es fácil controlar la agitación y temperatura, pero más importante, es que se puede controlar el grado de polimerización, aumentando o disminuyendo la concentración del emulgente, provocando así moléculas más grandes, y por tanto más pesadas. El problema de éste método es que para controlar eficazmente todas las variables, se requieren de muchos aditivos, como emulgentes que ayudan a estabilizar la emulsión, compuestos que mantienen el pH, reguladores de tensión superficial, entre otros provocando que los polímeros obtenidos sean más difíciles de purificar debido a los aditivos agregados.

CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS

Existen distintas maneras de clasificar polímeros, que abarcan desde cuál es su origen (como revisamos anteriormente), en función de su estructura y peso molecular, su forma molecular, su tipo de monómero, su composición química, por su volumen de producción, en función de sus propiedades térmicas-mecánicas, según su método de polimerización (se revisó anteriormente), entre otras. Aquí revisaremos los métodos de clasificación que más se utilizan⁷⁰.

CLASIFICACIÓN POR ESTRUCTURA Y PESO MOLECULAR

Como ya vimos, los polímeros son grandes cadenas de monómeros, que se van a ir juntando hasta formar una macromolécula, para lograr esto, las cadenas deben estar ordenadas en su interior para que puedan seguir creciendo y no se estorbe a sí misma. Esto es la base de la clasificación según su estructura y peso molecular. Aquí encontramos 3 diferentes grupos: amorfos, semicristalinos y cristalinos⁷¹.

Los polímeros amorfos, son aquellos que tienen sus cadenas desordenadas, obstruyendo un crecimiento ordenado de manera que tienen grandes espacios entre sus moléculas. En general estos polímeros no tienen buenas propiedades mecánicas, ni muy alto peso molecular, son fáciles de procesar.

Los polímeros cristalinos, son lo contrario a los amorfos, es decir, que su estructura molecular si tiene orden, por lo que las moléculas pueden acomodarse de mejor manera, permitiendo un crecimiento controlado, que tiene poco espacio entre moléculas. Estos polímeros por lo general, tienen excelentes propiedades mecánicas, tienen alto peso molecular, sin embargo, son extremadamente difíciles de manipular.

⁷⁰ Pérez Gonzalez.

⁷¹ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

Los polímeros semicristalinos, son, aquellos que son una mezcla entre cristalino y amorfo, y por tanto pueden tener una mezcla de las propiedades de éstos dependiendo el polímero del que se trate.

Debido a la dificultad de organizar a todos los polímeros en estas tres categorías, se utiliza un porcentaje de cristalinidad, en el cual se puede saber que tan cristalino o amorfo es. Se concluye entonces que entre más cristalino es un material, tiene más peso molecular, mismo que está relacionado a que tiene mejores propiedades mecánicas pero a su vez, es difícil de manejar. Para poder innovar un material nuevo, al momento de diseñar, se debe encontrar el equilibrio entre estas propiedades, tomando en cuenta el uso al que estará destinado el producto final.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA MOLECULAR

Esta clasificación es similar a la de estructura molecular, sin embargo en ella, no se determina el orden que tengan las moléculas y se limita a informar si tienen o no mucho espacio entre sus moléculas. En esta clasificación según su forma, no se va a determinar el espacio que hay entre moléculas, y se va a limitar a dar una idea de la forma que dibuja su cadena según la manera en que sus moléculas estén acomodadas. Se clasifican en lineales, ramificados, reticulados y entrecruzados.

Lineales, como su nombre lo indica, son los que no están ramificados, siendo el orden de sus moléculas en una sola línea.

Ramificados, En este tipo de polímeros, existe el orden de la cadena en disposición lineal, sin embargo, existen también cadenas secundarias, conectadas lateralmente a la cadena principal. A estos pequeños grupos se les denomina como ramificaciones o grupos pendientes.

Reticulados, En este tipo de polímeros, existe más de una cadena principal. Estas cadenas principales, están unidas a través de cadenas secundarias que unifican a todas. De esta manera se consigue una red molecular, en la que hay cruzamiento de cadenas, obteniendo así redes compactas de forma bidimensional.

Entrecruzados, son polímeros con altos grados de entrecruzamiento, dando lugar a redes compactas tridimensionales.

CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE MONÓMERO

En esta clasificación, se toma en cuenta el compuesto del que está hecho el polímero, y la forma en la que está ordenado. Existen dos posibilidades, que sean homopolímeros, o copolímeros⁷².

Homopolímeros son los que están constituidos por una sola variedad de monómeros en repetición, siendo toda la cadena igual.

Copolímeros son los polímeros que están contruidos por más de un monómero, distribuido a lo largo de la cadena mediante cuatro variantes, al azar, alternados, en bloques o como injerto. Las tres primeras variantes son de manera lineal, es decir que el polímero crecerá longitudinalmente.

Cuando hablamos que están dispuestos al azar, como se puede imaginar, los monómeros están distribuidos a lo largo del polímero de manera aleatoria.

Alternados, es la disposición de ordenamiento a lo largo de la cadena alternándose de manera equitativa los monómeros que constituyen al polímero.

En bloques significa que hay un grupo de monómeros del mismo origen unido entre sí, y unido a otro bloque de igual tamaño del otro monómero que construye al polímero.

Injerto es la manera de incrustar un monómero a una cadena de monómeros ya construido, por lo que el crecimiento del polímero será de manera transversal a medida de que se le agregan monómeros de injerto.

Existe un tipo de copolímero conocido como terpolímero, que es básicamente un polímero que está formado por tres monómeros que se distribuyen de manera reiterativa.

CLASIFICACIÓN POR SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

De acuerdo a la composición química de los polímeros, es decir a qué sustancias están presentes en el polímero, y en qué cantidad, se agrupan en los diferentes tipos de polímero⁷³:

Poli olefinas: Son todos aquellos polímeros que se obtienen mediante la polimerización de olefinas o alquenos, que son compuestos químicos que contienen por lo menos un doble enlace carbono – carbono.

Poliésteres: Es el grupo de polímeros, que dentro de su cadena principal, involucra al grupo funcional éster, que es un compuesto químico que se deriva de los hidrocarburos, particularmente del petróleo.

⁷² Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

⁷³ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

Poli éteres: Son aquellos polímeros que dentro de su estructura química involucran a uno o varios éteres, en cuya molécula existe un átomo de oxígeno unido a dos radicales de hidrocarburos.

Poliamidas: Es un polímero en cuya estructura encontramos algún grupo amida, que consiste en una amina (compuesto derivado del amoniac) unida a un grupo acilo (compuesto derivado de un oxácido).

Polímeros celulosos: Son aquellos polímeros que contienen celulosa, ya sea en estado natural o modificada químicamente.

Polímeros acrílicos: Son aquellos polímeros tienen base en polimetacrilato de metilo, que significa que contiene varios metacrilatos de metilo, que es un compuesto químico de fórmula $C_5H_8O_2$.

Polímeros vinílicos: Los polímeros vinílicos son polímeros obtenidos a partir de monómeros vinílicos; es decir, pequeñas moléculas conteniendo dobles enlaces carbono-carbono.

Poliuretanos: que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con diisocianatos, compuesto químico que se caracteriza por contener grupos funcionales de isocianato, que es un grupo químico con fórmula $-N=C=O$. En resumen, los poliuretanos son polímeros que se derivan de los isocianatos.

Resinas Formaldehido: Son resinas que se obtienen a partir del compuesto aldehído, compuesto químico que se caracteriza por tener el grupo funcional $(-CHO)$, sustancia que se obtiene por oxidación catalítica del alcohol metílico.

Siliconas: Son polímeros formados por estructuras de tipo éter $(Si-O-Si)$, con sustituyentes orgánicos en los átomos de silicio.

Espumas: Son aquellos polímeros en los que se encuentra atrapado un gas en forma de burbujas, mismas que llegan a constituir hasta el 95% del volumen total del material.

Resinas alquídicas: Estas resinas son producto de la mezcla de un poliácido, un polialcohol y un aceite secante.

Polisulfuros: Son aquellos que se sintetizan por una reacción de un dicloruro con una disolución acuosa de polisulfuro alcalino que son sales que se forman por oxidación de sulfuros uniéndose a dos átomos de azufre.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SU VOLUMEN DE PRODUCCIÓN

En la actualidad, los polímeros han sido el gran avance de los materiales, como lo fue en su momento la introducción de los metales⁷⁴. Ha sido el avance tan contundente, que actualmente ocupan un lugar inimaginable en nuestras vidas cotidianas. Sin embargo, no todos los plásticos tienen el privilegio de participar de la misma forma en nuestros días. Dependiendo del uso que se dará, son las propiedades que se buscan en un plástico, mismas que para obtener tienen un costo monetario y en tiempo de producción, por lo que existen plásticos que tienen mucha más producción que otros. Esta es la base de la clasificación de los plásticos según su volumen de producción, en la cual se disponen 3 categorías⁷⁵: los polímeros técnicos o de alto rendimiento, los ingenieriles y los de uso comercial también conocidos como de gran consumo o “comodity”.

Los polímeros de alto rendimiento, son los que están diseñados con un fin muy peculiar, con propiedades únicas, y que en algunos casos deben cumplir con su objetivo bajo situaciones difíciles. Como ejemplo, está el caso de algún caucho con fines de sellado en capsulas espaciales, en donde no sólo deben cumplir con el trabajo para el que fueron diseñados, sino que también debe hacerlo bajo condiciones extremas, como lo son temperaturas muy por debajo de cero grados Celsius, y muy altas alcanzando hasta 300°C dentro de las cuales, el polímero no puede cambiar ninguna de sus propiedades. Por lo mismo de que son polímeros muy especiales, su producción es muy cara, económicamente y en tiempo de investigación, y es por eso que su producción y utilización está reservada para situaciones especiales.

Los polímeros ingenieriles, son los que están diseñados para cumplir funciones especiales, pero con un uso en donde las condiciones de trabajo están dentro de un rango más común. Este tipo de polímeros se diseñan para cumplir exigencias de trabajo que bien pueden tomar otros materiales como metales, o maderas, sin embargo por el método de producción, costo o diseño, se desempeñan de mejor manera. Un ejemplo de este tipo de materiales, es el UHMWPE por sus siglas en inglés (ultra high molecular weight polyethylene), que es un polímero de cadenas poliméricas muy largas, que le proporcionan propiedades increíblemente buenas que lo hacen único, como una superficie de baja fricción, muy buena resistencia al desgaste, al impacto, a la corrosión, además de que es autoextinguible, entre otras. Sus aplicaciones son muy bastas en las que se distingue su uso para para usos mecánicos como guía de cadenas, en bandas transportadoras o piezas expuestas al desgaste.

⁷⁴ Pérez Gonzalez.

⁷⁵ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola; Pérez Gonzalez.

Los plásticos de gran consumo, o commodity son los que están por último en esta clasificación, y en resumen, son un grupo de plásticos de bajo costo, que son producidos en grandes cantidades y son utilizados principalmente en situaciones con periodos de vida útil muy corta. Es en éste grupo dónde situamos a todos los plásticos que utilizamos diariamente, ya sea en botellas, envases, carcasas, equipos electrónicos, juguetes, desechables, o cualquier otro plástico de uso común. En éste grupo existen 6 plásticos que por mucho son los que más se consumen a nivel mundial⁷⁶:

- **Polietileno de alta densidad (PEAD)**: por sus características de ser denso, pesado y resistente, se usa generalmente para envases de alimentos, carcasas de electrodomésticos, juguetes, tuberías, etc.
- **Polietileno de baja densidad (PEBD)**: Es ligero y flexible, se utiliza mucho para bolsas y envolturas.
- **Poliestireno (PE)**: Es un polímero rígido, que encontramos en envases, embalajes, juguetes, e incluso construcción como un aislante, entre otros usos.
- **Cloruro de Polivinilo (PVC)**: Es un material duro, impermeable y muy resistente a la corrosión, por lo que se usa mucho en impermeables, tuberías, recubrimientos de cable, etc.
- **Polipropileno (PP)**: Es buen aislante, resiste productos químicos, tiene una resistencia mecánica moderada, y lo encontramos en envases, cascos, piezas industriales, alfombras, cuerdas entre otros.
- **Polietilentereftalato (PET)**: Es rígido, de buena resistencia a la corrosión. Lo encontramos generalmente en botellas, envases de alimentos, fibras textiles, etc.

Cada uno de éstos 6 grandes polímeros, tiene propiedades únicas, y algunas otras que pueden parecerse similares a alguno de los otros, sin embargo debido al uso del producto final, y costo de producción para el mismo, es que se decide usar uno u otro, por lo que no podemos decir que existe alguno mejor o peor.

⁷⁶ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS PROPIEDADES TÉRMICAS-MECÁNICAS

Dentro de esta clasificación podemos encontrar tres diferentes tipos de polímero⁷⁷, que se agrupan de acuerdo a sus propiedades mecánicas (respuesta del material a esfuerzos externos) que están relacionadas íntimamente a la temperatura: Termoplásticos, Termoestables, Elastómeros.

- **Termoplásticos:** Son polímeros que tienen una manera de comportarse plástica y dúctil. Al calentarse estos polímeros, se ablandan, relajando los enlaces en sus cadenas moleculares permitiendo un deslizamiento entre ellas, convirtiéndose en un fluido viscoso que puede ser moldeado o reciclado con facilidad mientras está caliente. Al momento de enfriarse, sus cadenas moleculares vuelven a fortalecerse provocando una solidificación del material. Lo más importante de éste tipo de polímero es que el proceso de calentamiento para moldear y enfriamiento para solidificar puede repetirse varias veces sin sufrir un cambio en su estructura química.
- **Termoestables:** Estos polímeros generalmente son más resistentes y frágiles. Este tipo de polímero, está construido por fuertes enlaces cruzados entre ellas formando estructuras de redes tridimensionales. Lo importante de este material es que una vez que sus enlaces se formaron, son difíciles de modificar por cualquier medio, ya que si se vuelven a calentar, en vez de relajarlos, van a sufrir un cambio en su estructura química irreversible. En resumen, el moldeo en estos materiales, puede realizarse solo una vez, dado que después, difícilmente va a poderse modificar, y si se calienta, se va a quemar.
- **Elastómeros:** Tienen una estructura intermedia, en la cual sus enlaces permiten el reacomodo de moléculas sin romperse, permitiendo una ligera formación de enlaces cruzados en las cadenas. Esta propiedad permite que su estructura se ordene al momento de ser expuesto a una fuerza externa, y recobrando su estado amorfo al ser liberado de la misma. Este tipo de materiales tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades, sin llegar a una deformación plástica o un cambio permanente.

PROPIEDADES GENERALES DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros en general, son un mundo de posibilidades en cuanto a propiedades refiere, pueden ser frágiles o elásticos, rígidos o dúctiles, buenos o malos conductores térmicos o eléctricos, ligeros y flexibles, o pesados y de alta resistencia, pueden ser materiales que filtren un gas en específico, o que bloqueen a tantos como sea posible, entre otras muchas más. Cada una de estas posibilidades está

⁷⁷ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

determinada por el diseño del polímero mismo, y su utilidad final. Es en este campo donde encontramos casi todas las innovaciones que actualmente hay en los materiales, ya que constantemente se buscan nuevas propiedades que ningún otro material podría ofrecer, como recolectar agua del aire, o soportar agentes químicos, climas extremos, oponer cero resistencia al paso de electricidad para ser un superconductor, entre otras que se encuentran en desarrollo. Escribo estos ejemplos para resaltar que es difícil agrupar las propiedades de los polímeros en una serie selecta de las mismas, pues son muy bastas. Sin embargo, existen una serie de propiedades muy características de estos materiales, que están íntimamente relacionadas a su estructura química, y como resulta afectada por diferentes condiciones, como la temperatura. Estas propiedades, son las que más nos interesan ya que son las que van a determinar los procesos que se van a utilizar para la producción, así como para limitar su uso bajo determinadas condiciones⁷⁸. Una vez conocidas estas propiedades, se determinan las resistencias mecánicas comunes que se analizan en todos los materiales, para saber si efectivamente es el material que necesitamos para resolver cierto problema. Estas propiedades son las que a continuación describo:

Temperatura de Fusión (T_f): Es la temperatura que marca el límite en el que por encima de ésta, las cadenas retorcidas son débiles, el polímero fluye sin deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad son prácticamente cero. Es cuando los polímeros sufrirán una transformación de fase sólida a líquida con una variación en el volumen, produciendo un fluido viscoso que se presta para vaciarse e iniciar procesos de conformado y ser moldeado. Cerca pero por debajo de la temperatura de fusión, las cadenas de polímeros siguen retorcidas y entrelazadas en una estructura amorfa, y es en este estado cuando el polímero se comporta de manera cauchótica es decir, que si se le aplica un esfuerzo, ocurre deformación elástica y plástica, al terminar el esfuerzo la deformación elástica se recupera, sin embargo ya ha quedado deformado. Cuando un polímero termoplástico comienza a ser enfriado por debajo de la temperatura de fusión, las cadenas se acercan y acomodan, generando un incremento en la densidad.

Temperatura de Transición Vítrea (T_g): Es la temperatura que marca el límite por debajo de la cual un polímero se comportará de manera rígida y dúctil, donde el arreglo de sus cadenas sigue siendo amorfo. En la actualidad, hay polímeros que utilizamos en éste estado, como el policloruro de vinilo (PVC) cuya temperatura de transición vítrea esta entre 75 y 100°C.

Temperatura de degradación (T_d): Es la temperatura en la que los enlaces de la cadena pueden destruirse y el polímero quemarse o carbonizarse.

Vizcoelasticidad: Es la capacidad de provocar el deslizamiento de cadenas. La deformación plástica está relacionada con el tiempo y a la velocidad de la deformación. Si se aplica una fuerza lentamente, el

⁷⁸ Flores Gómez; Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola.

polímero toma deformación plástica y se deforma. Si se aplica fuerza rápidamente, el polímero no tiene tiempo de reacomodar sus cadenas por lo que presenta un comportamiento frágil.

Termofluencia: Es un fenómeno que ocurre gracias a la propiedad viscoelástica de los polímeros en la que debido al reacomodo de sus cadenas, el material se deforma plásticamente gradualmente en un período de tiempo cuando se le aplica un esfuerzo constante.

Relajación de esfuerzo: Al igual que la termofluencia, es un fenómeno que se debe a la viscoelasticidad, en la que gracias al reacomodo de las cadenas, en éste caso, se disminuye el esfuerzo interno del material al ser sometido a una carga constante.

Impacto: A muy altas velocidades de deformación, no hay tiempo de que las cadenas del polímero se deslicen, causando deformaciones plásticas. A bajas temperaturas, en general, el comportamiento es frágil, y en altas temperaturas se observa un comportamiento más dúctil.

Deformación de polímeros cristalinos: En este tipo de polímeros, las cadenas poliméricas, se alinean y acomodan de manera paralela a la fuerza de tensión, pudiendo hacerse cadenas más cortas que permitan un mejor acomodo. Ante un esfuerzo continuado, las cadenas se desenmarañan o rompen haciendo que el polímero falle.

Microcavidades: En los termoplásticos se crean microcavidades cuando las regiones de deformación plástica aparecen en dirección perpendicular a la del esfuerzo aplicado.

Cristalización y deformación: Promover la cristalización de un polímero ayuda a incrementar su densidad, su resistencia a los ataques químicos, y sus propiedades mecánicas, incluso a temperaturas más altas, y todo esto debido a la unión más fuerte entre sus cadenas.

Espumas: Pueden crearse polímeros que son adicionados con algún aditivo, que al momento de reaccionar produce gases que quedan atrapados dentro del material, formando así huecos que provocan un aligeramiento del producto, menor densidad, menor peso. Tienen excelentes propiedades como aislantes térmicos o acústicos.

MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

Existen dos tipos generales de procesamiento de plásticos, el de transformación, y el de mecanización.⁷⁹

El primero es el que aprovecha la estructura química de los polímeros para dar formas útiles al mismo ya sea en semielaborados (formas previas a la final, pero con las cuales se puede facilitar la manipulación del polímero, como láminas, tubos o perfiles) o productos finales (como las botellas, que son productos contruidos por grandes industrias, donde el volumen de producción es tan alto, que vale la pena ahorrarse los pasos de producción en elementos semielaborados,). El de mecanización, es el método con el cual, se usan otros equipos o productos sobre los plásticos ya hechos para dar acabado final o fijación, por ejemplo: fijación a través de uniones químicas o mecánicas, y acabados a través procesos como fresado, taladrado, torneado, desbastado, serrado o pulido. En ésta investigación solamente revisaremos los métodos de procesado de transformación.

Una vez que sabemos cómo crear un polímero, es necesario saber transformarlo en formas útiles, para poder así hacer uso de sus propiedades, ya sea al momento de su procesamiento, de uso, o al momento de reciclarlo. Existen diferentes tipos de procesamiento por los cuales pasan todos los polímeros que usamos, mediante los cuales, se da forma según el diseño, ya sea para producir semielaborados o un producto final. Existen 3 distintos métodos básicos de procesamiento: extrusión, inyección y soplado⁸⁰. Estos, a su vez pueden utilizarse mezclándose entre sí, aumentando la complejidad del proceso, logrando así que finalmente se obtenga el producto deseado:

MOLDEO POR EXTRUSIÓN.

En el moldeo por extrusión se utiliza un equipo llamado extrusora en el cual a través de un tornillo helicoidal, el polímero es sometido a altas presiones y temperaturas hasta que este se funde en una masa viscosa. El polímero es empujado gracia el mismo tornillo y es forzado a salir por un pequeño orificio llamado boquilla que puede tener un diseño preestablecido de manera que se obtienen perfiles de un largo indeterminado ya que el proceso es continuo, finalmente el polímero ya frío, es cortado según las necesidades. Con éste método se pueden crear una infinidad de piezas, para lo cual hay que controlar muy bien las posibles variables, como temperatura y presión del tornillo, ya que esto influirá directamente en la viscosidad de la mezcla, propiedad que en función de la velocidad de salida de la extrusora permitirá piezas de mayor o menor calidad.

⁷⁹ Domingos Freitas, 'Fibrenamics', 2017 <<https://www.web.fibrenamics.com/es/conocimiento/las-fibras/>> [accessed 28 November 2017].

⁸⁰ Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, and Fernández de Piérola; Callister, XCIV.

MOLDEO POR INYECCIÓN.

El moldeo por inyección es una de las más simples utilizada dentro de la industria para fabricar componentes con formas geométricas de difíciles, o con huecos al interior. Para este método, es necesario contar con una máquina de inyección (cuya parte primaria es una extrusora) de manera que primero se funde el polímero, el cual pasa a través de una “aguja” que insertan el polímero dentro de un molde previamente diseñado en negativo. Una vez que el polímero llena el molde, se enfría, para poder abrir este mismo, del cual se extrae nuestra pieza terminada. Depende de la calidad del polímero y del molde, puede que necesite una segunda etapa de fabricación en la que lijan la pieza de las rebabas y dan un terminado final. Este método es simple, sin embargo hay distintas variables a considerar para que funcione todo perfecto, por ejemplo la temperatura y presión de la extrusora, en la que se controlará la viscosidad de la mezcla final, cuya propiedad es determinante para llenar sin burbujas un molde complejo; de igual manera, se tiene calculado la expansión-contracción del material al enfriar, por lo que en la mayoría de casos, se agrega un extra de polímero que compense la contracción.

MOLDEO POR SOPLADO

Para conseguir que éste sea un método efectivo, primeramente al igual que en la inyección, el polímero debe pasar por una extrusora para después llegar a una máquina de inyección en la que hay un molde hueco previamente calculado para tener la cantidad exacta de polímero a usar en el siguiente paso. Una vez que el molde está frío, se lleva a una máquina de soplado, en la cual a través de la inyección de aire caliente a altas presiones, se funde nuevamente el polímero y expande, hasta llegar al límite del molde en el que se encuentra. De ésta manera se producen casi todas las botellas. Al igual que en los métodos anteriores, es importante controlar las variables del método, tales como temperatura del aire y presión.

MOLDEO POR COEXTRUSIÓN

Éste método es muy similar al de extrusión, con la variable de que aquí se utilizan dos tolvas, con dos tornillos, que permiten mezclar dos polímeros distintos que forman un nuevo compuesto; evidentemente hay que analizar, la compatibilidad de los mismos, así como sus temperaturas de fusión, y propiedades de expansión-contracción.

MOLDEO POR PELÍCULA SOPLADA

Éste método al igual que la coextrusión, es una variante de los principales tres, sin embargo, éste está pensado para producir capas muy finas de polímero como las que se usan para la producción de bolsas de

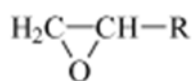
supermercado. Consiste en hacer pasar al material a través de una extrusora con una boquilla tubular, a través de la cual sale aire inyectado a una temperatura y presión controladas, de manera que el polímero se expande, y en fría mientras avanza, obteniendo así una capa muy fina. Finalmente este cilindro tipo “burbuja” es cortado y doblado en rollos que posteriormente se usan en un sinnúmero de aplicaciones. Este método similar a la extrusión, es un proceso continuo, que puede ser infinito, mientras haya material, y energía suficiente para las máquinas.

RESINAS EPOXI

Las resinas epoxi son una clasificación de polímeros, con propiedades termoestables, que no generan productos de reacción durante el curado, y es por ello que su volumen no tiene una gran variación durante el curado. Tienen su principal ventaja dentro de la industria ya que son el componente básico que funciona como matriz en un sin número de materiales compuestos, ya que al mezclarse con otros compuestos no genera residuos de descomposición. Los existen desde líquidos de baja viscosidad hasta compuestos de alta temperatura de fusión. La mayor parte de este tipo de polímero, se utiliza dentro de la construcción, y se basa en resinas que curan a temperatura ambiente, donde el entrecruzamiento se lleva a cabo por la adición de agentes de curado. Debido a su alto impacto en la industria, ahora se producen resinas resistentes a la humedad, al fuego, buenas propiedades mecánicas, resistencia química, de baja contracción en el curado, buena adhesión a otros materiales, y además con sistemas de curado sencillos.⁸¹

Actualmente se utilizan en la construcción como acabado para pisos de alta dureza, resistentes a la abrasión, al agua; como capas de fino espesor no resbaladizas para carreteras y puentes, morteros para restauración, inyección para restaurar fisuras y grietas, entre otras muchas aplicaciones.

Es importante señalar que epoxi es el nombre que se le conocen a estas resinas puesto que dentro de su fórmula química encontramos al menos un grupo epóxido, que es un éter cíclico formado por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono, que a su vez están unidos entre sí mediante un solo enlace covalente.



Grupo Epóxi

Imagen que representa gráficamente la estructura de un grupo epoxi.

⁸¹ Cigarroa Espinosa.

Agentes de Curado

Son endurecedores que convierten a los plásticos en compuestos termoestables, debido a una reacción que produce un entrecruzamiento entre cadenas con enlaces primarios. Existen muchos tipos de agentes de curado para resinas epoxi que funcionen en temperaturas ambientales normales, sin embargo existen algunas cuantas que pueden funcionar bajo circunstancias excepcionales, como temperatura por debajo de 0°C, mayor a 100°C, o humedad de 100%,

RESINAS EPOXI COMERCIALES

Este tipo de resina es la que se caracteriza por tener dos o más grupos epoxi en cada molécula. Las más utilizadas son las siguientes:

Resinas del Bisfenol A: Es una resina que se produce a través de la reacción entre bisfenol A y la epiclorhidrina en presencia de hidróxido de sodio. Se conoce también como DGEBA. El resultado de la reacción, una resina, tiene buenas propiedades mecánicas como dureza y rigidez, alta temperatura de servicio, buena resistencia química. Así como propiedades adhesivas que se deben a los grupos epoxi e hidroxilo

Resinas del Bisfenol F: Esta resina se produce al hacer reaccionar bisfenol F y la epiclorhidrina, resultando en una resina compuesta de una mezcla de isómeros. Sus propiedades son iguales a las del Bisfenol A, a excepción de la resistencia que tiene a los ácidos, a los cuales es un poco más resistente.

Poliamidas Alifáticas: Son de alta reactividad y de rápido curado, tienen buena resistencia a los ácidos, excepto a los orgánicos; se usan en aplicaciones ingenieriles como adhesivos, suelos, o recubrimientos. Son relativamente tóxicas.

Aminas Cicloalifáticas: Son buenos adhesivos, y de buena resistencia química, sin embargo, son sensibles al gua, y no curan completamente a temperatura ambiente.

Aminas Aromáticas: Tienen lenta reactividad por lo que es necesario modificarlas para aplicaciones en construcción a temperatura exterior.

Poliamidas: Dan buenos curados en condiciones adversas, tienen baja toxicidad, buena flexibilidad, adhesión, resistencia a la humedad, sin embargo son las menos resistentes químicamente, así como las menos duras.

PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXI CURADAS

Adhesión: Tienen una buena adhesión a los materiales de construcción, ya sea cementos, madera, metales vidrios, etc. Es necesario preparar a superficie antes de comenzar a unir.

Resistencia Química: La resistencia química de las epoxi, depende del agente de curado que se use, ya que puede usarse uno u otro dependiendo del objetivo de uso final.

Resistencia a la abrasión: Tienen una muy buena resistencia a la abrasión, sin embargo esta, está en función de los componentes de la fórmula, así como los aditivos que puedan usarse, como por ejemplo, el rellenos de sílice que aumentan la dureza superficial.

Resistencia mecánica: En general, todas las resinas tienen una buena resistencia mecánica a la tensión, compresión, y flexión.

Resistencia al choque térmico: Las resinas epoxi flexibles o con aditivos, soportan adecuadamente los cambios bruscos de temperatura, de manera que no se agrietan o rompen. Algunas resinas rígidas pueden presentar algunos problemas con cambios de temperatura muy bruscos.

Estabilidad térmica: Existen resinas que pueden tener temperaturas de servicio muy altas, de manera que no se ven afectadas sus otras propiedades. Es posible que con el envejecimiento con altas temperaturas se produzcan algunas grietas.

ADHESIVOS EPOXI

Los adhesivos epoxi, se caracterizan por su capacidad para unir entre si la mayor parte de los materiales, a excepción de algunos termoplásticos, tienen gran resistencia térmica, mecánica y química; tienen propiedades que ponen en servicio bajo casi cualquier condición climática, pueden ser rígidos o flexibles según el agente de curado, por ejemplo si se usa alguna poliamida o algún polisulfuro, el adhesivo será flexible, a diferencia de aquellas que serán rígidas si se utiliza alguna amina alifática como agente de curado.

Según el diseño del adhesivo, estos se pueden clasificar en tres familias que van a estar determinadas según el uso que se le vaya a dar.

Adhesivos estructurales: Son aquellos que por sus características de excelente adhesión en los materiales, su utiliza comúnmente para unir concreto con concreto o con otros materiales, se puede usar con concreto fresco o endurecido, se usa también para anclajes de acero en concreto.

Adhesivos de uso general: Son los que tienen características de buena adhesión, sin embargo no como para soportar esfuerzos mecánicos mayores, se usan para reparar daños en juntas o para la unión entre materiales que no requiere grandes resistencias mecánicas.

Adhesivos cerámicos: Son las que básicamente se usa para unir losetas cerámicas a concreto o acero, son de rápido curado, así como resistente al agua, detergentes, ácidos y bases. Se usan en lugares con necesidades de resistencia química como laboratorios, hospitales, albercas, etc.

RESINAS DE INYECCIÓN

Las resinas epoxi inyectadas pueden reparar grietas estructurales tanto en superficies verticales como horizontales; tienen ventajas como:

Excelente adhesión a curados frescos o secos; tolerancia a la humedad; posibilidad de curado a bajas temperaturas; no hay contracción en el curado; etc.

RECUBRIMIENTOS EPOXI

Son una serie de resinas epoxicas, que se utilizan principalmente como acabado sobre distintas superficies, que por lo general no pueden estar expuestos a rayos solares debido que su color cambia a un tono amarillento, o se producen grietas. Son resinas de bajo peso molecular, con curados a temperatura ambiente.

RECUBRIMIENTOS EPOXI LAMINADOS

Son recubrimientos que se utilizan en tanques metálicos o de concreto, se utilizan con fibra de vidrio como refuerzo, y se aplica como sándwich, dejando a la fibra en medio de dos capas de resina. La función de las fibras es aumentar la resistencia mecánica y disminuir la contracción durante el curado.

RECUBRIMIENTOS EPOXI DE ALQUITRÁN

La resina le aporta al alquitran la plasticidad térmica y la resistencia a la intemperia, así como el alquitrán le aporta a la resina la resistencia a la humedad. Tiene buenas características de resistencia al impacto y a la abrasión, buena flexibilidad y dureza. Este tipo de recubrimientos son diferentes a diferentes tipos de agua, como es marina, destilada, de alcantarilla, entre otras, y es la razón por la que se utilizan como protección de sistemas de almacenamiento y conducción de agua.

EPOXI PARA SUELOS

Estas resinas tienen buena capacidad de resistencia química, resistencia mecánica, a la abrasión, entre otras. Están formadas por un componente base (agente de curado) y los aditivos que se mezclan antes de la aplicación. Se utilizan en sustratos de concreto, madera y metales, en distintos espesores.

RESINAS DISPERSAS EN AGUA

La polaridad de las resinas epoxi, permite que se dispersen en agua y puedan utilizarse con agentes de curado que también sean dispersables en agua. Estas resinas tienen buenas propiedades mecánicas, buena adhesión, resistencia química a disolventes, y al desgaste. Su constitución y curado a temperatura ambiental hace que sean productos de baja toxicidad. El curado tiene lugar en dos partes, primero, el agua se evapora dejando a las partículas dispersas en el agente de curado, para proceder a una reacción en la que el agente de curado deja lugar en la interfase a una capa polimérica de alto grado de entrecruzamiento.

RESUMEN CAPÍTULO

Los polímeros son materiales que forman grandes cadenas de monómeros, y que gracias al orden de las mismas, pueden tener muy variadas propiedades. Si bien inicialmente se procuraba utilizar materiales polímeros de reciclaje como alguno del grupo commodity, se observó que la modificación de sus propiedades al exponerse al calor, los convertía en materiales no aplicables para el propósito de esta investigación, puesto que para el desarrollo de un prototipo estructural de bambú, es de vital importancia el evitar de cualquier manera, la deformación del material por cualquier razón. Este es el motivo por el cual quedan descartados los polímeros involucrados en este gran grupo así como aquellos que sean de las mismas características, ya que en todos los casos, son materiales termoplásticos, por lo que al verse involucrado un aumento en la temperatura, su relación entre resistencia y esfuerzo va a variar drásticamente, permitiendo deformaciones plásticas que afectan directamente al material, y por tanto su estructura, resistencia y forma. Esto, nos obliga a explorar nuevas opciones que no alteren su estructura ante variables externas, llegando a la conclusión de que la mejor opción es un material termofijo, que no se deforme ante el aumento de temperatura, así como con la exposición a radiación solar. Los materiales polímeros más eficientes en este sentido, son las resinas epoxi, puesto que son polímeros termofijos, que tienen una estructura estable, lo que permite su utilización con los propósitos de este proyecto. Mantienen un estado líquido antes de ser mezclados con el agente de curado, lo cual nos beneficia ampliamente pues además de poder mantener su estructura estable ante agentes externos, al ser líquido se

nos facilitará su vaciado dentro de un molde al momento del proceso de la manufactura, aunado a esto, la ventaja de disponer una resina en estado líquido, nos permite recubrir de forma precisa a todas las fibras, lo que nos va a permitir una eficiente protección del compuesto orgánico al ser expuesto a la intemperie y otros organismos vivos.

Lo ideal es una resina que permita una adhesión a las fibras de bambú mediante enlaces químicos, para lo cual debería tratarse con métodos químicos más complejos al bambú. En la investigación se busca un producto de fácil manufactura, que se pueda integrar en cualquier tipo de construcción con un material natural. Se utilizará una resina epoxi de carácter comercial, en la que nos conformemos con adhesiones de tipo mecánico, en los que puede o no, existir enlaces químicos, sin embargo, para nosotros, carece de importancia siempre y cuando la adhesión mecánica sea lo suficientemente fuerte como para soportar los esfuerzos para los que el material se está pensando.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El proceso de la experimentación está planteado con un enfoque cuantitativo de tipo experimental, debido a que presenta un proceso secuencial y probatorio, en la que cada etapa de dicho proceso no puede evitarse, y en el cual se usa la recolección de datos para probar una hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento y probar teorías⁸².

SELECCIÓN DE MATERIALES

La selección de los materiales es un proceso importante en el desarrollo de cualquier producto ya que es de aquí de donde se obtendrán las propiedades base de los prototipos, mismas que determinarán en gran parte el éxito o fracaso de cualquier diseño.

Los materiales utilizados en esta tesis fueron seleccionados cuidadosamente tomando en cuenta sus características básicas, utilizando fuentes de información teóricas, así como fuentes experimentales realizadas por distintas instituciones, así como la facilidad de adquisición no únicamente a nivel local, sino a nivel regional en más de un país.

Se han seleccionado dos materiales básicos en la construcción del prototipo: Desperdicio de Bambú (*Guadua Angustifolia*, Odlhami) y Resina Epoxi B según las características que a continuación describo:

BAMBÚ

Guadua Angustifolia: Es una especie de bambú con origen Colombiano, que ha sido exportada lo largo del mundo, llegando a ser la especie de bambú con mayor producción en Latinoamérica y la más utilizada en la construcción artesanal. Se diferencia de otras especies porque tiene un mayor grosor en la pared del culmo, así como entre nudos más cercanos unos de otros, puede tener tramos rectos de hasta 25 metros por lo que se le ha dado el apodo de “bambú estructural” debido a sus características de resistencia, y tipo de crecimiento. Se utiliza actualmente como el soporte principal de estructuras de bambú en columnas, trabes, techumbres, y paneles. Durante este proceso de utilización, se produce una gran cantidad de desperdicio durante los cortes, algo similar al aserrín de madera, además de que un porcentaje muy alto de desperdicio proviene de la parte alta del bambú, pues a partir de los 11 metros de altura, en la

⁸² R Hernández Sampieri and P Baptista Lucio, *Metodología de La Investigación*, ed. by McGraw Hill, 4th Editio (Mexico, 2006).

sobrevasa, varillón y la copa de los bambúes es inutilizada en la construcción debido a sus características de geometría y diámetro.

Guadua Oldhami: Es una especie de bambú de origen chino, que ha sido exportado a todo el mundo, sin embargo, a diferencia de la especie *angustifolia*, este no crece en cualquier región. Se identifica porque puede llegar a medir hasta 16 metros, la pared de su culmo es delgada y el espacio entre nudos es más distante, por lo que se reconoce como una especie de uso semi-estructural. Tiene características físicas de mayor contenido de fibra que la especie *angustifolia*, y por lo mismo, su densidad o peso específico es mayor, y según algunas investigaciones ⁸³, puede tener mejor desempeño como material estructural. Actualmente se utiliza principalmente para la construcción de paneles, mediante la producción de esterilla, que es fijada posteriormente a una estructura de *Guadua Angustifolia*. Durante la producción de paneles, se genera mucho desperdicio de corte, que sumado a toda la sobrevasa, varillón y copa de los bambúes se genera una cantidad importante de desperdicio, que bien puede ser utilizada en la construcción a través de un material compuesto.

Se ha seleccionado utilizar ambas especies de bambú ya que tienen en común los siguientes aspectos:

- **Facilidad de Producción.** El bambú es una planta conocida mundialmente por la rapidez con la que crece, ya que puede alcanzar su altura máxima en poco más de 5 meses, aunque para poder utilizarla estructuralmente, debe de madurar, proceso que llega a tardar 4 años para la primer siembra a partir de la cual se pueden cortar tallos maduros cada año. Hay que destacar también que el bambú, es un tipo de pasto, por lo que su crecimiento no es únicamente vertical, sino que al sembrarlo puede reproducirse, y alcanzar a llenar hectáreas completas con la siembra de una sola planta, es por esto que existen lugares que incluso lo consideran una plaga.
- **Costo de Producción.** El costo de producción tanto monetario como energético es relativamente bajo al ser comparado con el costo que tiene el producir otros materiales constructivos actualmente utilizados como el acero o el concreto.
- **Ecológico.** El bambú es además de ser de rápido crecimiento, sirve como conservador y recuperador de los suelos, ya que sus raíces forman un tipo de red que amarra al suelo, evitando la erosión, y nutriéndolo con las hojas que forman una capa de material orgánico cuando caen.
- **Poco tratamiento.** La planta de bambú, es de poco o nulo tratamiento durante su crecimiento, si se sabe seleccionar el área de siembra. Idealmente para su óptimo crecimiento

⁸³ Hernández and Barragán.

requiere ser sembrado en tierra con profundidad mayor a 15-20cm en una zona húmeda o ser regado durante los primeros meses de desarrollo. Una vez cortado (en luna menguante para disminuir la cantidad de agua dentro del tallo), el tratamiento únicamente requiere de ser sumergido durante 5 días en una solución de pentaborato (100kg ácido bórico, 100kg bórax pentahidratado y 7.5kg de sulfato de cobre por cada 3600lts de agua). Para posteriormente ser escurrido durante 2 o 3 días al aire libre y finalmente secado en bodegas de almacenamiento para evitar que el sol las parta. Todo el tratamiento tiene el fin de evitar ataques biológicos.

- **Resistencia Mecánica.** El bambú tiene un excelente comportamiento mecánico, que ha sido evaluado en distintos artículos, llegando a tener resistencia máxima a la compresión de hasta $622\text{Kg}/\text{cm}^2$ para la especie *angustifolia*, y de $709\text{Kg}/\text{cm}^2$ para la especie *Oldhami*.⁸⁴
- **Facilidad de Adquisición.** El bambú es una especie que se puede producir en casi todo el mundo entre los paralelos del trópico de cáncer y el trópico de capricornio. Particularmente en México tiene una mayor producción en los estados de Oaxaca, Veracruz, Puebla, Jalisco, Chiapas, Campeche, Quintana Roo, Estado de México, Morelos, Guerrero y Nayarit.

En esta investigación se utilizarán dos diferentes especies de bambú que comparten características similares en tiempo de crecimiento, altura, mantenimiento y tratamiento (*guadua angustifolia* y *guadua oldhami*) obtenidas del **Rancho San Ricardo**, ubicado en **Acatlán de Pérez Figueroa, Oaxaca** a una altitud de 120mts sobre el nivel del mar. Se seleccionó este lugar de producción debido a que la materia prima es cosechada y tratada por ellos mismos con las características anteriormente descritas; sumado a que además de producirlo, lo aplican a sistemas constructivos diseñados en su taller, proceso en el cual se genera un desperdicio, consistente en aquellas piezas que no tienen las características de forma, tamaño o color necesarios para aplicarlo en construcción, y por tanto ellos utilizan como abono, para la fabricación de artesanías, o simplemente lo desechan. Todas estas partes de las dos especies no utilizadas, serán sometidas a una trituradora, con la intención de homogeneizar el tamaño de partícula y posteriormente ser utilizadas en el material compuesto. Toda la información de cultivo y tratamiento fue provista a través de las siguientes personas, a quienes aprovecho para agradecer el apoyo:

Ingeniero Agroforestal JUDITH CASTILLO CORTEZ, Coordinadora proyecto agroforestal, Rancho San Ricardo.

Ingeniero Industrial JOSE GARCIA SOLANO, Coordinador proyecto bambú, Rancho San Ricardo.

⁸⁴ Hernández and Barragán.

RESINA EPOXI

Es necesario para poder realizar un prototipo prefabricado de bambú encontrar algún material que posea propiedades únicas que faciliten el aglomerado sin disminuir las propiedades mecánicas, ayudando a resistir las inclemencias climatológicas que puedan atacar al bambú, sirviendo así, como la matriz del material compuesto.

Se seleccionó una resina epoxi, que se distingue por sus características útiles aplicables al tema, ya que es un tipo de polímero termofijo, con una gran resistencia a químicos, buena resistencia mecánica, fuerza de adherencia útil para aglomerar al bambú, además de reaccionar químicamente con la materia orgánica del bambú, con lo que se producen enlaces de tipo iónico entre los grupos fenoles de la resina y los grupos hidroxilos de la materia orgánica. Todo en conjunto va determinar las propiedades finales de la mezcla, que una vez lograda, podrá garantizar la resistencia final de nuestro prototipo. Se utilizará una Resina Epoxi Marca Quintum Modelo Q101R conocida comercialmente como Q1, la menos viscosa de la serie de resinas, y por tanto más fácil de mezclar. Para utilizarse, se mezcla en relación 1:0.3 de resina-catalizador.

	Resina	Catalizador	Mezcla
Densidad	1.14 g/cm ³	0.98 g/cm ³	1.09 g/cm ³
Viscosidad	700 cP	650 cP	680 cP
Punto de inflamabilidad	140 °C	115 °C	120 °C
Resistencia a la compresión		700 – 900 kg/cm ²	
Dureza shore D		> 80	

El proceso a llevar a cabo durante la experimentación está dividido en dos etapas definidas según el avance de la investigación misma; la primera etapa constituye la etapa de muestreos con diferentes proporciones de resina y tamaños de partícula, que tiene por objetivo determinar la relación ideal entre desperdicio de bambú y la menor cantidad de resina epoxi posible, descartando todas aquellas variables que no produzcan un resultado adecuado para las normas mexicanas de bloques no estructurales; Durante la segunda etapa se evalúan las propiedades mecánicas y deteriorativas de la mezcla que haya resultado con un mejor comportamiento mecánico durante el muestreo. En ambos casos se seguirán normas internacionales que respalden cada uno de las pruebas realizadas.

VARIABLES

Se limitarán las variables a una matriz que muestre las diferentes combinaciones con las variables independientes con lo cual se obtendrá el mejor diseño de mezcla para realizar el prototipo de block. La variable dependiente a medir consiste en la resistencia mecánica a esfuerzos de compresión la cual fue determinada por la función siguiendo las normas mexicanas para bloques no estructurales⁸⁵.

Variables Independientes:

- Tamaño del Tamizado de las fibras.
 - Malla No. 30 (tamaño de partícula de 0.597mm)
 - Malla No. 50 (tamaño de partícula de 0.297mm)
- Determina el porcentaje máximo posible a utilizar de fibra.
 - Relación 1:1 de bambú-resina medido en peso
 - Relación 1:0.75 de bambú-resina medido en peso
 - Relación 1:0.5 de bambú-resina medido en peso
 - Relación 1:0.25 de bambú-resina medido en peso

Variable Dependiente

- Resistencia a esfuerzos de compresión,

1ª ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

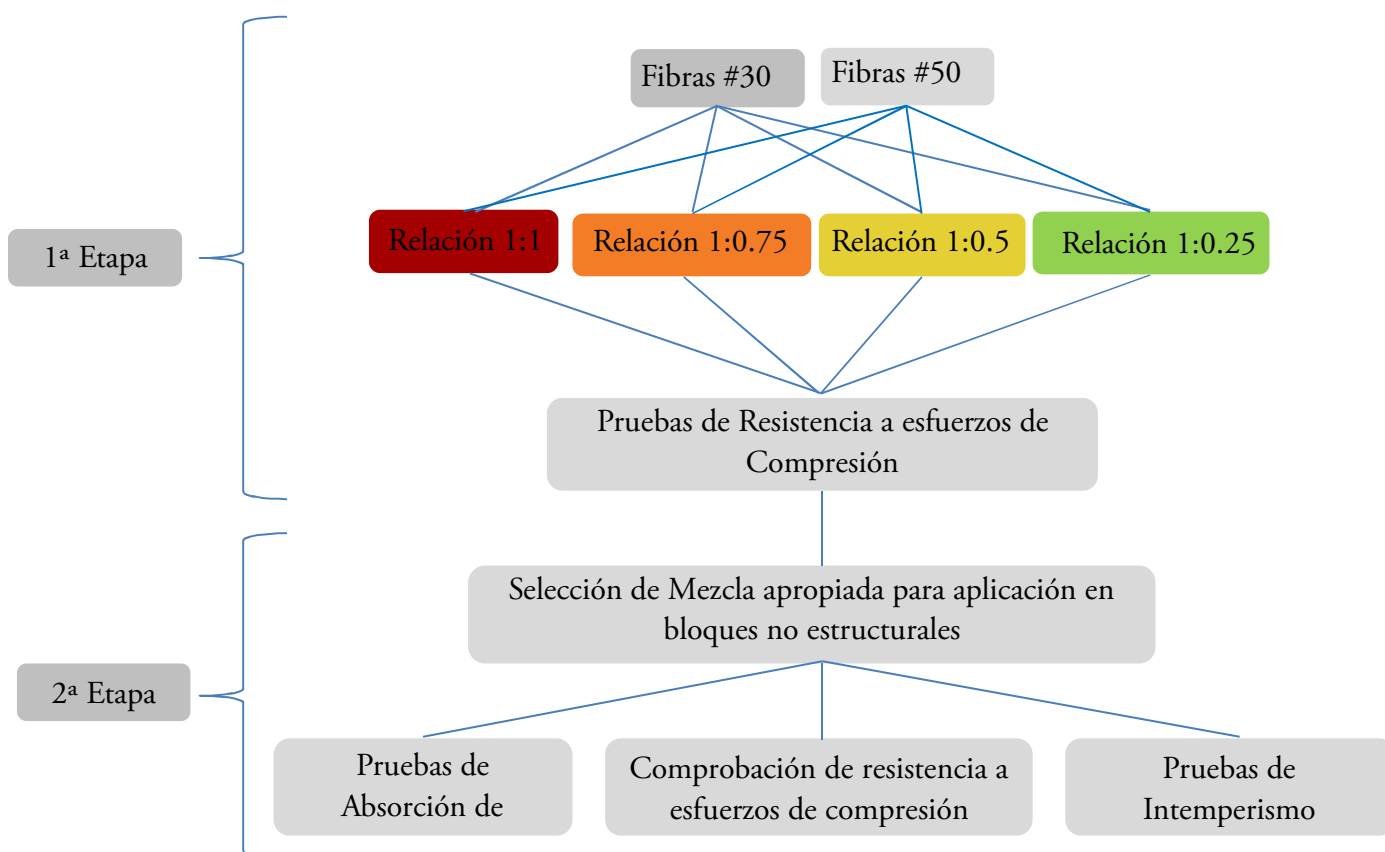
En esta primera etapa se realizó un muestreo con base en una matriz combinatoria de dos diferentes tamaños de partículas, tamizadas con una malla #30 (partículas de 0.595mm) y #50 (partículas de 0.297mm) y mezcladas con diferentes proporciones de resina medido en peso: 1:1, 1:0.75, 1:0.5, 1:0.25, de desperdicio de bambú y resina respectivamente. Las pruebas se llevaron a cabo mediante un proceso combinatorio de todas las variables (tamaños de fibra y proporción de mezcla) a partir del cual se evaluaron sus propiedades de resistencia a esfuerzos de compresión según normas internacionales para prueba de materiales⁸⁶. Cada variable fue probada mediante la elaboración de 4 probetas de ensayo, de las cuales se utilizaron 3 para determinar las propiedades mecánicas.

⁸⁵ ONNCCE, 'NMX-C-441-ONNCCE-2005. Industria de La Construcción-Bloques, Tabiques O Ladrillos Y Tabicones Para Uso No Estructural-Especificaciones', 2005.

⁸⁶ ASTM international, 'Compressive Properties of Rigid Plastics', *Technology*, 2002.

2ª ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

En esta 2ª etapa se seleccionará la mezcla que mejor se desempeñe durante la primer etapa de experimentación, para ser probada nuevamente por resistencia a esfuerzos de compresión, se aumentarán las pruebas de absorción de humedad⁸⁷ e intemperismo acelerado⁸⁸, de manera que se pueda comprobar que el material propuesto puede ser utilizado en la industria de la construcción a través de bloques no estructurales. Se realizaron 10 probetas para el análisis de propiedades mecánicas esfuerzos de compresión de las cuales se utilizaron 8 para la determinación de propiedades, 5 probetas para el análisis de absorción de humedad y 5 probetas para el análisis de intemperismo acelerado. En el siguiente diagrama simplifico el proceso experimental que se llevó a cabo durante la investigación.



Finalmente la aplicación del material se hará a través de un bloque no estructural que cumpla con los requisitos mínimos según normas mexicanas⁸⁹.

⁸⁷ ASTM International, 'Standard Test Method for Water Absorption of Plastics', *ASTM International*, 16 (1998), 1–4 <<https://doi.org/10.1520/D0570-98>>.

⁸⁸ ASTM international, 'Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials', *Technology*, 2000, 1–9 <<https://doi.org/10.1520/G0154-06.2>>.

⁸⁹ ONNCCE.

NORMATIVA Y EQUIPO

RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN.

Resistencia a los esfuerzos de compresión. Se realizarán las pruebas según la norma “ASTM D 695 – 02a”⁹⁰ que lleva por título “Método de prueba estándar para propiedades compresivas de plásticos rígidos”. Se seleccionó esta norma debido a las características del material: un material compuesto con base en una matriz polimérica termoestable (resina epoxi) y un refuerzo de partículas (bambú).

La norma marca un método de prueba que cubre el análisis de las propiedades mecánicas de los plásticos rígidos reforzados y no reforzados, que se someten a esfuerzos de compresión a velocidades uniformes relativamente bajas de esfuerzo o carga. Se emplean probetas de forma estándar con relación 1x1x2 dispuestas al centro de la máquina de compresión quien efectuará la carga a una velocidad de 1.3 mm/min. En esta prueba se puede calcular el esfuerzo máximo que resiste un material.

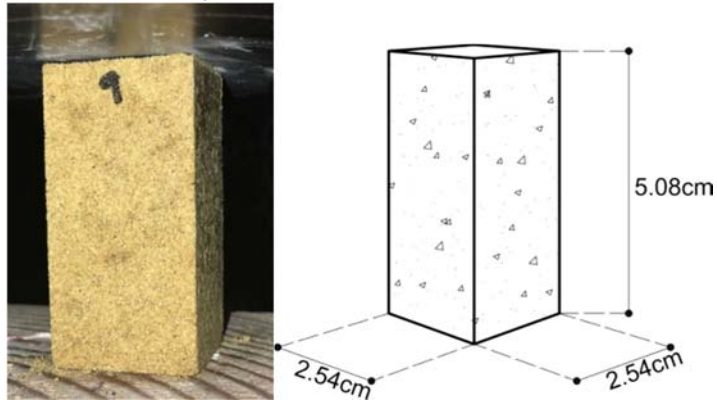
Para que se considere válida la prueba deben de ser reportados y considerados los siguientes aspectos:

Identificación del material probado, incluida el origen, el tipo, manufactura hecha, forma, dimensiones, historia previa, Método de preparación del espécimen, Condiciones atmosféricas de la sala de pruebas, El número de muestras probadas, Velocidad de la máquina durante la prueba, Resistencia máxima a la compresión, con promedio de las muestras y desviación estándar, Límite de la zona elástica con promedio, y desviación estándar, Módulo de elasticidad a la compresión con valor promedio, y desviación estándar, Fecha de la muestra y fecha del método utilizado para las pruebas. Se deben de realizar un mínimo de 5 muestras para materiales isotrópicos.

⁹⁰ ASTM international, ‘Compressive Properties of Rigid Plastics’.

Tipo de Probetas	Prismas rectangulares de 2.54x2.54mm de base y 50.8mm de altura
Cantidad de Probetas	4 pruebas durante muestreos. 10 probetas para la mezcla final
Velocidad de Prueba	1.3mm/minuto
Nomenclatura de Muestreo	0.5_30_4 (Relación de mezcla_tamaño de fibra_número de probeta)
Valores a obtener de la prueba	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²) Módulo de elasticidad (kg/cm ²) Límite elástico (kg/cm ²) Punto de fluencia Diagrama Esfuerzo-Deformación
Valores de Referencia	Según Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2005 el esfuerzo mínimo permitido es de 35kg/cm ² para bloques y tabicones

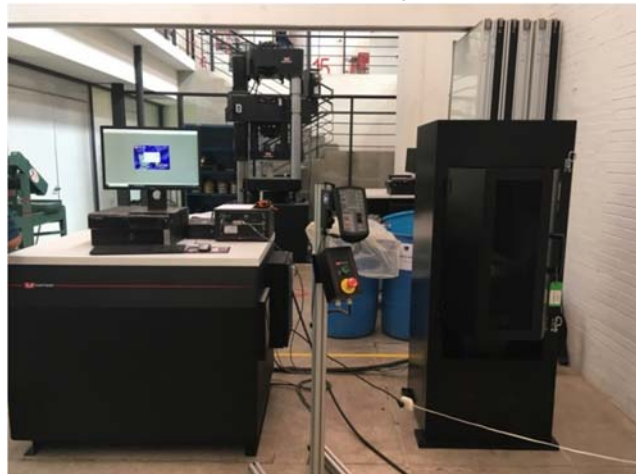
Probetas



EQUIPO NECESARIO

Equipo	Máquina de Ensayos a compresión con pc
Marca	Instron
Modelo	Serie RD-400RD
Descripción	Equipo para pruebas de compresión que funciona con un sistema de bombeo hidráulico
Capacidad Máxima	2,000Kn (203,000kgf)
ID Calibración	400RDB14248
Fecha de vencimiento de calibración	22-nov-18
Ubicación	LMSE, Facultad de Arquitectura, UNAM.
Técnico de laboratorio	M. en Arq. Sofía B. Vargas López

Equipo



ABSORCIÓN DE HUMEDAD

Se utilizará un método de análisis internacional mediante la norma ASTM D570⁹¹ “Método de prueba estándar para la medición de absorción de agua en plásticos.” Para la ejecución de esta prueba se requiere de una balanza con exactitud a 0.0001g; y un horno capaz de mantener temperaturas uniformes de entre 50+3°C. La probeta de la prueba consiste en realizar un disco de 50.8mm en diámetro, y 3.2mm en grosor, con una variación de +- 0.30mm.

El proceso consiste en secar durante 24 hrs en un horno a temperatura constante de 50+3°C, y enfriado en un desecador; pesado inmediatamente.

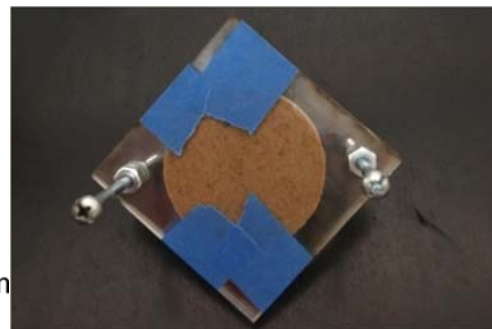
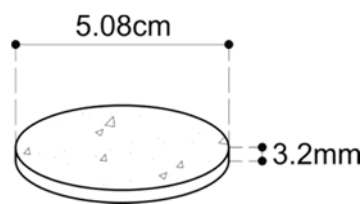
Una vez pesado el espécimen, se procederá a sumergir durante dos horas +-4min en agua destilada a una temperatura de 23+-1°C, descansado sobre uno de los lados, y totalmente sumergido.

Finalmente se reportan los siguientes datos para que la prueba se califique como correcta:

Dimensiones antes de la prueba, Condiciones de tiempo y temperatura, El método de inmersión utilizado, Tiempo de Inmersión, Porcentaje en peso aumentado durante la inmersión calculado según la norma, Porcentaje de material soluble en agua perdido durante la inmersión según la norma, El porcentaje de agua absorbido calculado según la norma, Observaciones visibles en cuanto al cambio del material. Se deben de utilizar al menos 3 muestras.

Tipo de Probetas	Prismas cilíndricos de 50.8mm de diámetro y 3.2mm de altura
Cantidad de Probetas	10 probetas para la mezcla final
Descripción de la prueba	Secado durante 24 horas a 50°C. Enfriado dentro de un desecador. Se pesa antes de secar, después del secado. Sumergir totalmente en agua destilada durante dos horas. Pesar después de ser sumergido.
Nomenclatura de Muestreo	1-10 únicamente para diseño de mezcla final
Valores a obtener de la prueba	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad previa • Porcentaje de agua absorbido
Valores de Referencia	Según Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2005 el máximo permitido es de 27% para bloques y tabicones

Probeta



⁹¹ ASTM International.

EQUIPO NECESARIO

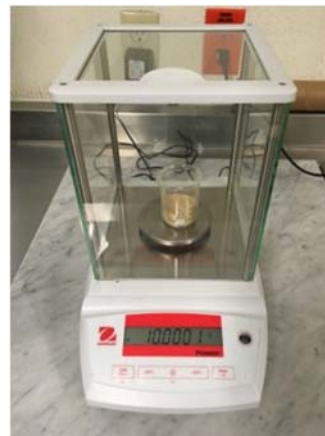
Equipo	Mufla
Marca	Felisa
Modelo	FE-340
Descripción	Equipo eléctrico con capacidad de mantener temperaturas constantes de entre 50 y 1100°C
Capacidad Máxima	1100°C
ID Calibración	-
Fecha de calibración	21-octubre-2013
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, UNAM.
Contacto laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos


Equipo



Equipo	Báscula
Marca	Ohaus
Modelo	Pioneer PA-214
Descripción	Báscula de precisión hasta 0.0001g
Capacidad Máxima	210g
Calibración	Externa con pesa de 200g calibrada
Fecha de calibración	-
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos

Equipo



Equipo	Desecadora
Descripción	Recipiente de cristal utilizado para colocar probetas calientes que recién salidas de la mufla se encuentran en un estado totalmente seco, y en este recipiente se evita la absorción de humedad del ambiente en lo que se enfrían para pesarse.
Ubicación Contacto laboratorio	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM. Dra. En Arq. Ilse García Villalobos
Equipo	 A photograph showing a glass desiccator dish with a lid, placed on a stainless steel surface. The dish is empty and appears to be used for drying samples.

INTEMPERISMO

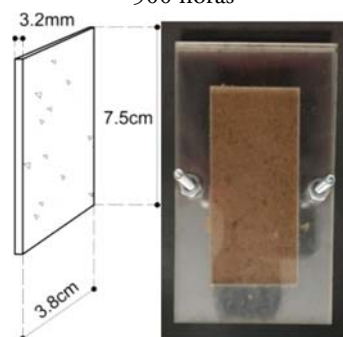
El procedimiento a seguir, consiste en medir los efectos que se producen sobre las probetas al ser expuestas a condiciones climáticas variables de radiación, humedad y calor. Se utiliza una cámara de ensayo QUV que tiene lámparas fluorescentes que proporcionan la radiación ultravioleta en el rango del espectro requerido por la prueba. El control sobre la cámara de intemperismo está sustentado en la norma ASTM G-154⁹² (práctica estándar para funcionamiento fluorescente ultravioleta UV. Aparato de la lámpara para exposición de materiales no metálicos). Dicha norma establece recomendaciones como para determinar el ciclo a utilizar. Para el caso del experimento, se utilizará el ciclo número 6 establecido en la norma, que tiene la característica de ser un ciclo especial de alta exposición para plásticos:

Ciclo	Tipo de Lámpara	Irradiación	Frecuencia de Onda	Ciclo de Exposición
6	UVA-340	1.35 W/m ² /nm	340 nm	8 h UV a 60 (+/-3) °C Temperatura de panel negro 4 h de Condensación a 50 (+/-3) °C Temperatura de panel negro.

El objetivo de este procedimiento es el de comparar las probetas previo y posterior a la exposición de rayos UV y temperatura, de forma que puedan establecerse los cambios provocados por dicha exposición. En esta investigación se analizarán cambios en color, peso y volumen.

Tipo de Probetas	Prismas rectangulares de 75.0x38.0mm de en la base y 7mm de espesor
Cantidad de Probetas	10 probetas para la mezcla final
Descripción de la prueba	Consiste en exponer a condiciones climáticas variables de radiación, humedad y calor a la probeta de ensayo. Se utilizó el ciclo número 6 establecido en la norma, que tiene la característica de ser un ciclo especial de alta exposición para plásticos
Nomenclatura de Muestreo	1-10 únicamente para diseño de mezcla final
Valores a obtener de la prueba	Cambios en el volumen Cambios en el color Cambios en el peso
Tiempo d exposición	500 horas

Probetas




⁹² ASTM international, 'Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials'.

EQUIPO NECESARIO

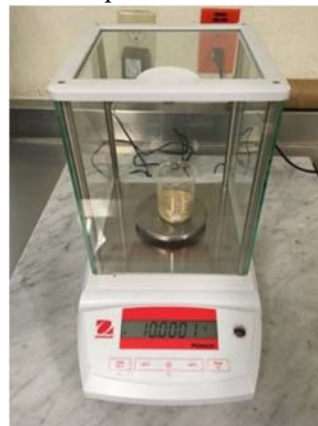
Equipo	Microscopio estereoscópico con cámara Motic
Marca	Motic
Modelo	SMZ-171
Descripción	Equipo que permite visualizar con un aumento de hasta 50x muestras preparadas de cualquier origen. Se utilizarán las probetas de intemperismo acelerado marcadas en una zona para comparar el área antes y después de ser sometida a la exposición de la cámara
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto de laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos
Imagen	

Equipo	Máquina de Intemperismo acelerado
Marca	Q-Lab
Modelo	QUV/Spray
Descripción	Equipo que permite imitar el comportamiento de la atmosfera en exteriores considerando radiación UV, humedad y temperatura, mediante ciclos controlados
ID del equipo	14-3052-84-SPRAY-RP
Calibración	Según normas ISO
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto de laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos
Equipo	

Equipo	Tablas de Munsell
Tipo	Tablas de suelo
Descripción	Equipo que permite comparar colores con un estándar aprobado de gama de tonos conocido como tablas de Munsell
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto de laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos
Imagen	
Probetas	9 Probetas de 7.5x3.8centímetros. Con un área marcada para comparar la misma zona antes y después de la exposición a rayos Uv, humedad y temperatura.

Equipo	Báscula
Marca	Ohaus
Modelo	Pioneer PA-214
Descripción	Báscula de precisión hasta 0.0001g
Capacidad Máxima	210g
Calibración	Externa con pesa de 200g calibrada
Fecha de calibración	-
Ubicación	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto laboratorio	Dra. En Arq. Ilse García Villalobos

Equipo



NORMAS MEXICANAS PARA BLOQUES NO ESTRUCTURALES

Estas normas se utilizan principalmente como referencia sobre los requisitos mínimos que deben ser alcanzados por el material para poder ser aplicado a través de bloques no estructurales.

Se utiliza la norma mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2005⁹³ “Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural-especificaciones” como parámetros de referencia para el diseño del prototipo. En dicha norma se establece que los blocks NO estructurales tienen la finalidad de servir como muros de relleno, de revestimiento, interiores, exteriores, o cualquier otro uso NO estructural, y que pueden estar fabricados en concreto, cerámica de barro, arcilla, o cualquier otro material para uso NO estructural.

La clasificación de blocks según la norma, se basa en 3 condiciones: Tipo de pieza, material, y forma. Aplicado al proyecto resultará como a continuación:

Tipo de pieza: bloque hueco. Se define como: Componente de forma prismática que se obtiene por moldeo del concreto y/o de otros materiales. Es hueco cuando las perforaciones perpendiculares mayores a las caras mayores están entre 25 y 50% del área total de la pieza, donde las paredes interiores y exteriores no deben ser menores a 8mm.

Material: Material compuesto con alto contenido de desperdicio de fibra de bambú como fase dispersa dentro de una matriz de resina epoxi. Clasificado en la norma como otros.

Forma: Rectangular

Para cumplir con la norma, se deben de seguir las especificaciones de las siguientes condiciones:

Dimensiones: Mínimo (largo-ancho-altura) 30, 10, 10.

Máximo (largo-ancho-altura): +30, 30, 30.

Resistencia a la compresión: Promedio mínimo de 5 piezas (bloques y tabicones): 35kg/cm²

Resistencia mínima individual: 30kg/cm²

Absorción de Agua: promedio máxima de 5 piezas (bloques y tabicones): 25%

Absorción máxima individual: 27%

⁹³ ONNCCE.

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PROBETAS

Resumiré el proceso de producción de las probetas a través de la siguiente tabla:

Proceso	Descripción	Imagen
Obtención de Materia Prima	Se viajó al Rancho San Ricardo, ubicado en Acatlán de Pérez Figueroa, Oaxaca a una altitud de 120mts sobre el nivel del mar, para la obtención de la materia prima: desperdicio de bambú.	
Corte de Bambú	Debido a la carencia de una trituradora del tamaño adecuado, fue necesario reducir el tamaño de las piezas para poder triturarlo en una trituradora de menor tamaño. Se utilizó una cortadora de mesa Marca Truper modelo SME-10, con una potencia de 2.2HP. Ubicado en el laboratorio de materiales y sistemas estructurales se utiliza para disminuir el tamaño del bambú para posteriormente poder triturar.	
Trituración	Se utilizó una Trituradora Marca Waring, modelo Blender HGBSS, con una potencia de 1.5HP. Ubicado en el Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural de la unidad de posgrado de la UNAM, se utiliza para hacer polvo el bambú.	

Tamizado

Se utilizaron Tamices Marca Tyler, con malla, 16, 30, y 50 Para separar los diferentes tamaños de fibra de bambú. Ubicados en el Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, y laboratorio de materiales y sistemas estructurales.



Creación de Mezcla

La creación de la mezcla fue hecha artesanalmente en pequeño moldes mediante una mezcla manual hasta tener una mezcla uniforme. Se utilizaron como base 50gramos de bambú y dependiendo de la relación de resina, se utilizó una cantidad proporcional según la proporción:

- 1:1 50gr bambú-50gr resina +15gr de catalizador
- 1:0.75 50gr bambú-38gr resina +11gr de catalizador
- 1:0.5 50gr bambú-25gr resina +8gr de catalizador
- 1:0.25 50gr bambú-13gr resina +4gr de catalizador

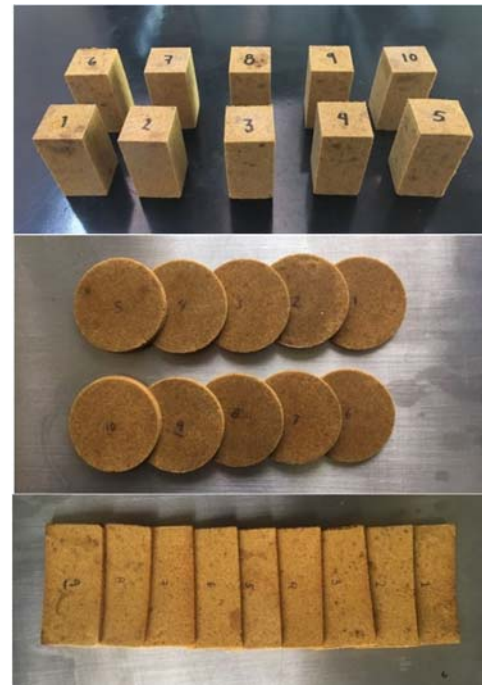
Se realizaron 4 probetas durante el muestreo para cada tamaño de partícula por cada relación de resina-matriz.

Se realizaron 10 probetas de comprobación para la mezcla final seleccionada.



Fabricación de probetas

A través de moldes fabricados en acrílico con las medidas establecidas por las normas, se fabricaron las probetas específicas para cada tipo de prueba. Imagen en orden de superior a inferior de probetas de compresión, absorción de humedad e intemperismo acelerado.



ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

RELACIÓN 1:1 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA

Se realizó una prueba preliminar con un muestreo de probetas con una fibra más grande, tamizada con la malla #16, o de un máximo de 1.19mm mezcladas con resina epoxi en una relación 1:1 medida en peso, con el objetivo de analizar la posibilidad de utilizar una fibra de mayor tamaño en relación a las otras. Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, y estos son los resultados.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #16

Tamaño de Fibra	Mediciones	Relación 1-1				Promedio	Máximo	Mínimo
		1	2	3	4			
#16	Peso (g)	24.20	23.30	25.50	23.80	24.20	25.50	23.30
	Tamaño Inicial (mm)	57.50	53.50	57.80	57.40	56.55	57.80	53.50
	Tamaño Final (mm)	50.90	34.60	50.80	46.20	45.63	50.90	34.60
	Desplazamiento (mm)	6.60	18.90	7.00	11.20	10.93	18.90	6.60
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	60.31	79.05	75.95	67.58	70.72	79.05	60.31
	Carga Máxima (kg)	389.00	509.87	489.88	435.89	456.16	509.87	389.00
	Límite elástico (kg/cm ²)	16.43	34.57	31.47	22.01	26.12	34.57	16.43

Tabla de resultados relación 1:1 partículas tamizadas con malla #16

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO



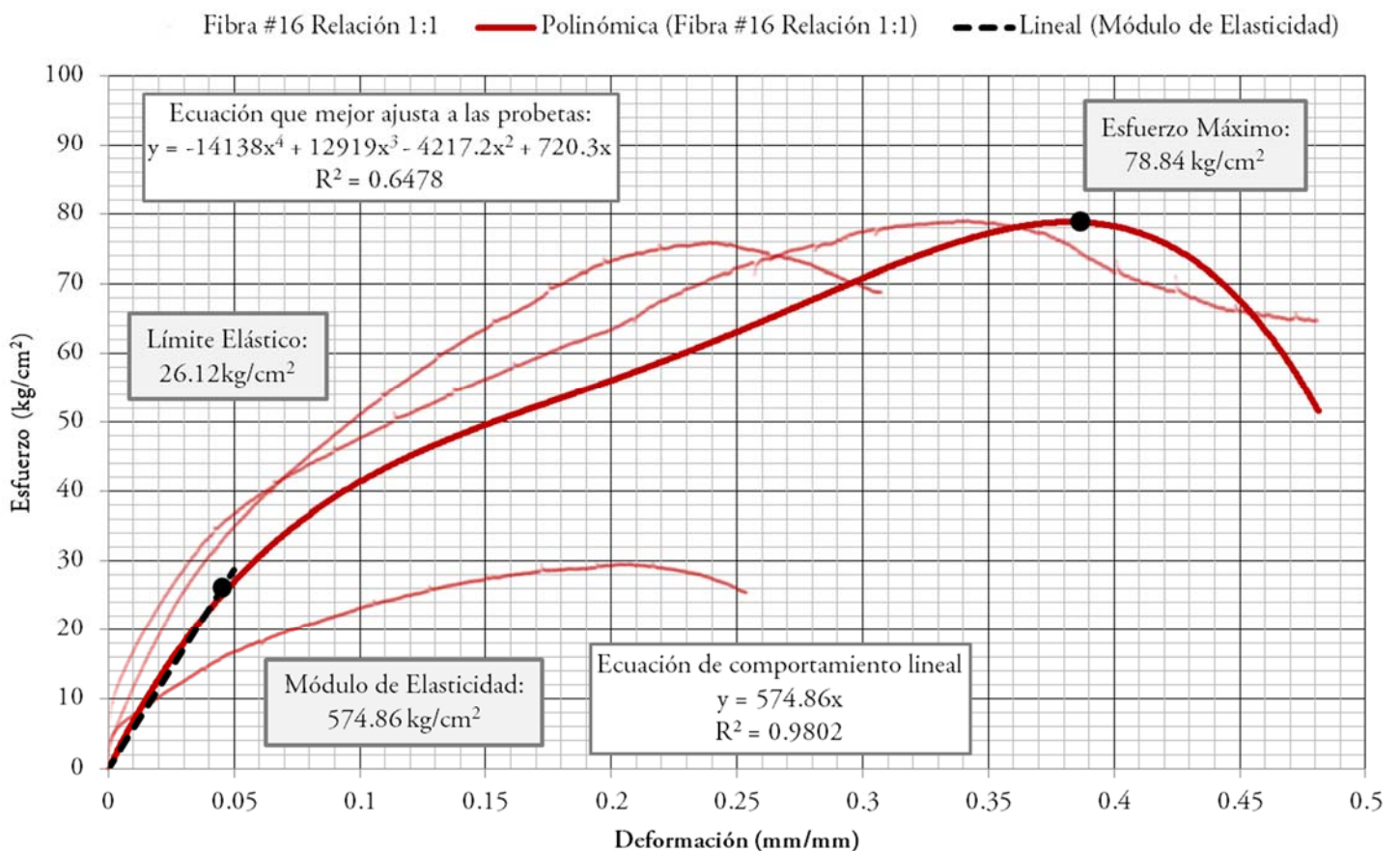
Imagen de probetas de relación 1:1, fibra tamizadas con la malla #16. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #2.

Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #2, 3, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo A- Las probetas con una tamaño de fibra grande (malla #16) para la relación 1:1 de bambú resina sufren de una destrucción de tipo plástica/aplastamiento, ya que presentan una falla de pandeo global, lo que significa que transmitieron el esfuerzo satisfactoriamente a todas las fibras mientras había un reacomodo interno del material. Se observó una deformación ponderada superior al 0.45 y un promedio de esfuerzo máximo de 78.84 kg/cm^2 . La prueba de esta primera etapa preliminar de muestreo, se detuvo cuando la resistencia decayó un 10% con respecto a la resistencia máxima alcanzada.

En color rojo suave, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color rojo intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #16 Relación 1:1



De ésta gráfica se observa que el límite elástico (calculado mediante datos obtenidos gráficamente) es de 26.12 kg/cm^2 , por lo que se define como un material con un comportamiento dúctil con un

comportamiento plástico que tiende al reacomodo constante de fibras, favoreciendo el aumento de la resistencia máxima, a costa de una deformación constante. Este comportamiento queda claro al ver la fotografía de la probeta ejemplo A destruida por aplastamiento. Se observa que el material tiene un módulo de elasticidad de 574.86 kg/cm².

Esta variable, no es apta para el propósito de la investigación, ya que a pesar de tener un esfuerzo máximo superior a los requisitos de la norma mexicana para bloques no estructurales⁹⁴, su comportamiento dúctil, y su límite elástico son insuficientes para un bloque, ya que se busca que el límite elástico del material, sea superior a los requisitos establecidos por la norma.

A partir del análisis de esta variable, se concluye que el utilizar fibras de mayor tamaño, influye en la deformación por reacomodo de fibras en el espacio entre las mismas, razón por la cual se decide no seguir adelante con fibras de tamaño superior a las previamente propuestas.

⁹⁴ ONNCCE.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #30 o partículas menores a un tamaño de 0.595mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:1 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

Tamaño de Fibra	Mediciones	Relación 1-1				Promedio	Máximo	Mínimo
		1	2	3	4			
#30	Peso (g)	27.70	28.30	25.00	26.00	26.75	28.30	25.00
	Tamaño Inicial (mm)	55.10	55.50	54.50	55.00	55.03	55.50	54.50
	Tamaño Final (mm)	48.40	47.90	46.90	47.50	47.68	48.40	46.90
	Desplazamiento (mm)	6.70	7.60	7.60	7.50	7.35	7.60	6.70
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	76.89	93.31	92.85	73.94	84.25	93.31	73.94
	Carga Máxima (kg)	495.94	601.85	598.88	476.91	543.40	601.85	476.91
	Límite elástico (kg/cm ²)	23.87	50.84	58.28	37.67	42.67	58.28	23.87

Tabla de resultados relación 1:1 partículas tamizadas con malla #30

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO



Imagen de probetas de relación 1:1, fibra tamizadas con la malla #30. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #3.

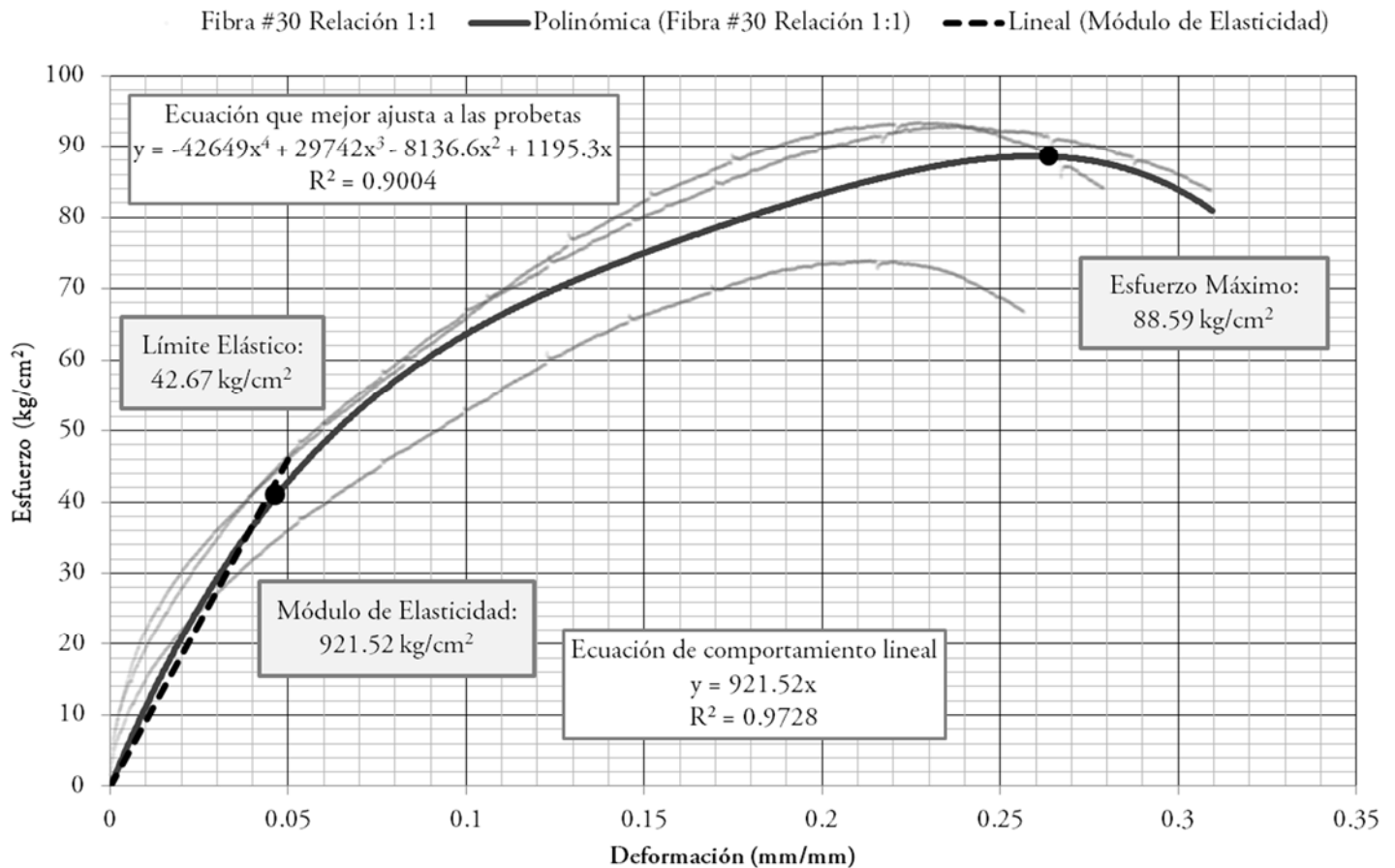
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #2, 3, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo B- Las probetas con una tamaño de fibra mediano (malla #30) para la relación 1:1 sufren de una destrucción de tipo plástica por aplastamiento, ya que presentan una falla de pandeo global, lo que se traduce en que transmitieron el esfuerzo satisfactoriamente a todas las fibras mientras internamente en el

material había un reacomodo. Se observó una deformación superior al 0.30 y un promedio de esfuerzo máximo de 88.59kg/cm².

En color gris, observamos la gráfica de cada probeta mencionada, y en color negro, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #30 Relación 1:1



De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo dúctil. El límite elástico es de 42.67 kg/cm² lo que es suficiente para el propósito de la investigación, al igual que el esfuerzo máximo superior a los 88 kg/cm². La resistencia máxima aumenta a medida que la deformación lo hace, lo que nos indica que existe un reacomodo interno de fibras durante la prueba. Las probetas fallaron por aplastamiento como se observa como en el ejemplo B, presentando un pandeo global, lo que también es un indicador de que los esfuerzos fueron satisfactoriamente transmitidos desde la parte superior a la inferior de la probeta. Se concluye de esta relación que es suficientemente resistente tanto en el límite elástico como en el esfuerzo máximo, como para ser utilizada en bloques no estructurales.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #50 o partículas menores a un tamaño de 0.297mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:1 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

Tamaño de Fibra	Mediciones	Relación 1-1				Promedio	Máximo	Mínimo
		1	2	3	4			
#50	Peso (g)	30.00	30.10	29.80	28.30	29.55	30.10	28.30
	Tamaño Inicial (mm)	54.50	54.90	54.70	53.60	54.43	54.90	53.60
	Tamaño Final (mm)	50.02	50.04	50.20	48.20	49.62	50.20	48.20
	Desplazamiento (mm)	4.48	4.86	4.50	5.40	4.81	5.40	4.48
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	56.59	64.02	61.69	68.67	62.74	68.67	56.59
	Carga Máxima (kg)	365.01	412.93	397.90	442.92	404.69	442.92	365.01
	Límite elástico (kg/cm ²)	7.13	30.07	31.93	41.08	27.55	41.08	7.13

Tabla de resultados relación 1:1 partículas tamizadas con malla #50

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO



Imagen de probetas de relación 1:1, fibra tamizadas con la malla #50. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #2.

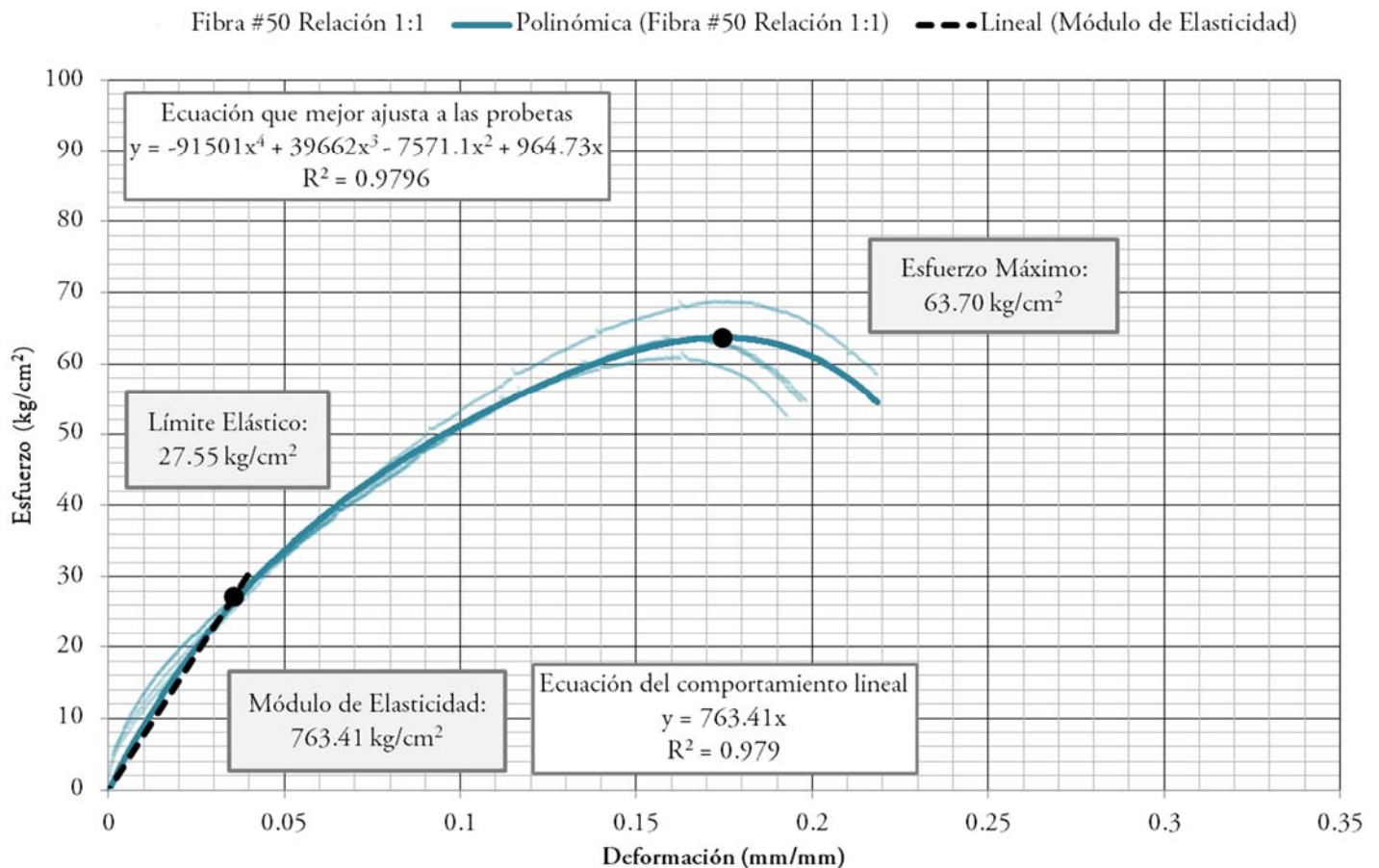
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #2, 3, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo C- Las probetas con una tamaño de fibra pequeño (malla #50) para la relación 1:1 sufren una destrucción de tipo frágil, ya que presentan una falla por cortante (grieta en diagonal), lo que significa que el esfuerzo fue transmitido satisfactoriamente hasta haberse acomodado las fibras internas

comprobado por la compactación de la probeta, hasta llegar a un punto donde no se podía más, momento donde se presenta una falla por cortante (grieta en diagonal). Se observó una deformación apenas superior al 0.20 y un promedio de esfuerzo máximo de 63.70 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 27.55 kg/cm^2 .

En azul claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color azul rey, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #50 Relación 1:1

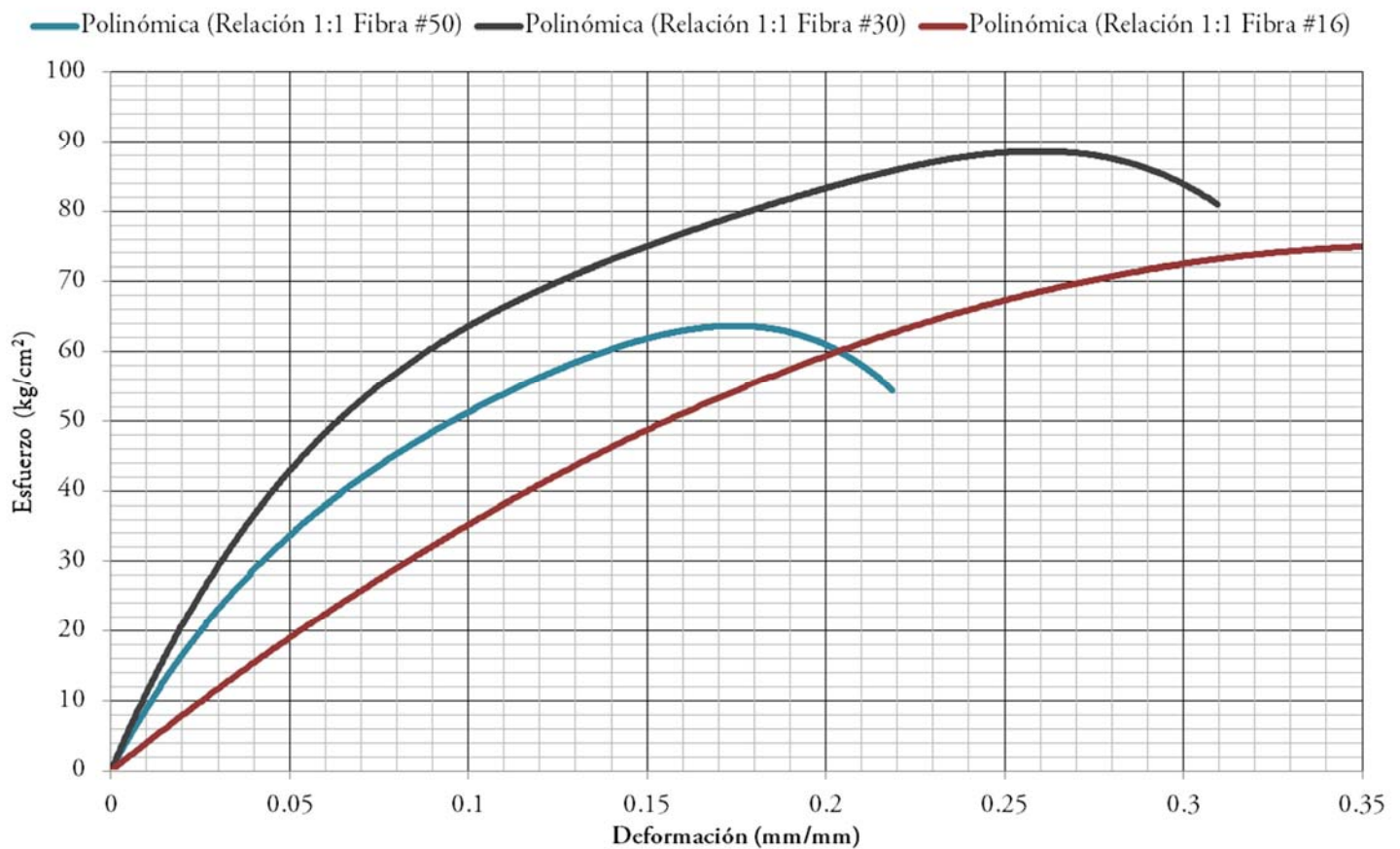


De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo dúctil, mostrando una deformación constante superior al 0.20. Esto se traduce como un reacomodo de fibras que ocurre durante toda la prueba por lo que la resistencia máxima es alcanzada cuando estas ya no tienen más como acomodarse, punto donde comienza la falla por cortante sin existir un pandeo en la probeta.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:1

Comparando los resultados obtenidos de la relación 1:1 de bambú-resina se puede concluir que el comportamiento del material va a ser dúctil. El utilizar un tamaño de partícula menor influye en el comportamiento del material ya que como vemos en la gráfica, mientras menor es el tamaño de partícula, la resistencia máxima se alcanza con una deformación menor, esto se debe al poco espacio para el reacondicionamiento interno del material, lo que favorece un comportamiento deseable para la aplicación del material en bloques no estructurales. A partir de este punto se decide descartar a las partículas de mayor tamaño, debido al comportamiento plástico que mostraron siendo tan deformables, incluso cuando superaban la resistencia máxima que se requiere para bloques no estructurales, su límite elástico fue inferior a lo requerido. Esta conclusión coincide con lo revisado anteriormente en el capítulo de materiales compuestos. Se continúan las pruebas con las siguientes relaciones utilizando las partículas tamizadas con la malla #30 y #50.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Relación 1:1



Esfuerzo-deformación de relación 1:1 partículas tamizadas con malla #16, partículas tamizadas con malla #30 y partículas tamizadas con malla #50.

Las pruebas se detuvieron cuando la resistencia máxima decayó el 10%. Aquí la tabla resumen de datos obtenidos resultantes del análisis de todas las probetas de cada variable de la relación 1:1.

Relación 1:1					
Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Fibras #16	$y = -14138x^4 + 12919x^3 - 4217.2x^2 + 720.3x$	$y = 574.86x$	78.84	26.12	574.86
Fibras #30	$y = -42649x^4 + 29742x^3 - 8136.6x^2 + 1195.3x$	$y = 921.52x$	88.59	42.67	921.52
Fibras #50	$y = -91501x^4 + 39662x^3 - 7571.1x^2 + 964.73x$	$y = 763.41x$	63.7	27.55	763.41

Tabla de resultados relación 1:1 partículas tamizadas con malla #16, #30 y #50

En la gráfica y en la tabla se observa que la deformación del material va a estar influenciada por el tamaño de fibra que se utilice, siendo el comportamiento más acorde a la aplicación solicitada, el mostrado por la fibra #50, ya que a pesar de tener un límite elástico débil, fue la variable que alcanzó su resistencia máxima en la menor deformación. Si bien es el comportamiento más acorde, es importante destacar que la única variable en mostrar el límite elástico mínimo para ser utilizado en bloques no estructurales es la probeta de fibras #30, cuyo límite es de 42.67kg/cm². Todas las variables tienen un módulo elástico menor al millar, lo que indica que todos son materiales dúctiles, un comportamiento no ideal para bloques no estructurales.

..

RELACIÓN 1:0.75 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #30 o partículas menores a un tamaño de 0.595mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.75 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

		Relación 0.75-1						
Tamaño de Fibra	Mediciones	1	2	3	4	Promedio	Máximo	Mínimo
#30	Peso (g)	25.00	24.00	24.00	25.00	24.50	25.00	24.00
	Tamaño Inicial (mm)	58.50	56.60	57.60	56.50	57.30	58.50	56.50
	Tamaño Final (mm)	51.10	50.50	51.10	49.00	50.43	51.10	49.00
	Desplazamiento (mm)	7.40	6.10	6.50	7.50	6.88	7.50	6.10
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	58.59	56.73	43.09	55.80	53.55	58.59	43.09
	Carga Máxima (kg)	377.91	365.91	277.93	359.91	345.41	377.91	277.93
	Límite elástico (kg/cm ²)	15.50	22.48	16.59	17.83	18.10	22.48	15.50

Tabla de resultados relación 1:0.75 partículas tamizadas con malla #30

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO

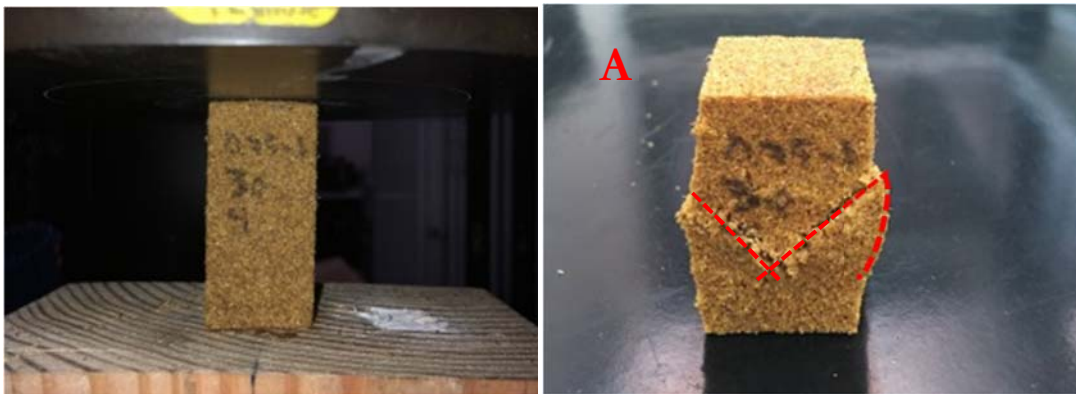


Imagen de probetas de relación 1:0.75, fibra tamizadas con la malla #30. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #4.

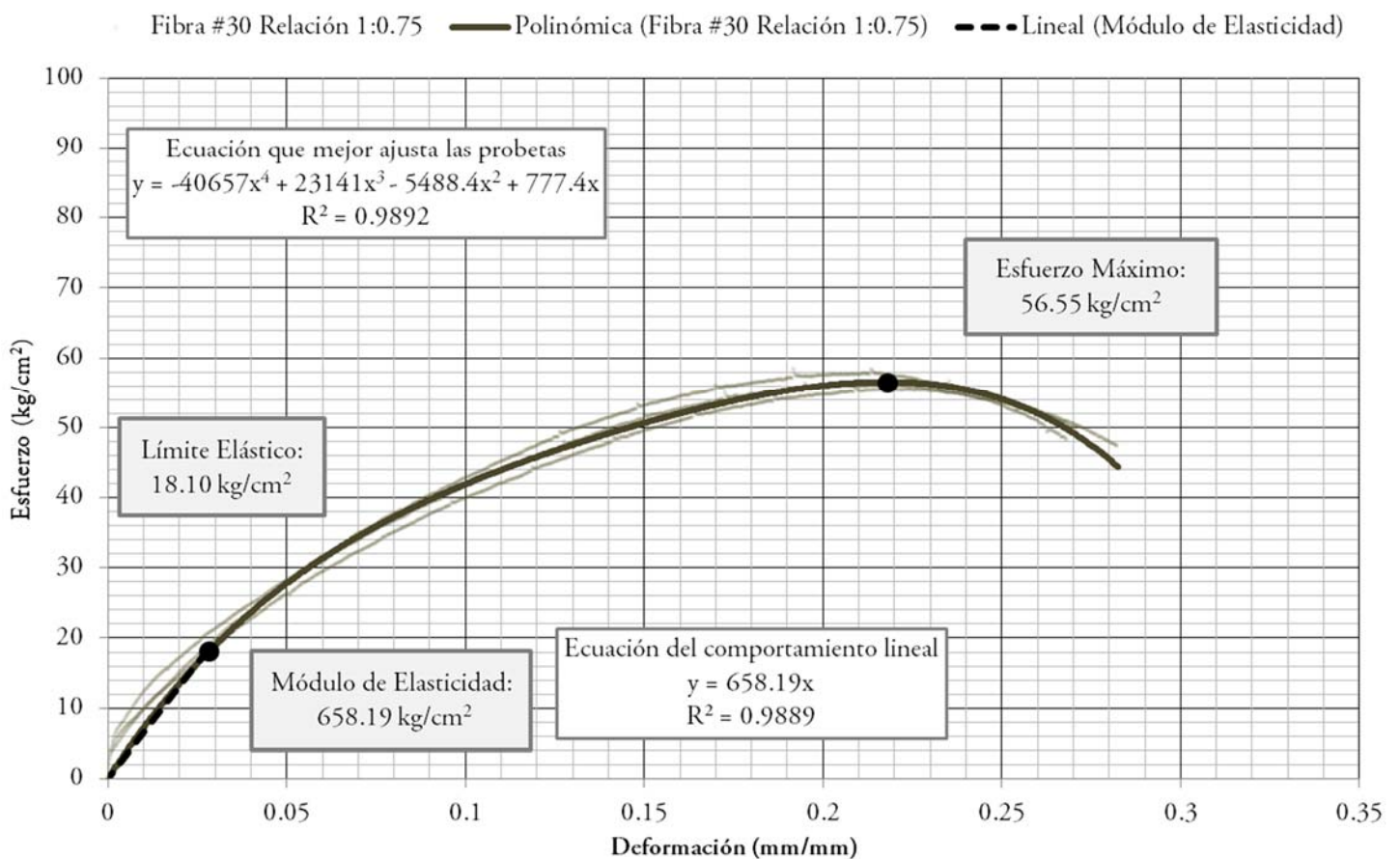
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #1, 2, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo A- Las probetas con un tamaño de fibra mediano (malla #30) para la relación 1:0.75 sufren de una destrucción mixta de tipo plástica de aplastamiento y frágil con grietas diagonales. Presentan una falla de pandeo global, lo que significa que se transmitió el esfuerzo satisfactoriamente a todas las fibras. Hubo un pequeño reacomodo interno del material lo que permitió el aplastamiento, hasta llegar a un

límite a partir del cual inicia la grieta en diagonal al no existir espacio para acomodarse. Se observó una deformación superior al 0.28 y un promedio de esfuerzo máximo de 56.55 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 18.10 kg/cm^2 .

En verde claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color verde intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #30 Relación 1:0.75



De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo dúctil, mostrando una deformación constante superior al 0.28. Esto se traduce como un acomodamiento de fibras que ocurre durante toda la prueba (aplastamiento) por lo que la resistencia máxima es alcanzada cuando estas ya no tienen más como acomodarse, punto donde comienza la falla por cortante (grietas en diagonal). De esta variable se concluye que el esfuerzo máximo supera el mínimo solicitado, sin embargo el límite elástico y el comportamiento dúctil no son los ideales para utilizar como bloques no estructurales.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #50 o partículas menores a un tamaño de 0.297mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.75 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

		Relación 1:0.75				Promedio	Máximo	Mínimo
Tamaño de Fibra	Mediciones	1	2	3	4			
#50	Peso (g)	24.00	26.00	24.00	29.00	25.75	29.00	24.00
	Tamaño Inicial (mm)	54.20	54.60	53.60	54.00	54.10	54.60	53.60
	Tamaño Final (mm)	49.40	49.00	46.50	49.20	48.53	49.40	46.50
	Desplazamiento (mm)	4.80	5.60	7.10	4.80	5.58	7.10	4.80
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	90.21	100.60	85.41	145.86	105.52	145.86	85.41
	Carga Máxima (kg)	581.85	648.87	550.89	940.80	680.60	940.80	550.89
	Límite elástico (kg/cm ²)	79.83	80.29	69.91	134.23	91.07	134.23	69.91

Tabla de resultados relación 1:0.75 partículas tamizadas con malla #50

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO

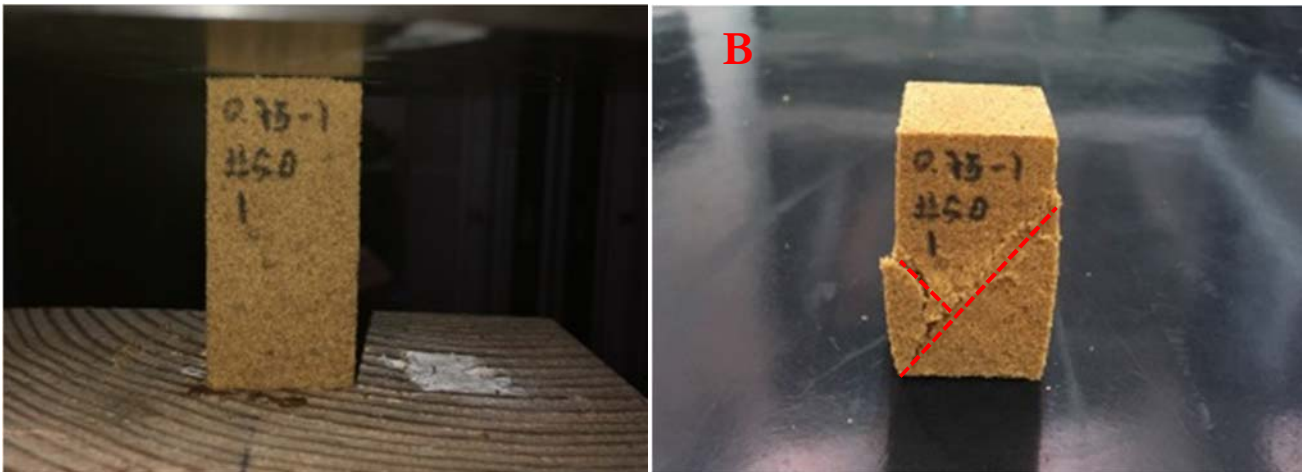


Imagen de probetas de relación 1:0.75, fibra tamizadas con la malla #50. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #1.

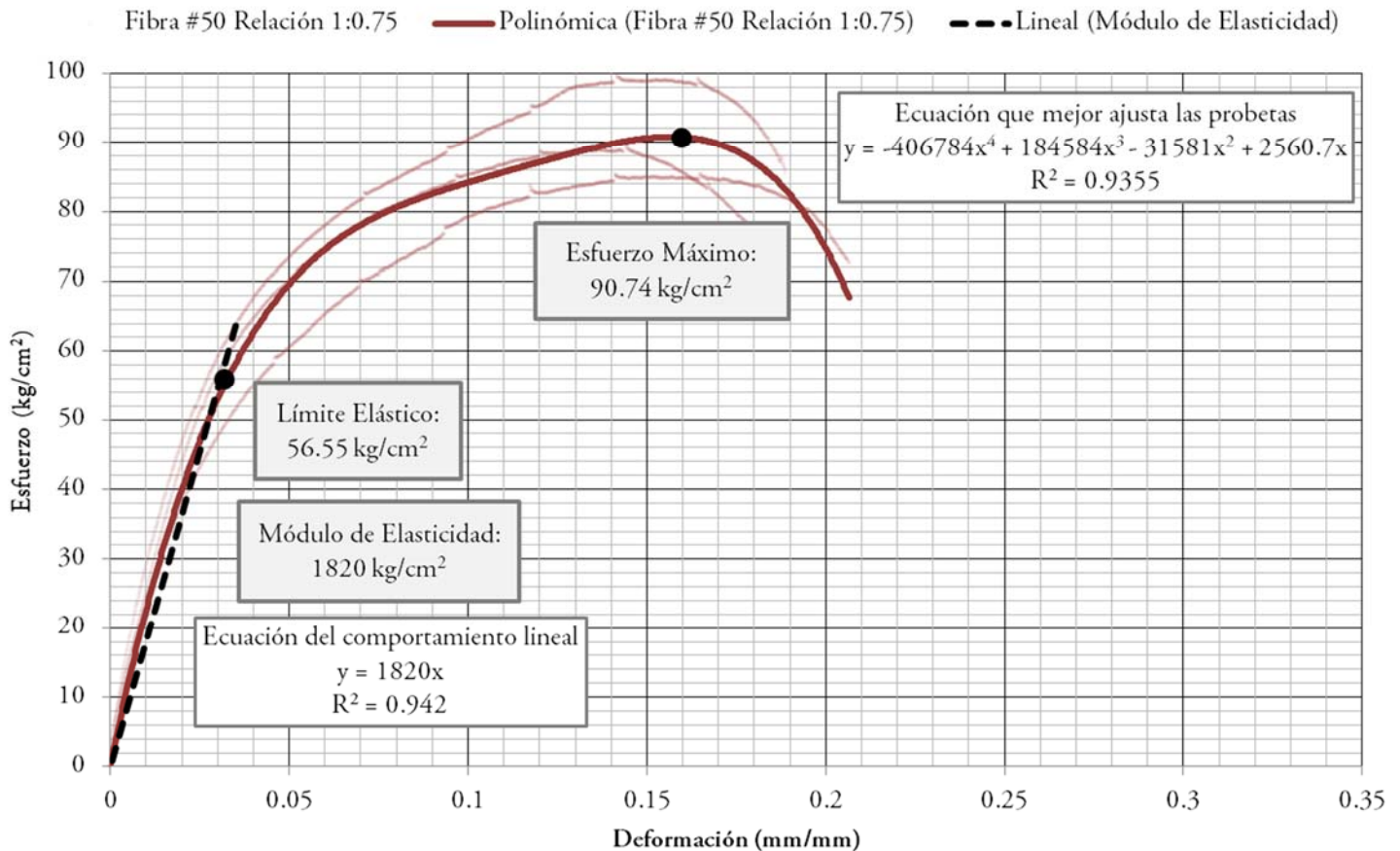
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #1, 2, 3. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Probeta B- Las probetas con una tamaño de fibra pequeño (malla #50) para la relación 1:0.75 sufren de una destrucción de tipo frágil, ya que presentan una falla por cortante (grietas en diagonal), lo que significa que el esfuerzo fue transmitido sin existir un acomodamiento interno de las partículas. Se observó

una deformación apenas superior al 0.20 y un promedio de esfuerzo máximo de 90.74 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 56.55 kg/cm^2 .

En rojo claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color rojo intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #50 Relación 1:0.75

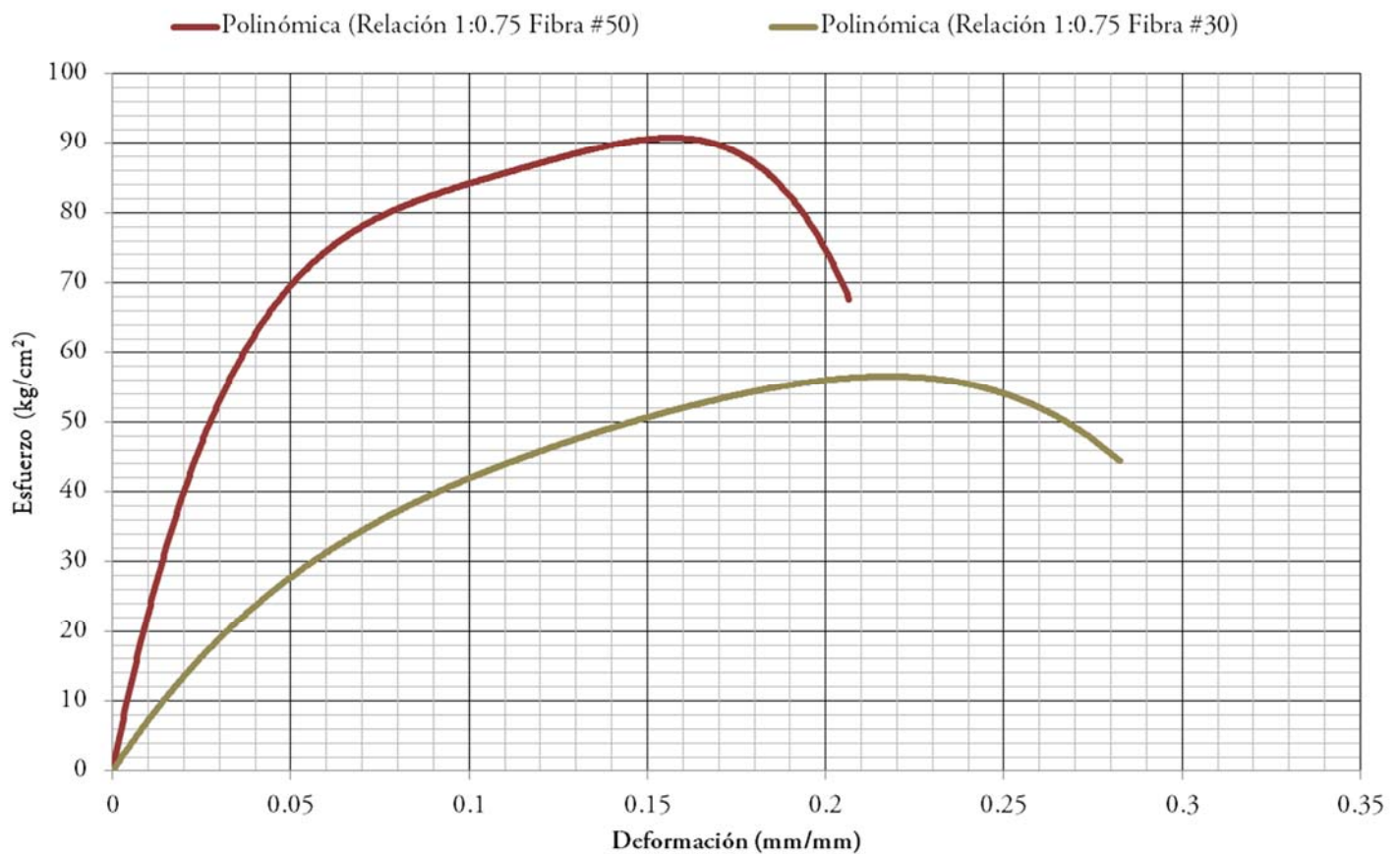


De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo frágil, mostrando una zona elástica bien definida llegando a un límite de 56.55 kg/cm^2 , un esfuerzo máximo de 90.74 kg/cm^2 , y un módulo de elasticidad de 1820 kg/cm^2 . En esta variable no existe un acomodamiento de fibras ya que al ser las fibras más pequeñas no hay espacio donde puedan acomodarse. La falla por cortante (grieta en diagonal) muestra este comportamiento en la fotografía del ejemplo B. Se confirma que esta variable tiene una zona elástica bien definida que supera los estándares mínimos solicitados por la norma para bloques no estructurales, por lo que esta es una posible combinación de elementos a utilizar como parte del diseño de mezcla para el material compuesto que se utilizará para los bloques no estructurales.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.75

Al comparar los resultados, nuevamente se llega a la conclusión que el tamaño de partícula tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico del material, puesto que para la relación 1:0.75 con las partículas de menor tamaño (tamizadas con malla #50) superaron por más del doble en esfuerzo máximo con una deformación significativamente menor y más clara en la gráfica pues fue la mitad que el de las partículas de tamizado #30. Con esta relación (1:0.75) y las fibras tamizadas del #50 se ha alcanzado y superado por más del doble el requisito mínimo establecido por las normas mexicanas para bloques no estructurales.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Relación 1:0.75



Esfuerzo-deformación de relación 1:0.75 partículas tamizadas con malla #30 y partículas tamizadas con malla #50.

Las pruebas se detuvieron cuando la resistencia máxima decayó el 10%. Aquí la tabla resumen de datos obtenidos resultantes del análisis de todas las probetas de cada variable de la relación 1:0.75.

Relación 1:0.75					
Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Fibras #30	$y = -40657x^4 + 23141x^3 - 5488.4x^2 + 777.4x$	$y = 658.19x$	56.55	18.1	658.19
Fibras #50	$y = -406784x^4 + 184584x^3 - 31581x^2 + 2560.7x$	$y = 1820x$	90.74	56.55	1820

Tabla de resultados relación 1:0.75 partículas tamizadas con malla #30 y #50

En la gráfica y en la tabla nuevamente se observa que la deformación del material va a estar influenciada por el tamaño de fibra que se utilice, siendo el comportamiento más acorde a la aplicación solicitada, el mostrado por la fibra #50, ya que fue la variable que alcanzó su resistencia máxima en la menor deformación, tiene un límite elástico superior al esfuerzo mínimo necesario para la construcción de bloques no estructurales, y un esfuerzo máximo de más del doble solicitado por la norma. La probeta de fibras #30, cuyo límite es de 18.1kg/cm², tiene un esfuerzo máximo superior al marcado por la norma mexicana, sin embargo su límite elástico y su comportamiento dúctil no son los apropiados para utilizarse. Las fibras #50 tienen un módulo superior a 1800kg/cm², lo que nos indica que tienen un comportamiento más rígido, en comparación a los 658 kg/cm² de la fibra #30 que se comportan de manera dúctil.

RELACIÓN 1:0.5 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #30 o partículas menores a un tamaño de 0.595mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.5 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

		Relación 1:0.5						
Tamaño de Fibra	Mediciones	1	2	3	4	Promedio	Máximo	Mínimo
#30	Peso (g)	21.00	22.00	20.00	21.00	21.00	22.00	20.00
	Tamaño Inicial (mm)	56.50	57.50	56.40	57.10	56.88	57.50	56.40
	Tamaño Final (mm)	51.10	50.80	49.20	50.00	50.28	51.10	49.20
	Desplazamiento (mm)	5.40	6.70	7.20	7.10	6.60	7.20	5.40
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	29.14	29.61	29.61	29.76	29.53	29.76	29.14
	Carga Máxima (kg)	187.95	190.98	190.98	191.95	190.47	191.95	187.95
	Límite elástico (kg/cm ²)	11.78	4.03	11.63	13.02	10.12	13.02	4.03

Tabla de resultados relación 1:0.5 partículas tamizadas con malla #30

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO

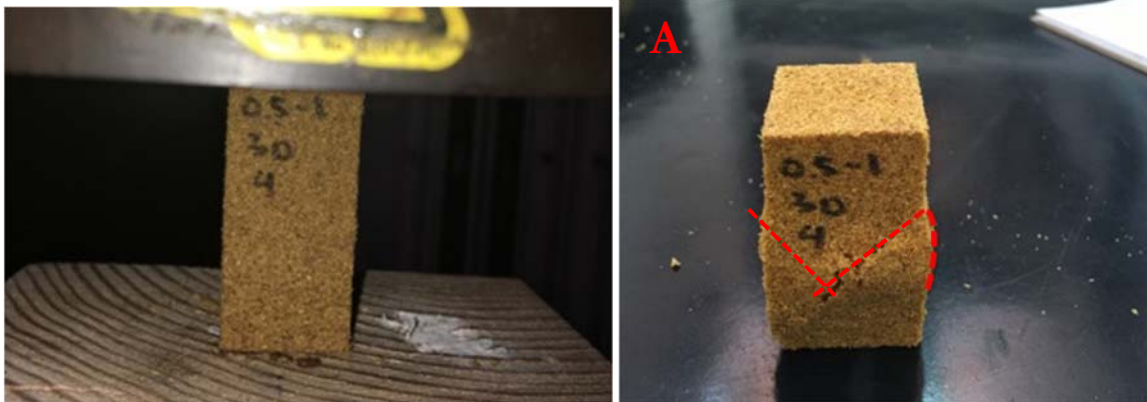


Imagen de probetas de relación 1:0.5, fibra tamizadas con la malla #30. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #4.

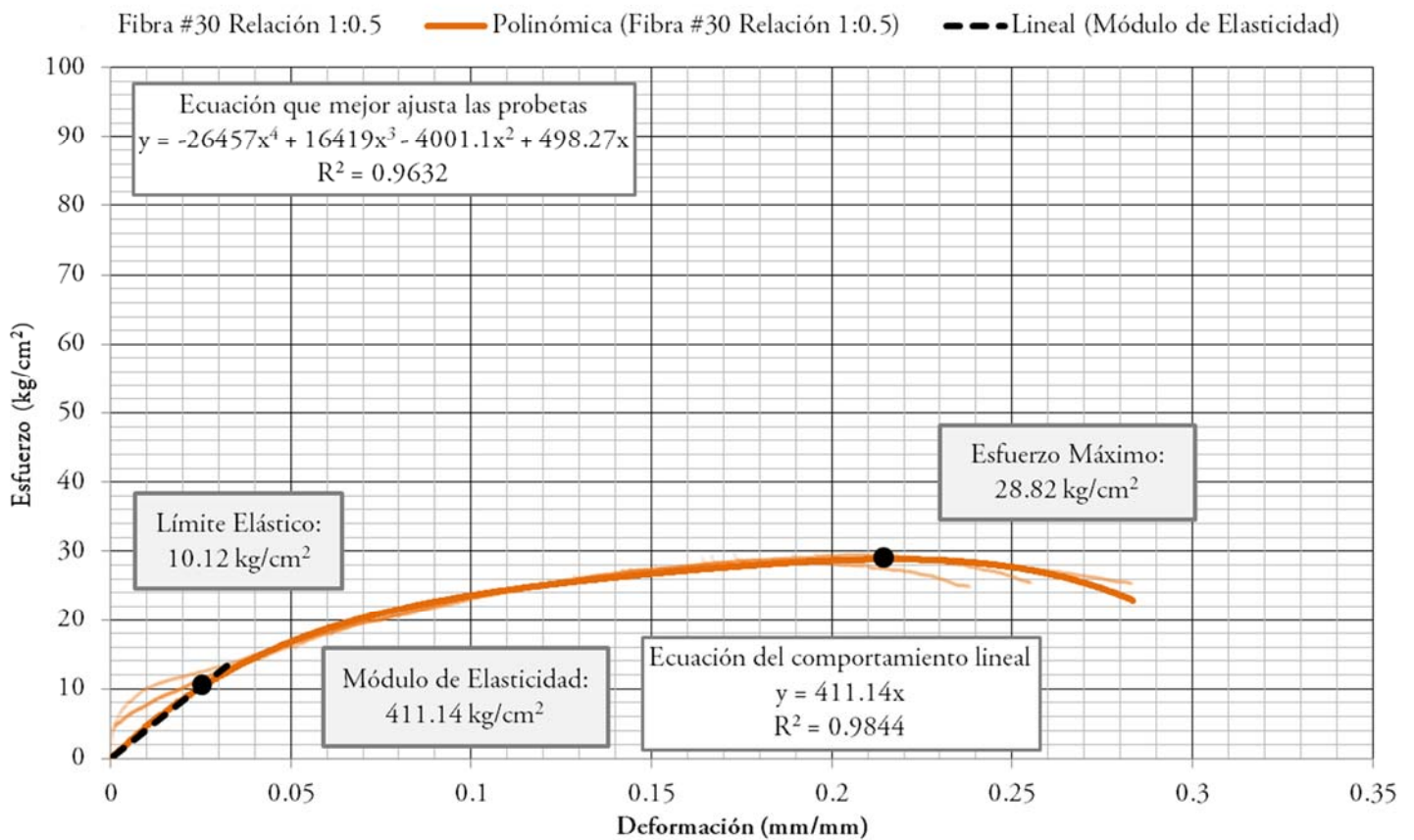
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #1, 3, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo A- Las probetas con un tamaño de fibra mediano (malla #30) para la relación 1:0.5 tienen un comportamiento en el que sufren de una falla mixta de tipo plástica/aplastamiento y frágil con grietas diagonales. Se presentan una falla de pandeo global, lo que significa que se transmitió el esfuerzo satisfactoriamente a todas las fibras. Hubo un pequeño reacomodo interno del material lo que permitió el

aplastamiento, hasta llegar a un límite a partir del cual inicia la grieta en diagonal al no existir espacio para acomodarse. Se observó una deformación superior al 0.28 y un promedio de esfuerzo máximo de 28.82 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 10.12 kg/cm^2 .

En naranja claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color naranja intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #30 Relación 1:0.5



De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo dúctil, mostrando una deformación constante superior al 0.28. Esto se traduce como un reacomodo de fibras que ocurre durante toda la prueba (aplastamiento) por lo que la resistencia máxima es alcanzada cuando estas ya no tienen más como acomodarse. De esta variable se concluye que ni el esfuerzo máximo, ni el límite elástico superan el mínimo solicitado, así como el comportamiento dúctil no es ideal para utilizar en bloques no estructurales.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #50 o partículas menores a un tamaño de 0.297mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.5 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

Tamaño de Fibra	Mediciones	Relación 0.5-1				Promedio	Máximo	Mínimo
		1	2	3	4			
#50	Peso (g)	25.00	27.00	21.00	26.00	24.75	27.00	21.00
	Tamaño Inicial (mm)	50.90	52.00	48.60	51.90	50.85	52.00	48.60
	Tamaño Final (mm)	47.80	48.20	44.90	48.50	47.35	48.50	44.90
	Desplazamiento (mm)	3.10	3.80	3.70	3.40	3.50	3.80	3.10
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	60.30	65.26	41.23	60.92	56.93	65.26	41.23
	Carga Máxima (kg)	388.94	420.93	265.93	392.93	367.18	420.93	265.93
	Límite elástico (kg/cm ²)	45.26	39.68	23.10	45.26	38.33	45.26	23.10

Tabla de resultados relación 1:0.5 partículas tamizadas con malla #50

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO

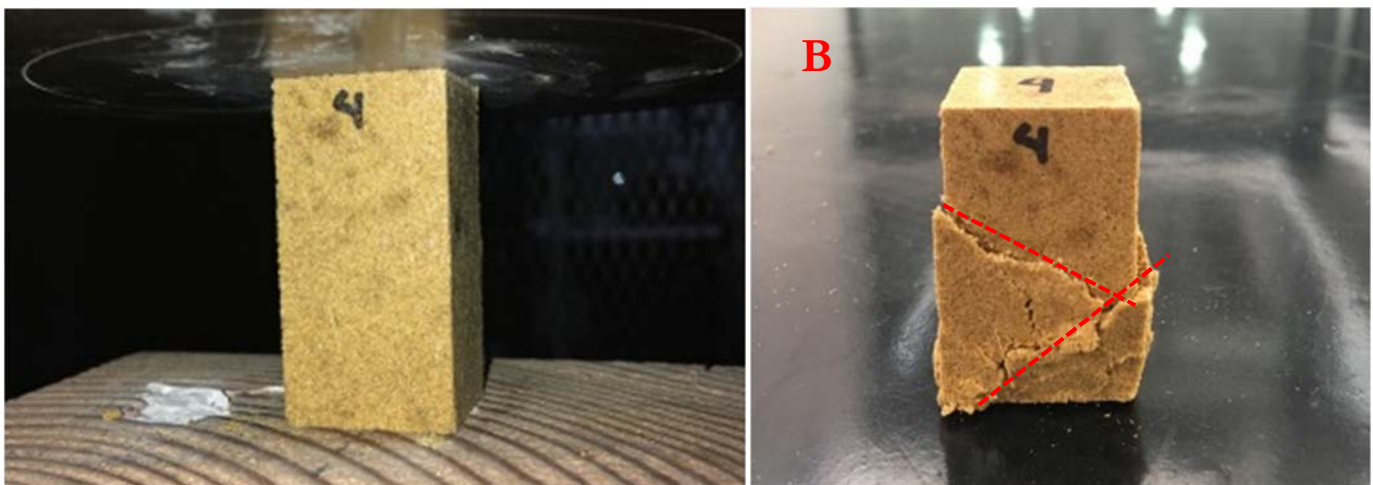


Imagen de probetas de relación 1:0.5, fibra tamizadas con la malla #50. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #4.

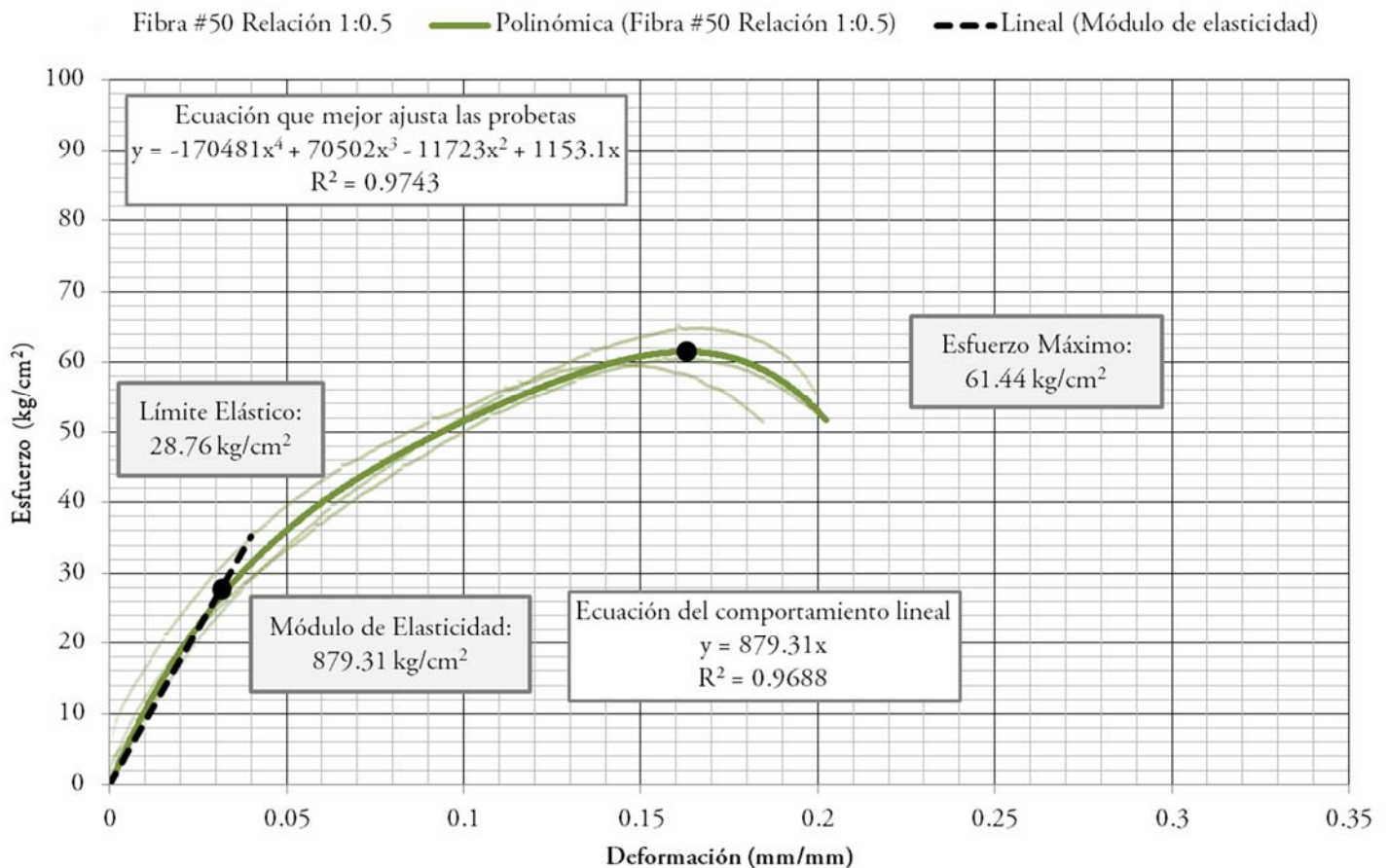
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #1, 2, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo B- Las probetas con una tamaño de fibra pequeño (malla #50) para la relación 1:0.5 sufren de una destrucción de tipo frágil, ya que presentan una falla por cortante (grietas en diagonal), lo que significa que el esfuerzo fue transmitido, y que existió un reacomodo interno de las partículas durante la

primer parte debido a la compactación del material, para posteriormente tener la falla por cortante. Se observó una deformación aproximada al 0.20 y un promedio de esfuerzo máximo de 61.44 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 28.76 kg/cm^2 .

En verde claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color verde intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #50 Relación 1:0.5

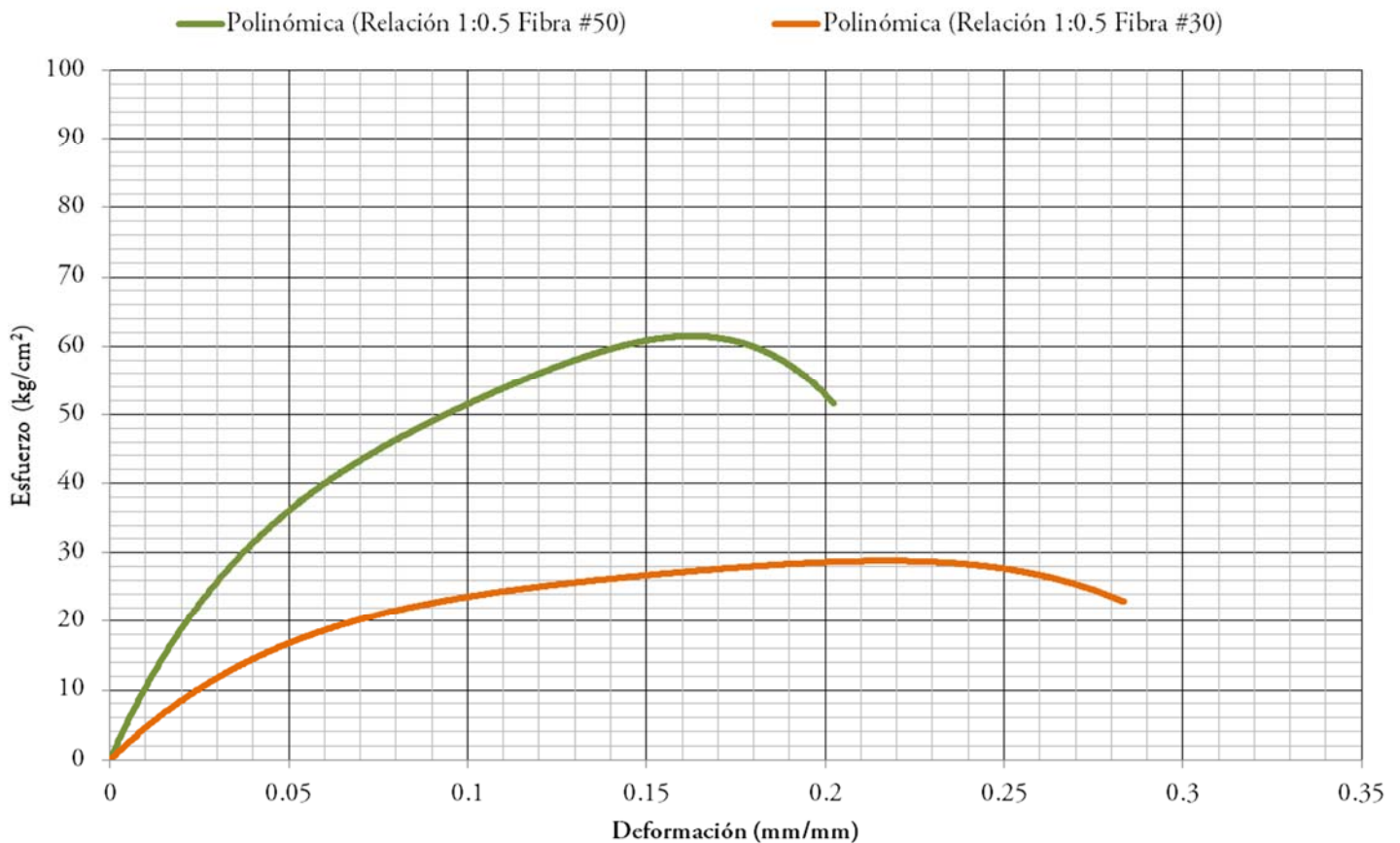


De esta gráfica observamos que el comportamiento es de tipo dúctil, mostrando una deformación constante superior al 0.20. Esto se traduce como un reacomodo de fibras que ocurre durante toda la prueba hasta llegar a un punto donde el reacomodo no puede darse más por la falta de espacio, punto en el cual ocurre la falla por cortante. La resistencia máxima es alcanzada cuando el acomodo ya no tiene espacio para llevarse a cabo. La falla posterior al material es por cortante sin existir un pandeo en la probeta.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.5

Nuevamente se observa que el tamaño de partícula tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico del material, puesto que para la relación 1:0.5 las partículas de menor tamaño (tamizadas con malla #50) superaron en esfuerzo máximo a las partículas de tamizado #30. Como en las relaciones anteriores, la resistencia máxima es alcanzada con una deformación menor en las fibras del #50, debido a que por el tamaño mismo el reacomodo se lleva a cabo en menor tiempo.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Relación 1:0.5



Gráfica esfuerzo-deformación de relación 1:0.5 partículas tamizadas con malla #30 y partículas tamizadas con malla #50.

Las pruebas se detuvieron cuando la resistencia máxima decayó el 10%. Aquí la tabla resumen de datos obtenidos resultantes del análisis de todas las probetas de cada variable de la relación 1:0.5.

Relación 1:0.5

Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Fibras #30	$y = -26457x^4 + 16419x^3 - 4001.1x^2 + 498.27x$	$y = 411.14x$	28.82	10.12	411.14
Fibras #50	$y = -170481x^4 + 70502x^3 - 11723x^2 + 1153.1x$	$y = 879.31x$	61.44	28.76	879.31

Tabla de resultados relación 1:0.5 partículas tamizadas con malla #30 y #50

En la gráfica y en la tabla nuevamente se observa que la deformación del material va a estar influenciada por el tamaño de fibra que se utilice, siendo el comportamiento más acorde a la aplicación solicitada, el mostrado por la fibra #50, ya que fue la variable que alcanzó su resistencia máxima (61.44kg/cm²) en la menor deformación. La probeta de fibras #30, tiene un límite elástico y un esfuerzo máximo insuficientes así como su comportamiento dúctil no son los apropiados para utilizarse en bloques no estructurales. Las fibras #50 tienen un módulo superior a 879.31kg/cm², lo que nos indica que tienen un comportamiento más rígido, en comparación a los 411.14 kg/cm² de la fibra #30.

RELACIÓN 1:0.25 EN PESO DE BAMBÚ-RESINA

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #30

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #30 o partículas menores a un tamaño de 0.595mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.25 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

		Relación 0.25-1						
Tamaño de Fibra	Mediciones	1	2	3	4	Promedio	Máximo	Mínimo
#30	Peso (g)	21.00	20.00	20.00	21.00	20.50	21.00	20.00
	Tamaño Inicial (mm)	51.90	51.80	51.90	51.80	51.85	51.90	51.80
	Tamaño Final (mm)	45.20	45.60	46.80	46.60	46.05	46.80	45.20
	Desplazamiento (mm)	6.70	6.20	5.10	5.20	5.80	6.70	5.10
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	37.98	35.03	29.30	31.93	33.56	37.98	29.30
	Carga Máxima (kg)	244.97	225.94	188.99	205.95	216.46	244.97	188.99
	Límite elástico (kg/cm ²)	20.15	23.72	20.77	22.01	21.66	23.72	20.15

Tabla de resultados relación 1:0.25 partículas tamizadas con malla #30

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO

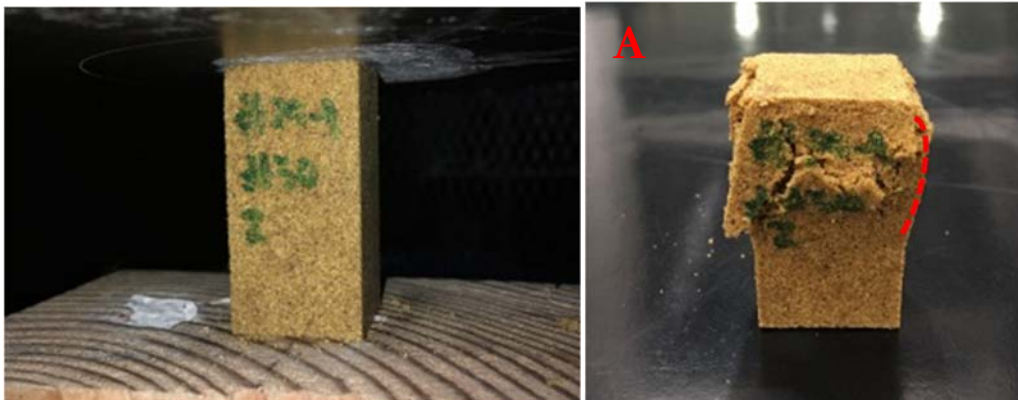


Imagen de probetas de relación 1:0.25, fibra tamizadas con la malla #30. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #2.

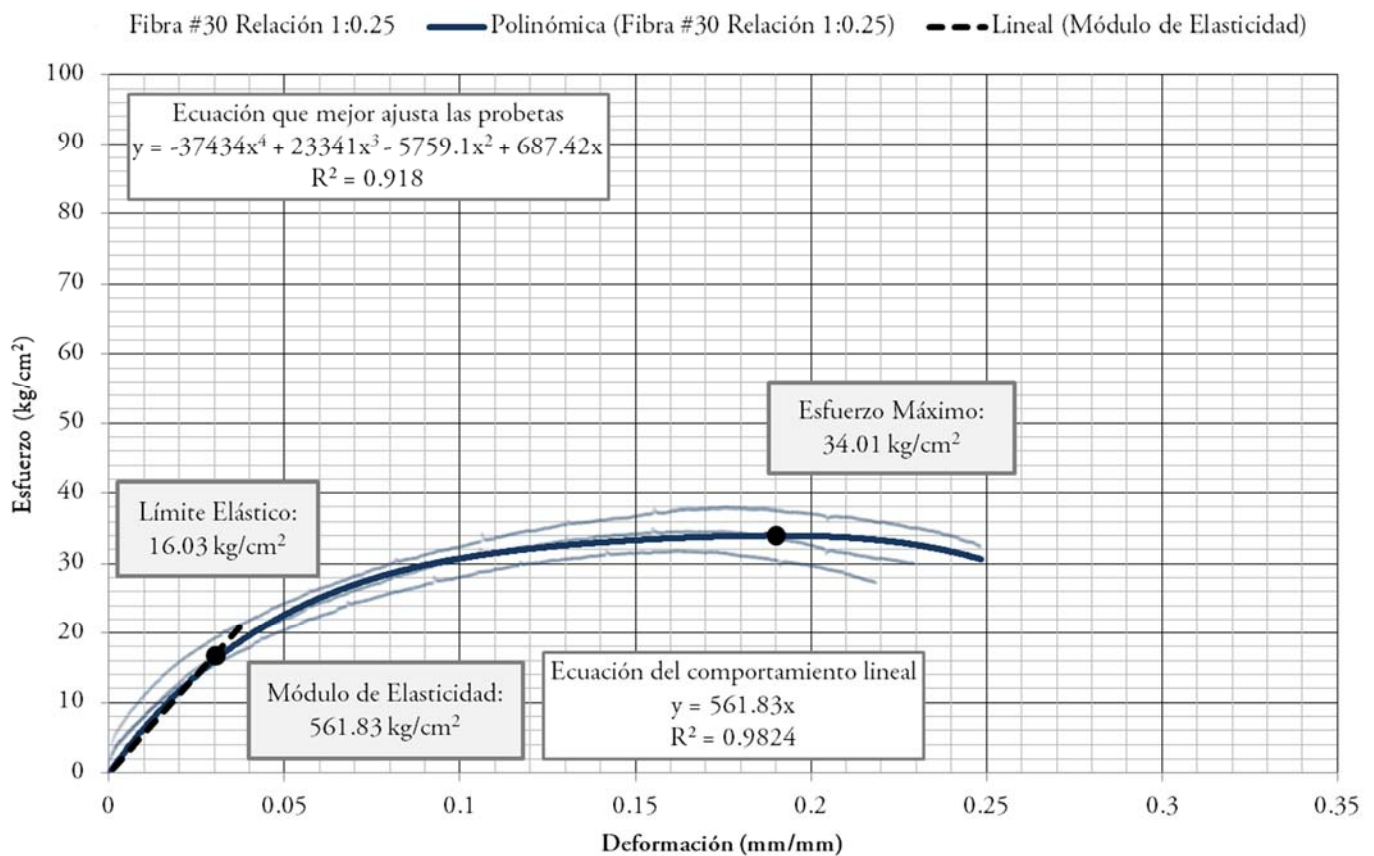
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #1, 2, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo A- Las probetas con un tamaño de fibra mediano (malla #30) para la relación 1:0.25 tienen una destrucción por desmoronamiento, ya que se desprenden grandes secciones del material. Se observa que en esta relación, hay una carencia de adhesión entre matriz y refuerzo lo que favorece la falla por

desmoronamiento. Es apreciable también una falla por aplastamiento, ya que se alcanza a notar un pequeño pandeo en una de las aristas lo que significa que se produjo un reacomodo interno del material, y que por falta de adhesión fue obligado a desprenderse. Se observó una deformación de casi el 0.25 y un promedio de esfuerzo máximo de 34.01 kg/cm^2 , así como un límite elástico de 16.03 kg/cm^2 .

En azul claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color azul intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #30 Relación 1:0.25



En la gráfica se puede ver que el reacomodo de las fibras es constante, comportándose como un material dúctil, alcanzando el esfuerzo máximo cuando el reacomodo no puede mejorarse. Esto en contraste con la fotografía del ejemplo A, nos indica que el reacomodo influye en el aplastamiento de la probeta, y la falla por desprendimiento de algunas partes de la probeta por falta de adhesión, y que por ende, la destrucción de la misma es por desmoronamiento.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN FIBRAS #50

Se probaron 4 probetas a ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión, con fibra tamizada con la malla #50 o partículas menores a un tamaño de 0.297mm, mezcladas con resina epoxi en una relación 1:0.25 medida en peso. Estos son los resultados obtenidos.

Tamaño de Fibra	Mediciones	Relación 0.25-1				Promedio	Máximo	Mínimo
		1	2	3	4			
#50	Peso (g)	17.00	20.00	21.00	20.00	19.50	21.00	17.00
	Tamaño Inicial (mm)	50.70	51.50	51.70	51.80	51.43	51.80	50.70
	Tamaño Final (mm)	45.70	47.90	43.40	48.90	46.48	48.90	43.40
	Desplazamiento (mm)	5.00	3.60	8.30	2.90	4.95	8.30	2.90
	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	17.50	22.94	21.70	23.56	21.43	23.56	17.50
	Carga Máxima (kg)	112.88	147.96	139.97	151.96	138.19	151.96	112.88
	Límite elástico (kg/cm ²)	9.46	17.83	12.70	17.21	14.30	17.83	9.46

Tabla de resultados relación 1:0.25 partículas tamizadas con malla #50

PROBETAS DURANTE EL ENSAYO



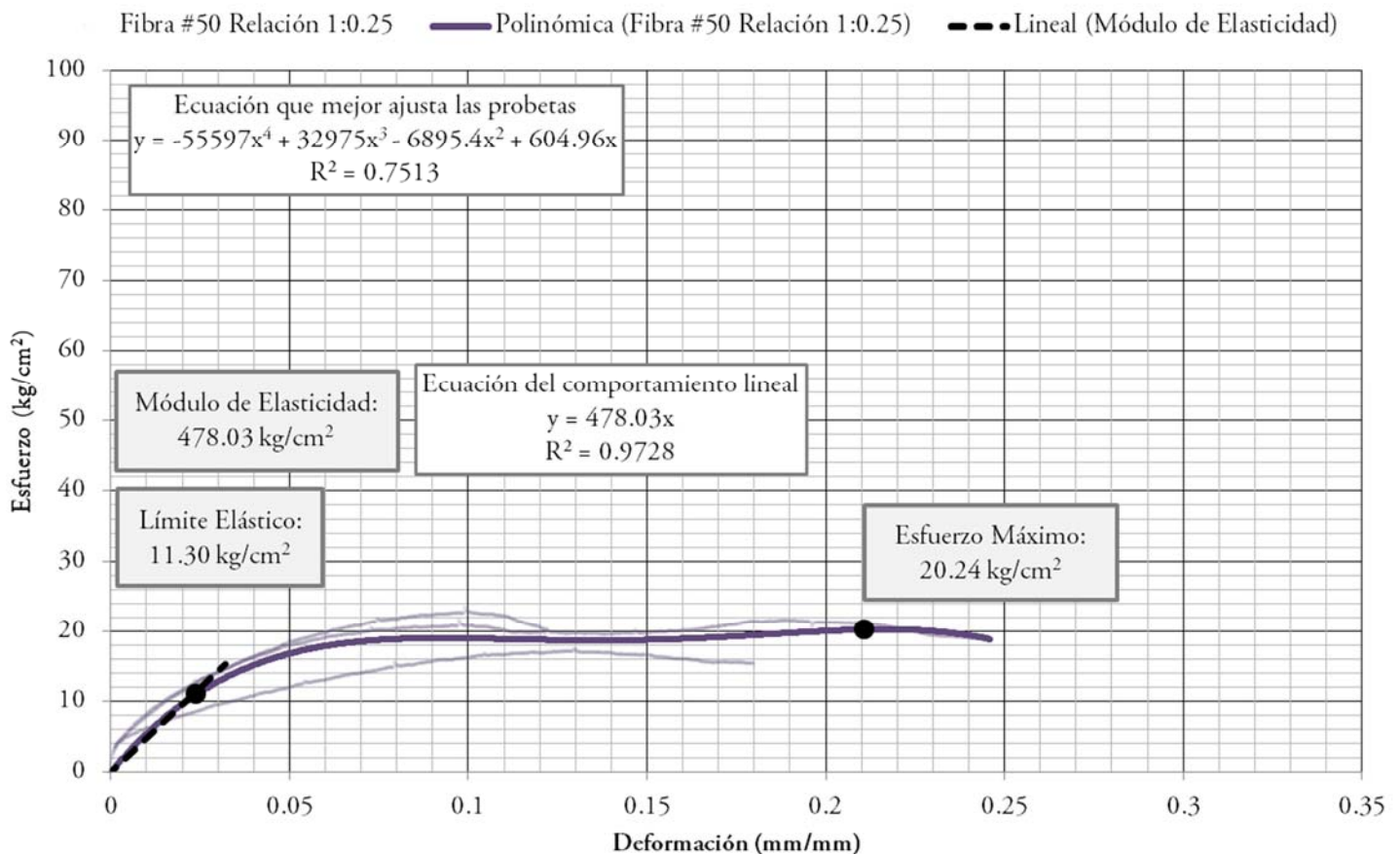
Imagen de probetas de relación 1:0.25, fibra tamizadas con la malla #50. Antes y después de la prueba como ejemplo la probeta #2.

Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #2, 3, 4. Con cuyos datos se realizó la gráfica esfuerzo-deformación.

Ejemplo B- Las probetas con un tamaño de fibra pequeño (malla #50) para la relación 1:0.25 sufren de una destrucción por desmoronamiento, ya que se desprenden grandes secciones del material. Esto se debe a la falta de adhesión entre matriz y refuerzo. Se observó una deformación aproximada de casi 0.25 y un promedio de esfuerzo máximo de 20.24 kg/cm^2 .

En morado claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color morado intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 3 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Fibra #50 Relación 1:0.25

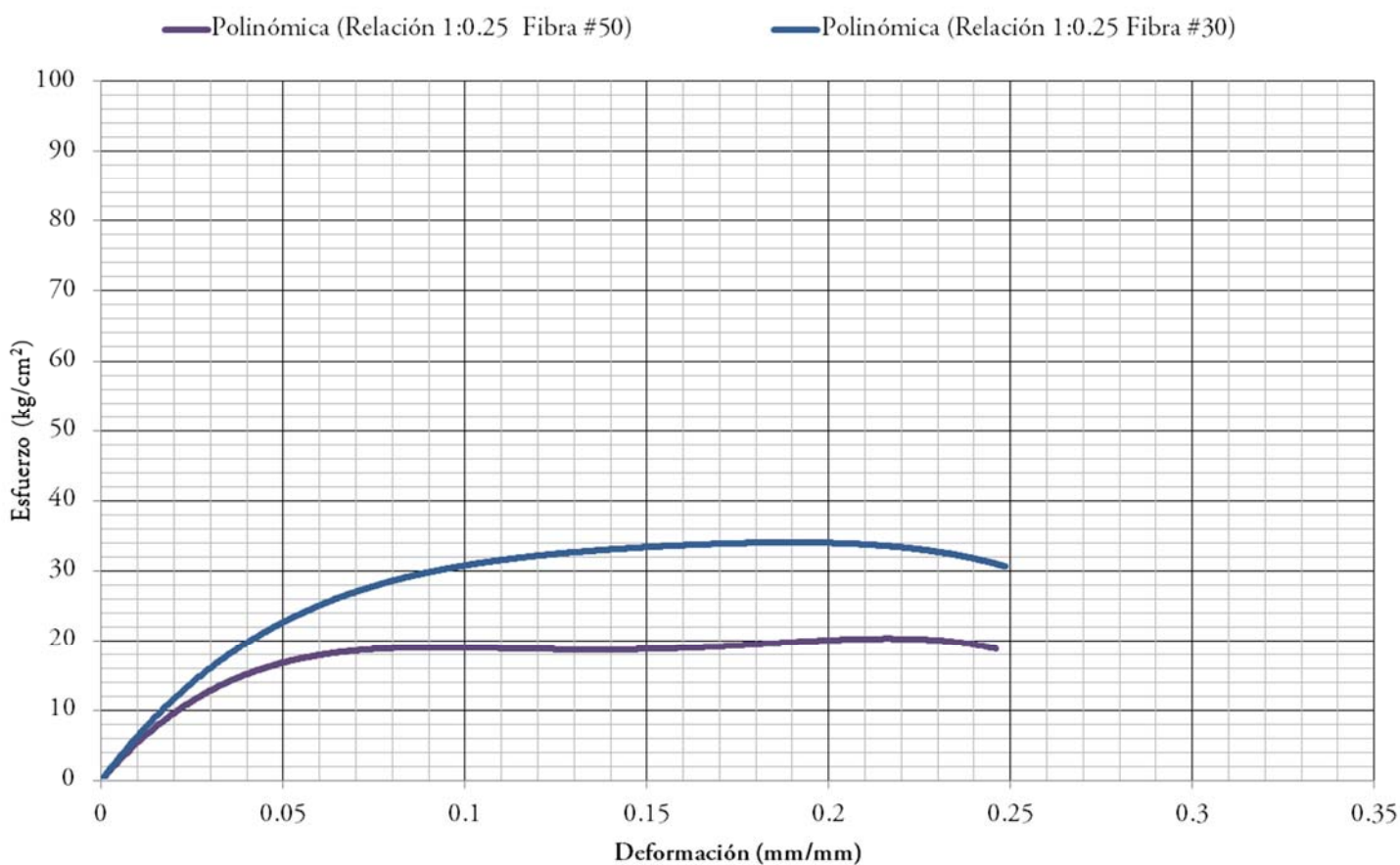


En la gráfica se puede ver que el reacondo de las fibras es constante, comportándose como un material dúctil, alcanzando el esfuerzo máximo cuando el reacondo no puede mejorarse. Esto en contraste con la fotografía del ejemplo B, nos indica que el reacondo influye en el aplastamiento de la probeta, y la falla por desprendimiento de algunas partes de la probeta por falta de adhesión, y que por ende, la destrucción de la misma es por desmoronamiento

COMPARACIÓN DE RESULTADOS RELACIÓN 1:0.25

Al analizar los resultados obtenidos en esta relación, se determina que no es posible bajar tanto la relación de bambú-resina ya que se tiene una carencia de fuerza de adhesión, generando fallas por desmoronamiento. Se observa que para una relación tan baja de resina, se tiene un mejor desempeño por las partículas tamizadas con la malla #30, debido a que al ser más grandes, favorecen la porosidad interna del material, lo que permite que la resina pueda estar mejor distribuida, y por tanto resistir un poco mejor los esfuerzos a compresión. Se determina que esta relación no es útil con ninguno de los dos tamaños de partículas, por lo que se descarta como posible material de aplicación en bloques no estructurales.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Relación 1:0.25



Las pruebas se configuraron para detenerse cuando la resistencia máxima decayó el 10%, sin embargo, la deformación supero la capacidad de la máquina razón por la cual se detuvieron antes. Aquí la tabla resumen de datos obtenidos resultantes del análisis de todas las probetas de cada variable de la relación 1:0.25.

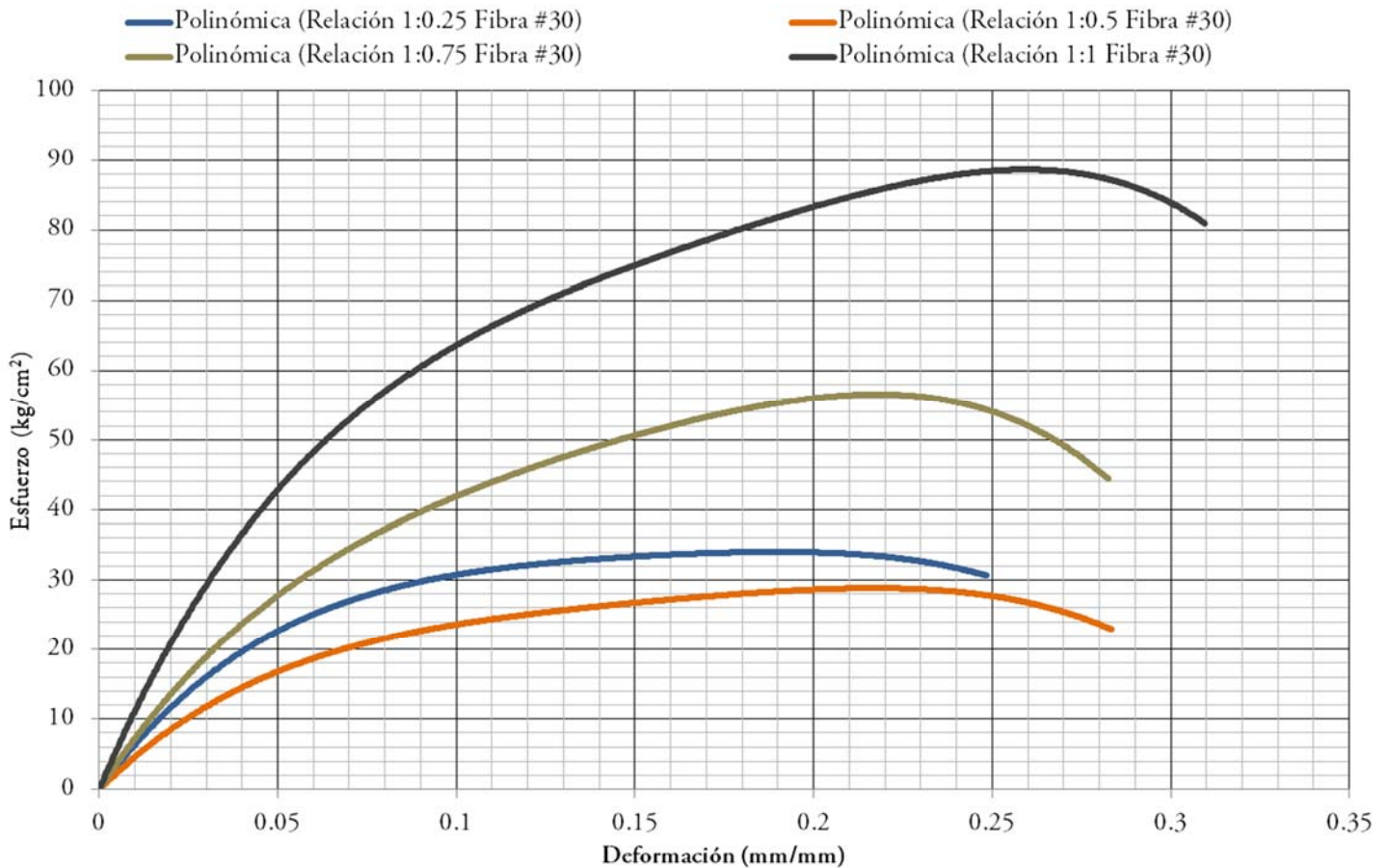
Relación 1:0.25					
Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Fibras #30	$y = -37434x^4 + 23341x^3 - 5759.1x^2 + 687.42x$	$y = 561.83x$	34.01	16.03	561.83
Fibras #50	$y = -55597x^4 + 32975x^3 - 6895.4x^2 + 604.96x$	$y = 478.03x$	20.24	11.3	478.03

Tabla de resultados relación 1:0.5 partículas tamizadas con malla #30 y #50

Con estos datos, se puede concluir que una relación tan baja, no permite que la matriz del material compuesto mantenga unido a todas las fibras, comprometiendo la resistencia a esfuerzos de compresión, dejando espacio al interior de la probeta, que favorezca el acomodamiento, que al no existir matriz que adhiera todo se traduce en el desmoronamiento de la probeta. Para las fibras #30 y #50 se tiene un límite elástico de 16.03 y 11.3 kg/cm² respectivamente, y un esfuerzo máximo de 34.01 y 20.24 kg/cm² respectivamente. En ambos casos ambos resultados quedan muy por debajo de los requisitos establecidos por las normas para bloques no estructurales. Los módulos de elasticidad de 561.83 y 478.03 kg/cm², son indicadores de lo dúctiles que se convierten estos materiales, y junto a la gráfica, se puede intuir un comportamiento plástico que no favorece su utilización en la arquitectura como bloques no estructurales.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS. PARTÍCULAS #30.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Fibra #30



Gráfica comparativa de esfuerzo-deformación de partículas tamizadas con malla #30 con diferentes relaciones de resina.

Fibras #30

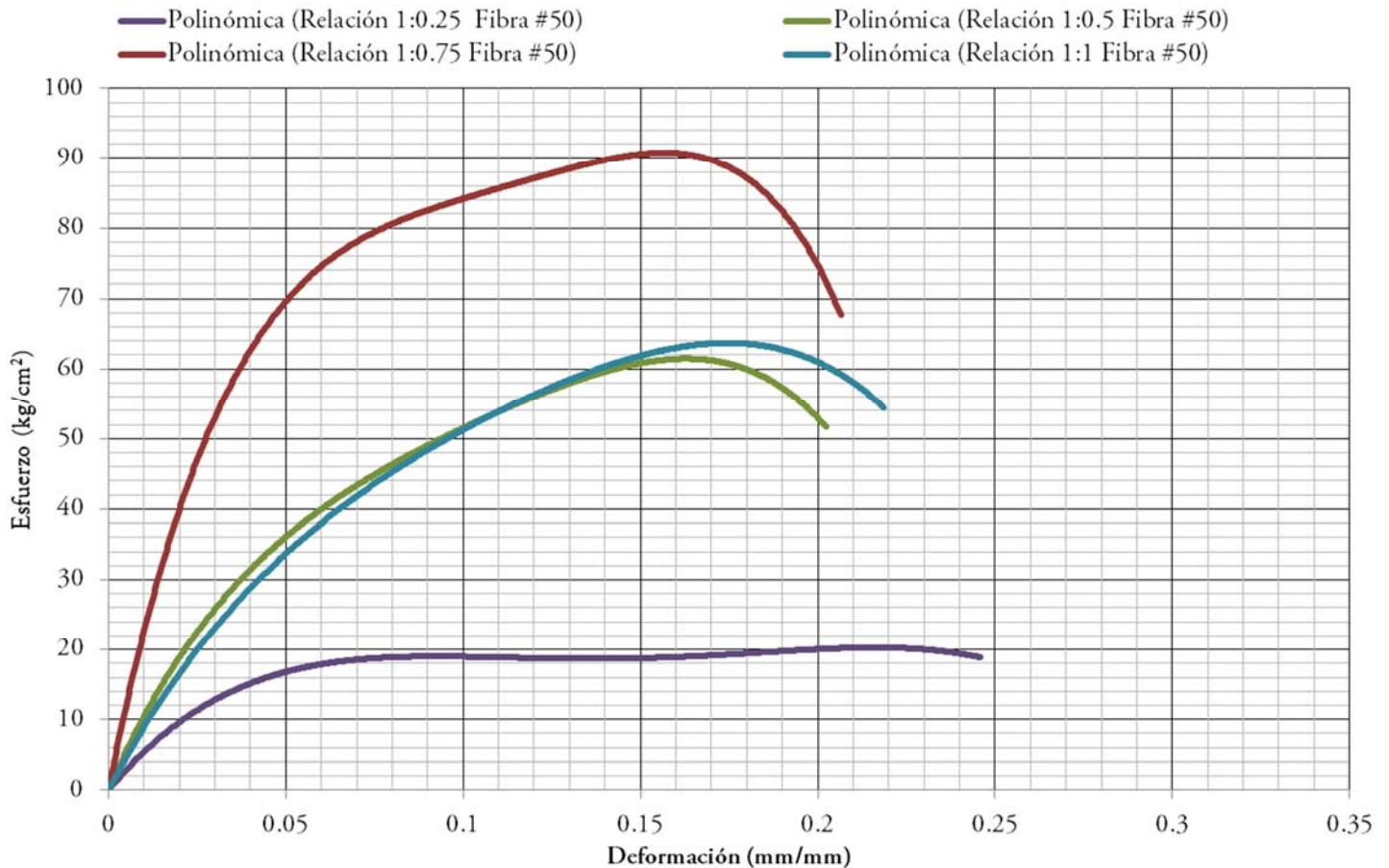
Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Relación 1:0.25	$y = -37434x^4 + 23341x^3 - 5759.1x^2 + 687.42x$	$y = 561.83x$	34.01	16.03	561.83
Relación 1:0.5	$y = -26457x^4 + 16419x^3 - 4001.1x^2 + 498.27x$	$y = 411.14x$	28.82	10.12	411.14
Relación 1:0.75	$y = -40657x^4 + 23141x^3 - 5488.4x^2 + 777.4x$	$y = 658.19x$	56.55	18.1	658.19
Relación 1:1	$y = -42649x^4 + 29742x^3 - 8136.6x^2 + 1195.3x$	$y = 921.52x$	88.59	42.67	921.52

Al analizar el desempeño de las partículas de tamaño 0.595mm (tamizadas con la malla #30), durante las diferentes pruebas con las diferentes relaciones, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Al aumentar la proporción de resina, se incrementa el esfuerzo máximo, sin embargo en todas las relaciones se tiene un comportamiento plástico con deformaciones superiores al 0.25 en el esfuerzo máximo, indicador de que este tamaño de fibra es bastante grande, pues deja espacio suficiente para que ocurra el reacomodo dentro del material, significando eso un comportamiento más dúctil.
- El tamaño de fibra #30, condiciona el comportamiento mecánico del material, ya que al quedar espacios vacíos entre las fibras, se favorece el reacomodo de las mismas, lo cual provoca un aumento gradual del esfuerzo máximo, sin embargo es la deformación la que se ve afectada por dicho proceso ya que aumenta casi proporcionalmente.
- La resina epoxi utilizada muestra un comportamiento dúctil, ya que en la relación 1:1 es donde encontramos el mejor comportamiento, principalmente porque es la resina quien hace todo el esfuerzo pues al usar una fibra de tamaño #30, quedan suficientes espacios para que la resina se ponga, y por ende, no transmitiendo los esfuerzos a las fibras, sino tomándoles ella misma.
- De todas éstas variables, las únicas que cumplen el requisitos de esfuerzo mínimo solicitado por la norma son las relaciones 1:1 y 1:0.75, cuyos esfuerzos son 88.59 y 56.55 kg/cm² respectivamente.
- Todos los módulos de elasticidad son menores a 1000kg/cm², indicador del comportamiento dúctil de todas las variables.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS. PARTÍCULAS #50.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas con Fibras #50



Gráfica comparativa de esfuerzo-deformación de partículas tamizadas con malla #50 con diferentes relaciones de resina.

Fibras #50

Tamaño de Fibra	Ecuación de Tendencia	Ecuación zona elástica	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Límite Elástico (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Relación 1:0.25	$y = -55597x^4 + 32975x^3 - 6895.4x^2 + 604.96x$	$y = 478.03x$	20.24	11.3	478.03
Relación 1:0.5	$y = -170481x^4 + 70502x^3 - 11723x^2 + 1153.1x$	$y = 879.31x$	61.44	28.76	879.31
Relación 1:0.75	$y = -406784x^4 + 184584x^3 - 31581x^2 + 2560.7x$	$y = 1820x$	90.74	56.55	1820
Relación 1:1	$y = -91501x^4 + 39662x^3 - 7571.1x^2 + 964.73x$	$y = 763.41x$	63.7	27.55	763.41

Al comparar el desempeño de las partículas de tamaño 0.297mm (tamizadas con la malla #50) durante los ensayos con diferentes relaciones de resina, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Las muestras con fibra #50 muestran un comportamiento de menor acomodamiento de fibras, debido al carente espacio que dejan entre las mismas, lo que favorece un comportamiento menos dúctil de todas las relaciones al compararlas con las fibras #30.
- Aumentar demasiado la cantidad de resina provoca un comportamiento dúctil; en contraste disminuirla demasiado resulta en una deficiencia en la adhesión entre matriz y refuerzo, provocando un material de escaso Límite Elástico, con comportamiento frágil.
- Las relaciones que superan el esfuerzo mínimo requisito de la norma para bloques no estructurales son la relación 1:1, 1:0.75 y 1:0.5.
- El comportamiento similar entre las relaciones 1:1 y 1:0.5 se debe a que en la relación 1:1 el esfuerzo es tomado por la resina debido a la mayor cantidad de la misma, mientras que en la relación 1:0.5 se encuentra en equilibrio entre lo que toma la resina y lo que transmite a las fibras.
- El comportamiento presentado por la relación 1:0.75 se debe a que es la cantidad ideal entre resina para transmitir el esfuerzo homogéneamente y las fibras para soportarlo. Si se reduce la cantidad de resina, se provoca una serie de espacios en el material, estimulando la deformación por acomodamiento. Si en contraste se aumenta la cantidad de resina, se provoca que todo el esfuerzo sea tomado por la matriz (resina) y no transmita a las fibras, lo que disminuye el esfuerzo máximo.

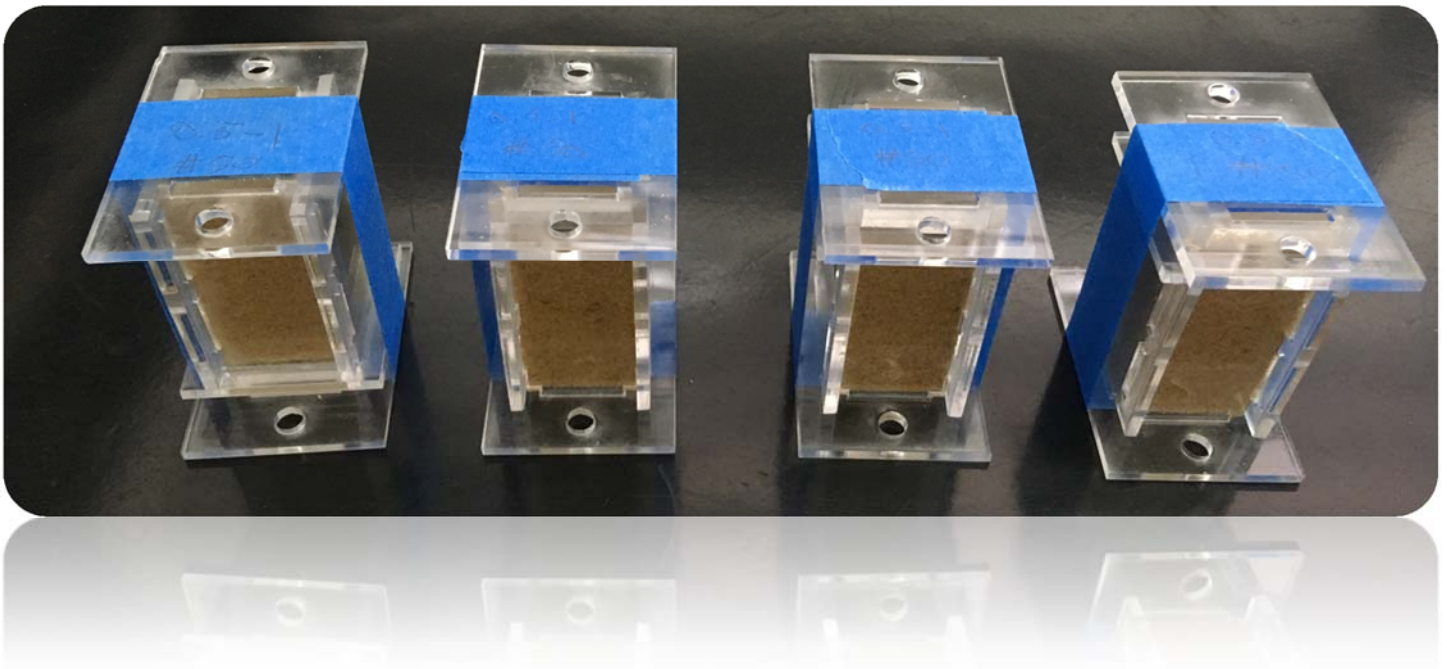
SELECCIÓN DE MEZCLA

Existen 5 posibles variables que satisfacen el requisito de esfuerzo mínimo según la norma para bloques no estructurales. Dichas variables son: con

- Fibras #30: Relación 1:1 y 1:0.75.
- Fibras #50: Relación 1:1, 1:0.75 y 1:0.5

El proceso de la selección es simple: aquella que cumpla con la resistencia mínima para construir bloques no estructurales, y que contenga la menor cantidad de resina posible. Dicha regla la cumple únicamente una variable: Fibras #50 Relación 1:0.5, misma que fue seleccionada para continuar a la siguiente etapa de investigación, en la cual se someterá nuevamente a esfuerzos de compresión con nuevas probetas para garantizar y/o corregir los resultados; así como ser ensayada en pruebas de absorción de humedad y comportamiento en intemperismo acelerado.

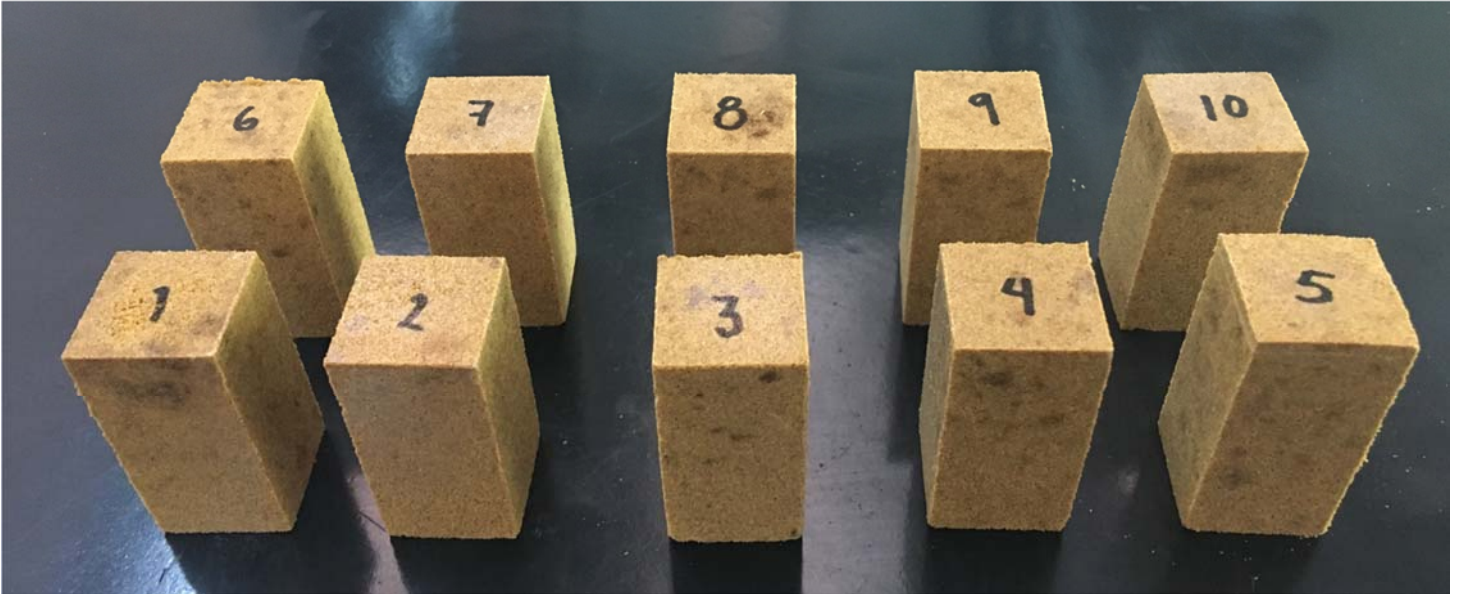
En la imagen observamos la fabricación de las nuevas probetas para realizar nuevamente los ensayos a esfuerzos de compresión.



DISEÑO DE MEZCLA FIBRAS #50 RELACIÓN 1:0.5

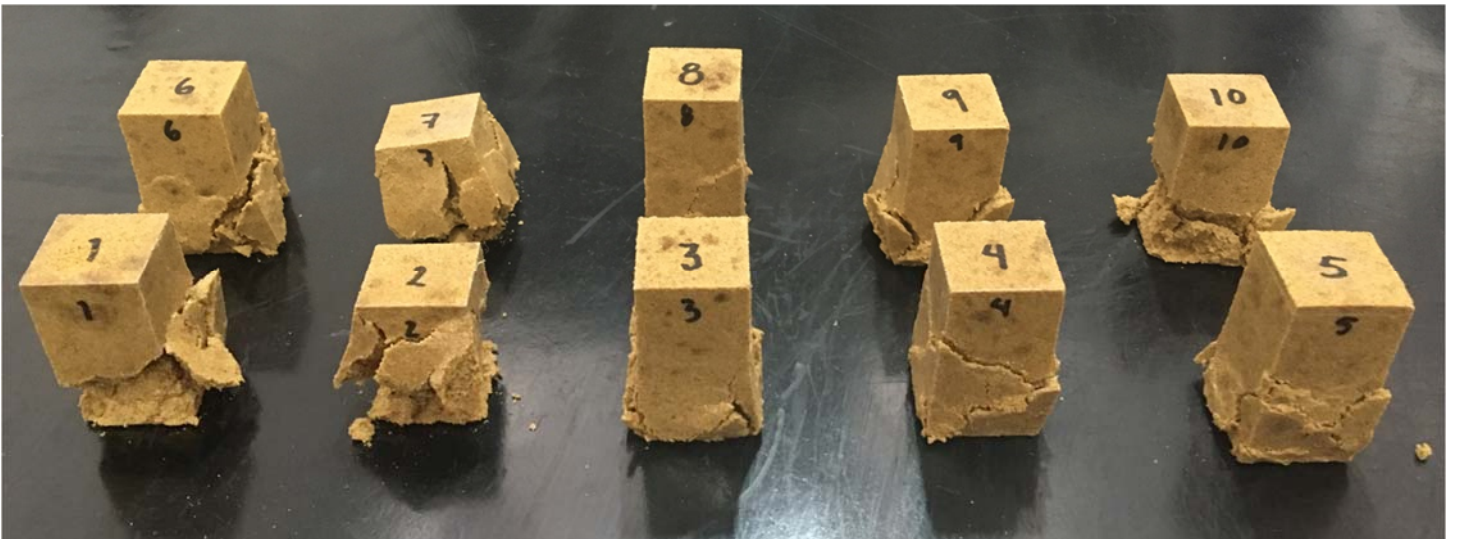
Para garantizar los datos aquí presentados en cuanto a resistencia del material, se recrearon las probetas del material seleccionado, y fueron probadas nuevamente para poder realizar un análisis estadístico con una mejor confiabilidad. A continuación los resultados de las probetas recreadas:

PROBETAS PREVIAS AL ENSAYO



Probetas previas al ensayo de confirmación con material de partículas tamizadas con malla #50 en una relación 1:0.5 de bambú-resina

PROBETAS POSTERIORES AL ENSAYO



Probetas posteriores al ensayo de confirmación con material de partículas tamizadas con malla #50 en una relación 1:0.5 de bambú-resina

RESULTADOS DE RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN

Relación 1:0.5 (Oficiales). Velocidad 1.3mm/min se detuvo cuando la caída de la resistencia máxima era del 15%													
Mediciones	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	Promedio	Máximo	Mínimo
Peso (g)	23.2	21.4	22.8	23.0	23.8	23.8	21.5	22.1	21.2	22.7	22.6	23.8	21.2
Tamaño Inicial (mm)	50.9	50.1	50.2	50.2	50.4	50.2	50.1	50.1	50.1	50.1	50.2	50.9	50.1
Tamaño Final (mm)	45.5	32.0	47.9	45.9	49.9	46.9	30.4	48.7	45.9	46.1	45.4	49.9	30.4
50 Desplazamiento (mm)	5.4	18.1	2.3	4.3	0.5	3.3	19.7	1.4	4.2	4.0	4.8	19.7	0.5
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	87.4	95.0	62.2	80.0	75.3	80.8	84.9	61.1	67.0	52.7	71.7	95.0	52.7
Carga Máxima (kg)	564.0	613.0	401.0	516.0	486.0	521.0	548.0	394.0	432.0	340.0	462.9	613.0	340.0
Límite elástico (kg/cm ²)	81.2	54.1	50.5	66.7	72.7	76.1	34.1	56.6	61.1	48.4	60.8	81.2	34.1

Tabla de resultados de confirmación con material de partículas tamizadas con malla #50 en una relación 1:0.5 de bambú-resina

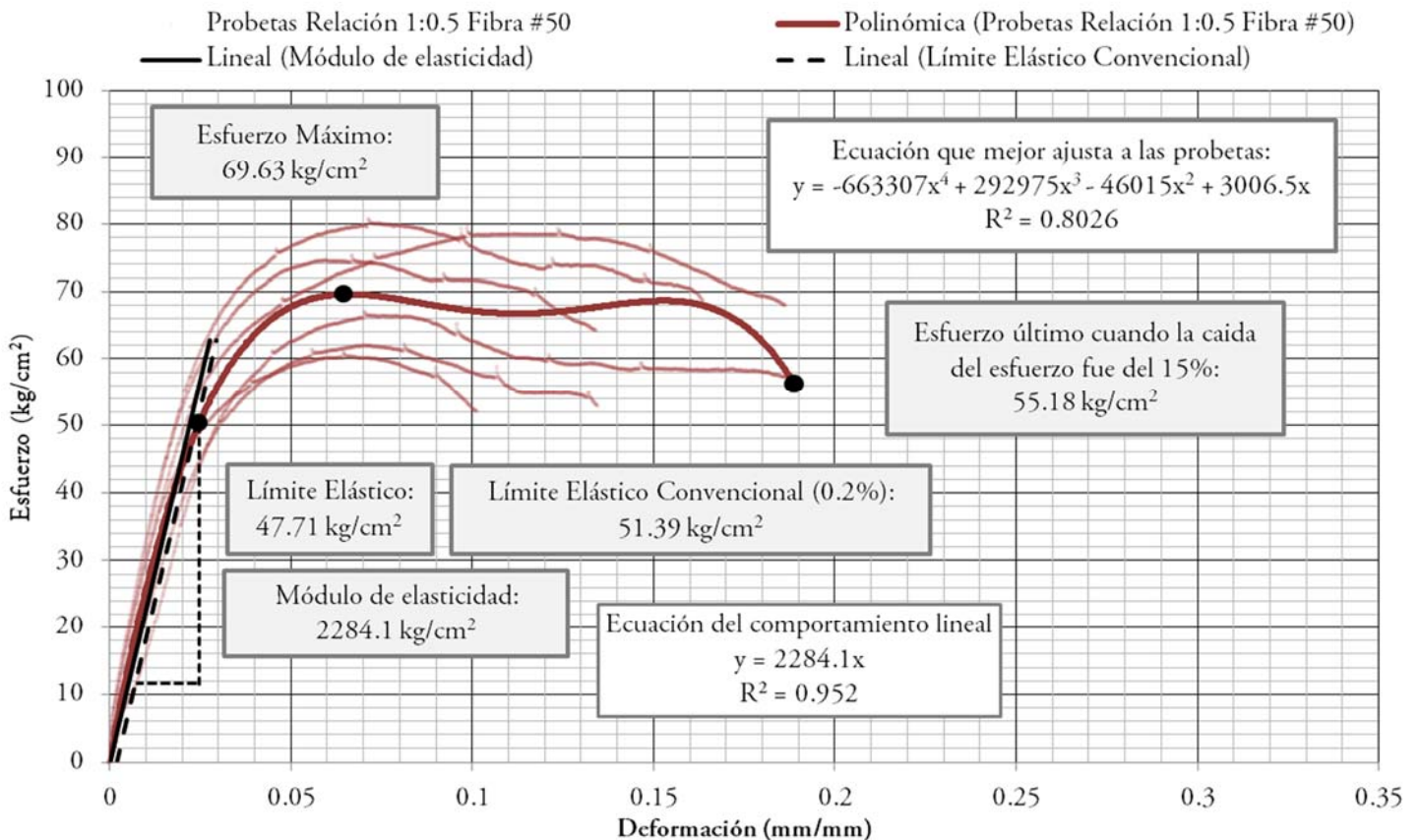
Para el análisis de la variable se tomaron en cuenta las probetas #3, 4, 5, 6, 8 y 9. Con cuyos datos se realizó

GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Se observa como el material propuesto, tiene una definida zona elástica, en la cual se alcanza un Límite elástico promedio de 47.71kg/cm² con una deformación al 0.025. Posteriormente se tiene una zona de fluencia a partir de la que se inicia la deformación plástica, ubicando en esta región la resistencia máxima a esfuerzos de compresión, teniendo un promedio de 69.63kg/cm² al 0.065 de deformación. En este material de relación 1:0.5 con partículas tamizadas con la malla #50, no existe un reacomodo interno durante el ensayo, motivo por el cual la falla es de tipo frágil. Es importante mencionar que en todos los casos, la prueba fue detenida cuando la caída en la resistencia era 15% menor al esfuerzo máximo alcanzado.

La gráfica esfuerzo-deformación. En rojo claro, observamos las gráficas de cada probeta mencionada, y en color rojo intenso, la gráfica esfuerzo-deformación ponderada a partir del análisis de las 6 probetas en cuestión.

Gráfica Esfuerzo-Deformación Probetas Relación 1:0.5 Fibra #50



Gráfica esfuerzo deformación del ensayo de confirmación con material de partículas tamizadas con malla #50 en una relación 1:0.5 de bambú-resina

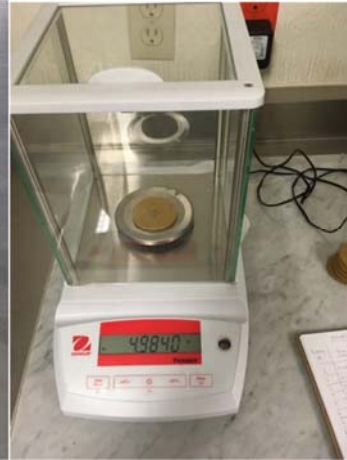
- Se concluye que la mezcla idónea de partículas de bambú y resina es de relación 1:0.5 (bambú-resina) en peso ó 72%-28% (bambú-resina) en volumen, debido a que cumple con la resistencia mínima para uso en bloques no estructurales, tiene un comportamiento frágil, y cumple el objetivo de tener una mayor cantidad de bambú que de resina, Se creó un material construido con un volumen de 72% de partículas de bambú y 28% de resina epoxi (relación 1:0.5 en peso bambú-resina)
- Se alcanzó un material con una densidad media de 690 kg/m^3 . Es decir 34% más ligero en comparación con la densidad de un block no estructural promedio (1040 kg/m^3)
- Se superó la resistencia mínima para utilizar el material en bloques no estructurales, por lo que se decide continuar con la de experimentación y análisis de propiedades deteriorativas y de absorción de humedad con la mezcla 1:0.5 en relación bambú-resina con un tamaño de partícula de 0.297 mm tamizada con una malla del #50.

RESULTADOS ABSORCIÓN DE HUMEDAD FIBRA #50 RELACIÓN 1:0.5

PROCESO DEL EXPERIMENTO



Probetas de absorción de humedad previo al secado.



Pesaje de probetas previo al secado



Inserción de probetas en la mufla



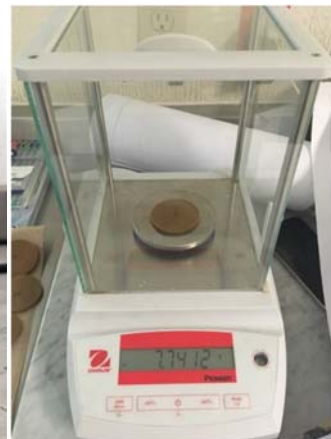
colocación de probetas en la desecadora



pesaje de probetas posteriores al secado



Inmersión de probetas en agua destilada durante dos horas



pesaje de probetas posterior a la inmersión

RESULTADOS

Pruebas Absorción de Humedad					
Probeta Número	Peso Normal (g)	Peso en Seco (g)	Humedad contenida (%)	Peso Húmedo (g)	Porcentaje de humedad ganada (%)
1	5.2482	5.0139	4.4644	7.3527	53.3537
2	6.4183	6.1591	4.0385	8.9682	54.3911
3	4.8765	4.6549	4.5442	7.0519	48.5059
4	5.1121	4.8724	4.6889	8.4976	25.5972
5	6.1131	5.8211	4.7766	9.6832	33.6534
6	4.8531	4.6313	4.5703	8.2532	21.7952
7	5.5124	5.2804	4.2087	7.6879	54.4069
8	6.5866	6.266	4.8675	10.072	39.2595
9	5.23	4.984	4.7036	8.2293	34.8856
10	5.0471	4.8066	4.7651	7.0851	52.5964
Promedio	5.49974	5.24897	4.5597	8.28811	42.1003

Tabla de resultados de la prueba de absorción de humedad según la norma astm d570.

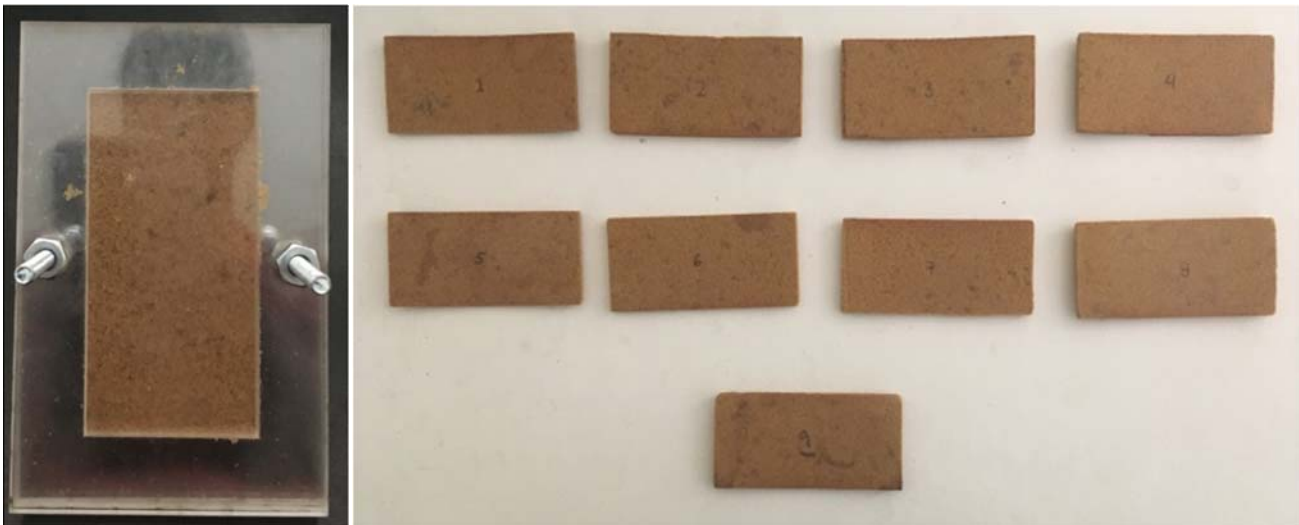
CONCLUSIONES DE LA PRUEBA

- El material en estado normal contiene un promedio de 4.5% de humedad
- El porcentaje de humedad ganada durante de la inmersión es del 42%.
- El material no cumple con los requisitos de absorción de humedad establecidos por las normas mexicanas para bloques no estructurales, en las cuales se establece un máximo recomendado de 27% de absorción individual.
- Se concluye que el material no es viable para su utilización en exteriores y se recomienda su aplicación únicamente en interiores.
- Para aplicación en exteriores es requisito cubrir al material con algún sellador que evite la absorción de humedad y evitar así problemas posteriores.

RESULTADOS DE PRUEBA DE INTEMPERISMO ACELERADO

Se elaboraron 9 probetas de un material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú, con una mezcla diseñada en una relación 1:0.5 medido en peso ó 72%-28% medida en volumen de bambú-resina respectivamente. Las variables de este diseño de mezcla (tamaño de partícula y relación resina-fibra) fueron evaluadas previamente mediante ensayos de pruebas a compresión con los que se determinó que la mezcla ya mencionada resulta en el comportamiento adecuado en esfuerzos de compresión requeridos por el propósito de uso (block no estructural regido por la norma NMX-C-441-ONNCCE-2005). Esto significa que el tipo de experimentación que se lleva a cabo durante la prueba de intemperismo acelerado tiene un carácter meramente descriptivo sobre los cambios ocurrido al material ocasionados por la exposición en un ambiente de temperatura, humedad y radiación ultravioleta controladas por la norma ASTM G-154. Se estableció que se utilizaría el ciclo 6 de la norma ASTM G-154 debido a tener las características más agresivas al cual se someterían las probetas durante la prueba. Posteriormente se establecieron los parámetros que se utilizarían para la comparación del antes y después de las probetas para identificar los cambios ocurridos en 4 técnicas de caracterización: Color a través de las tablas de Munsell; Análisis microscópico con un microscopio estereoscópico marca Motic modelo SMZ-171 con una cámara Moticom de 5MP para la obtención de imágenes; Peso por medio de una Balanza Adam modelo CQT5000; y finalmente un análisis en el cambio químico a través de fluorescencia de rayos X con ayuda de un equipo portátil marca Bruker.

PROBETAS ANTES DE LA EXPOSICIÓN DE INTEMPERISMO



Probetas de intemperismo acelerado antes de ser expuestas a intemperismo según la norma astm g154.

PROBETAS DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A INTEMPERISMO



Probetas de intemperismo acelerado después de ser expuestas a intemperismo según la norma astm g154.

CAMBIO DE COLOR

Se determinó el color utilizando las tablas de Munsell de las cuales se obtuvieron los siguientes valores:

Comparación de color. Antes vs después a la exposición

Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú previo a la exposición

10 YR

Value: 5/

Chroma: /8

5/8

Yellowish brown

Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú posterior a la exposición

7.5 YR

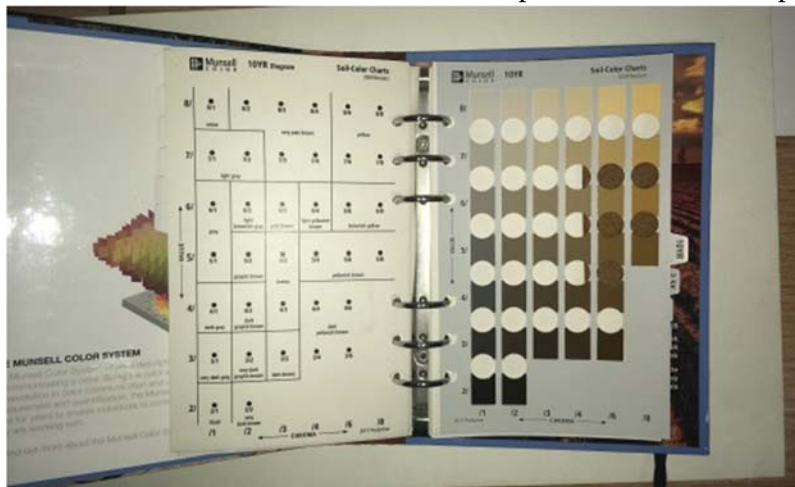
Value: 3/

Chroma: /3

4/6

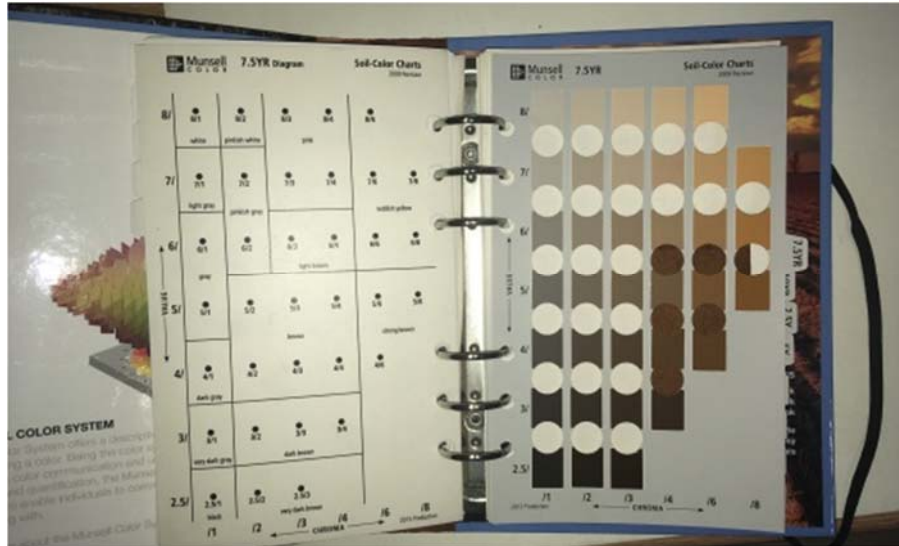
Dark brown

Referencia de color según las tablas de Munsell antes de la exposición a la intemperie.



Color de referencia de probetas antes de ser expuestas a intemperismo según la norma astm g154.

Referencia de color según las tablas de Munsell antes de la exposición a la intemperie.

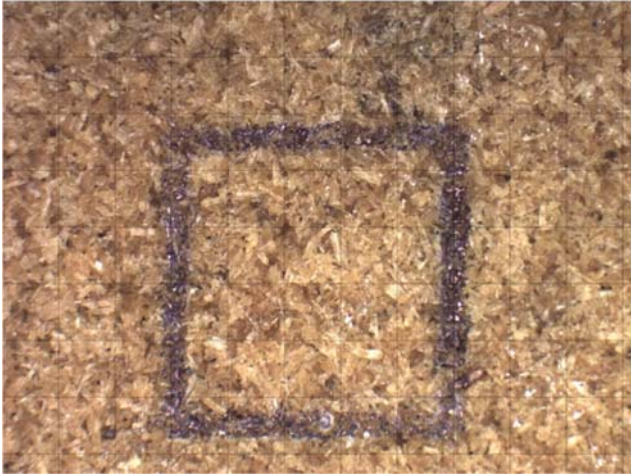
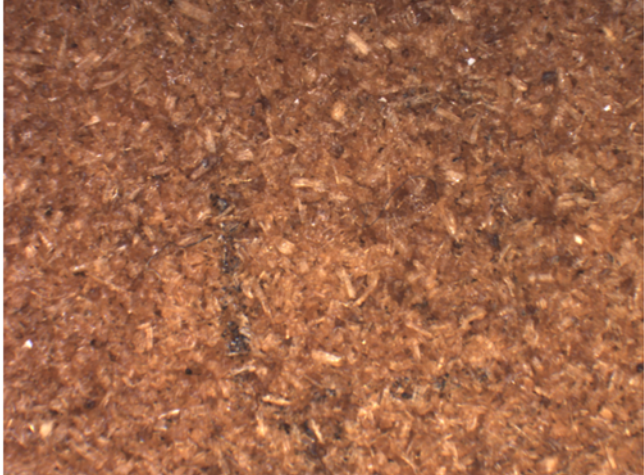


Color de referencia de probetas después de ser expuestas a intemperismo según la norma astm g154.

Se determinó que el cambio de color se debe a la fotodegradación presentada en la resina epoxi, debido a la rotura de las largas moléculas entrelazadas del polímero resultando en cadenas de monómeros más cortas, siendo identificado el cambio visiblemente como un cambio de color. Se complementó este resultado en la caracterización de microscopía óptica.

MICROSCOPIA

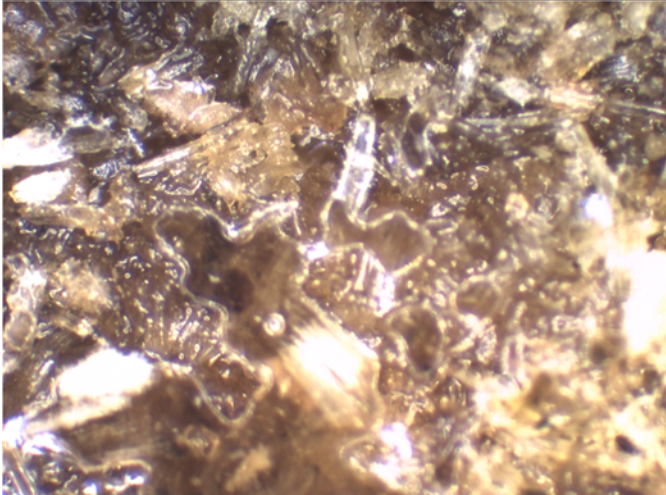
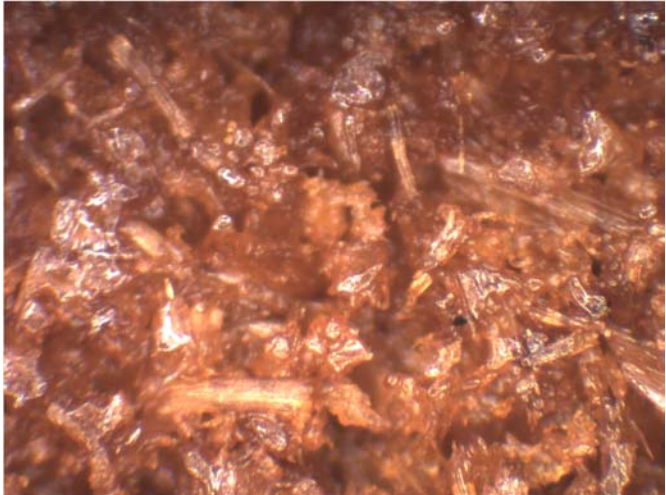
Con esta técnica se analizaron más a detalle los cambios producidos por la exposición a la intemperie. Se identificaron también algunos detalles con problemas de manufactura que pueden repercutir en el comportamiento del material.

Comparación de microscopía óptica 1x. Antes vs después a la exposición	
Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú previo a la exposición. Probeta #1. Aumento 1x	Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú posterior a la exposición. Probeta #1. Aumento 1x
	

Comparación de microscopía óptica 1x, antes vs. después a la exposición

Comparación de microscopía óptica 3x. Antes vs después a la exposición	
Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú previo a la exposición. Probeta #5. Aumento 3x	Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú posterior a la exposición. Probeta #5. Aumento 3x
	

Comparación de microscopía óptica 3x, antes vs. después a la exposición

Comparación de microscopía óptica 5x. Antes vs después a la exposición	
Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú previo a la exposición. Probeta #2. Aumento 5x	Probetas de material compuesto con alto contenido de desperdicio de bambú posterior a la exposición. Probeta #2. Aumento 5x
	

Comparación de microscopía óptica 5x, antes vs. después a la exposición

A través de esta técnica se observa que se trata de un material con alto grado de porosidad lo que favorece la absorción de humedad y el ataque biológico de microorganismos. Se identificó que en la probeta #2 se observa una “mancha” que corresponde a una zona de alto contenido de resina lo cual se atribuye a una manufactura deficiente en la que no se logró un material homogéneo por lo que se debe tener más cuidado al momento de hacer la mezcla para evitar estas zonas de alto contenido de resina. De acuerdo a la escala colocada en la imagen previa a la exposición de escala 1x (cuadrícula a cada milímetro) se confirma que el tamaño corresponde al tamiz utilizado (#50) con una abertura de 0.297mm. Se intuye que la porosidad observada puede resultar en un cambio interesante medido a través de la técnica de evaluación del cambio en peso.

PESO

Con estos datos fue posible determinar que el material en estado normal contiene un promedio del 5% de humedad. Se asume que el cambio en peso se debe a la deshidratación del material durante los ciclos, ya que fue retirado al finalizar el ciclo en seco, lo que sugiere que el material se encontraba totalmente deshidratado. La hipótesis de que el material por ser poroso absorbe humedad quedaría comprobada al cambiar las condiciones del experimento y retirando el material al concluir el ciclo húmedo lo que complementarían los resultados sobre la posible humedad absorbida y no únicamente la contenida.



Fotografías tomadas durante el pesaje de la probeta #2. Antes vs después de la exposición
Se pesaron las probetas antes y después del ensayo y se obtuvieron los siguientes valores:

Cambios en peso de probetas. Antes vs después de la exposición

Probetas	Antes (g)	Después (g)	Cambio (%)
1	5.4223	5.1117	-5.7282
2	8.2629	7.8539	-4.9498
3	7.7312	7.3602	-4.7987
4	6.0785	5.7903	-4.7413
5	5.72	5.3634	-6.2343
6	4.6464	4.4524	-4.1753
7	5.6043	5.3503	-4.5322
8	7.7096	7.3306	-4.9159
9	5.768	5.4311	-5.8408
Promedio	6.327	6.0049	-5.0909

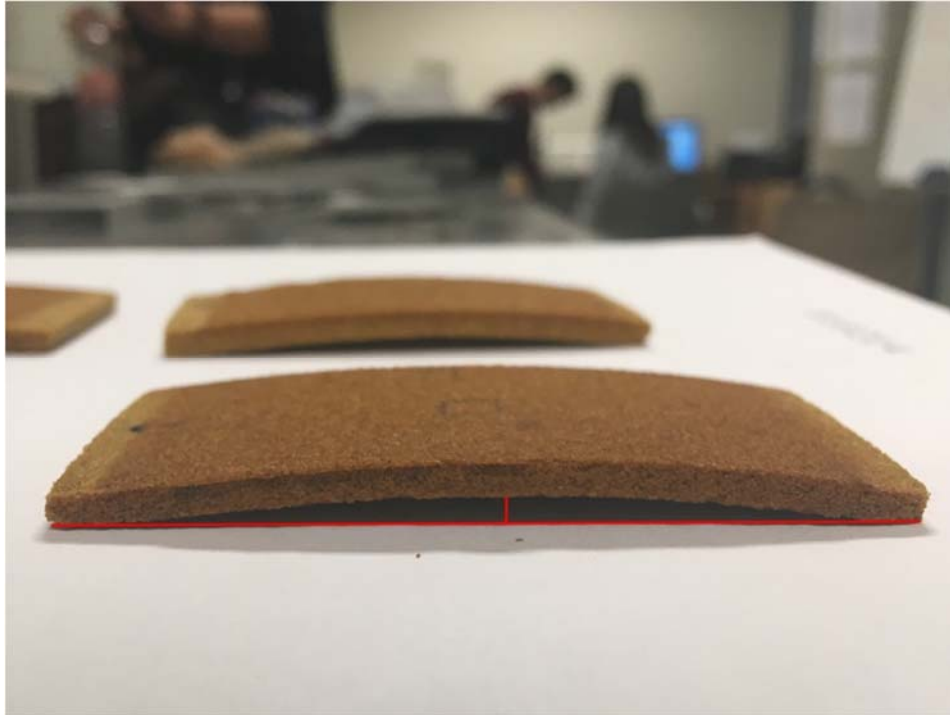
TABLA RESUMEN DE RESULTADOS

Probeta	Peso			Color	
	Antes (g)	Después (g)	Cambio (%)	Antes	Después
1	5.4223	5.1117	5.7282	10YR 5/8	7.5YR 4/6
2	8.2629	7.8539	4.9498	10YR 5/8	7.5YR 4/6
3	7.7312	7.3602	4.7987	10YR 5/8	7.5YR 4/6
4	6.0785	5.7903	4.7413	10YR 5/8	7.5YR 4/6
5	5.72	5.3634	6.2343	10YR 5/8	7.5YR 4/6
6	4.6464	4.4524	4.1753	10YR 5/8	7.5YR 4/6
7	5.6043	5.3503	4.5322	10YR 5/8	7.5YR 4/6
8	7.7096	7.3306	4.9159	10YR 5/8	7.5YR 4/6
9	5.768	5.4311	5.8408	10YR 5/8	7.5YR 4/6
Promedio	6.327	6.0049	5.0909	-	-

Tabla resumen de los cambios observados durante la prueba de intemperismo acelerado

CARACTERÍSTICAS OBSERVABLES

Una observación sobre los cambios observados que me llamó mucho la atención y que quizá sea motivo de iniciar una nueva prueba, fue la de un pandeo de 2.5mm aproximadamente presentado en la mayoría de las probetas, que bien podría atribuirse a la expansión y contracción plástica experimentada por el material durante los cambios de temperatura, lo que me lleva a pensar que el material puede ser vulnerable a la temperatura, sin embargo también podría ser resultado de la geometría misma de las probetas y la característica elástica que el material presenta, por lo que no se puede concluir nada definitivo. Sin embargo, vale la pena resaltar la observación para poder en un futuro evaluar propiamente la contracción plástica generada por el cambio de temperatura.



Pandeo producto de la contracción plástica producida por los bruscos cambios de temperatura producidos en la cámara de intemperismo.

CONCLUSIONES DE LA PRUEBA

- Se compararon los datos observados previos de la exposición a la fuente UV, y se determinó que existe un importante cambio de color, debido a la descomposición química de la resina, cuyo cambio ha sido registrado en investigaciones sobre la misma.
- Hubo un cambio en el peso, lo que se atribuir a una deshidratación del material, con lo que se determinó que la humedad inicial de las probetas rondaba el 5%.
- Se presentó un pequeño pandeo de 2.5mm de las probetas debido a los bruscos cambios de temperatura ocurridos en la prueba, lo que provoca una contracción y expansión plástica que finalmente termina por alabear la probeta.
- Se observa que es un material con alto grado de porosidad lo que favorece la absorción de humedad y el ataque biológico de microorganismos.
- En la probeta #2 se observa que la “mancha” corresponde a una zona de alto contenido de resina. Se debe tener más cuidado al momento de hacer la mezcla para evitar estas zonas de alto contenido de resina.
- De acuerdo a la escala (cuadrícula a cada milímetro) se confirma que el tamaño corresponde al tamiz utilizado (#50) con una abertura de 0.297mm.

A través de esta prueba se reafirmó la conclusión previa obtenida con la información de absorción de humedad. Es definitivo que el material compuesto propuesto, no puede ser expuesto a la intemperie, ya que es vulnerable tanto a la humedad como la contracción plástica producto de los cambios de temperatura así como a posibles ataques biológicos de microorganismos favorecidos por la porosidad observada en el microscopio. Esto nos obliga a desarrollar un prototipo de bloque no estructural estrictamente diseñado para interiores.

CONCLUSIONES

La hipótesis se cumple satisfactoriamente, logrando crear un material compuesto con base en alto contenido de desperdicio de bambú, útil para la fabricación de bloques no estructurales de acuerdo a las normas mexicanas.

Se demostró que el material compuesto diseñado si cumple con los requisitos de resistencia a esfuerzos de compresión mínimos para ser utilizado en bloques no estructurales.

Se identificó la zona de interface entre partículas de refuerzo y matriz como una adherencia mecánica, visible a través de un microscopio óptico.

Se calculó la absorción de humedad, resultando en una absorción de 42% en peso, lo cual no cumple con los requisitos mínimos de las normas mexicanas para bloques no estructurales (27%).

Se identificaron los cambios ocasionados por la exposición a rayos UV, así como temperatura y humedad que simularon un ambiente exterior agresivo, con lo que se concluye que el material presenta una descomposición química observable como cambio de color de transparente a amarillenta, ocasionando un deterioro en el color material.

Habiendo analizado todas las mezclas propuestas, se determinó que la mezcla idónea para cumplir los objetivos propuestos es la lograda a partir de la relación 1:0.5 con fibras de tamaño menor a 0.297mm tamizado con la malla #50, debido a que durante el muestreo se observó el comportamiento adecuado en cuanto a resistencia a esfuerzos de compresión con una menor cantidad de resina que de bambú. Después de analizar todos los parámetros que se requieren para su aplicación en bloques no estructurales, se han encontrado ventajas y desventajas del material, comparándolas con las normas mexicanas para bloques no estructurales:

VENTAJAS

- Supera el parámetro mínimo de la norma mexicana para bloques no estructurales (NMX-C-441_ONNCCE-2005) en resistencia a esfuerzos de compresión (35kg/cm^2), tanto en resistencia máxima (69.63kg/cm^2), como en límite elástico (47.71kg/cm^2). Tiene un módulo elástico de 2284.1 kg/cm^2 .

- La mezcla seleccionada cumple con el objetivo de tener menor cantidad de resina que de bambú, pues la relación en peso es de 1:0.5 (bambú-resina), lográndose una relación volumétrica de 72% de bambú y 28% de resina.
- Se alcanzó un material con una densidad media de 690kg/m^3 . Es decir 34% más ligero en comparación con la densidad de un block no estructural promedio (1040kg/m^3)

DESVENTAJAS

- No cumple el requisito de absorción de humedad máximo establecido por la norma mexicana para bloques no estructurales (27%) ya que su porosidad lo vuelve un material vulnerable en cuanto a la absorción de humedad absorbiendo un promedio de 42%
- Se produce un cambio de color cuando se expone a los rayos ultravioleta del sol.

Se concluye que por resistencia a esfuerzos de compresión el material es totalmente aplicable a un bloque no estructural. Sin embargo, existen cuidados que deben tomarse en cuenta ya que debido a sus características ante la intemperie, el material creado no es una buena opción como para utilizar expuesto a la intemperie. Se propone entonces, producir un bloque no estructural diseñado únicamente para desempeñar en ambientes protegidos de la intemperie, por lo que el campo de aplicación es un bloque no estructural, divisorio de ambientes interiores.

RECOMENDACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DEL MATERIAL:

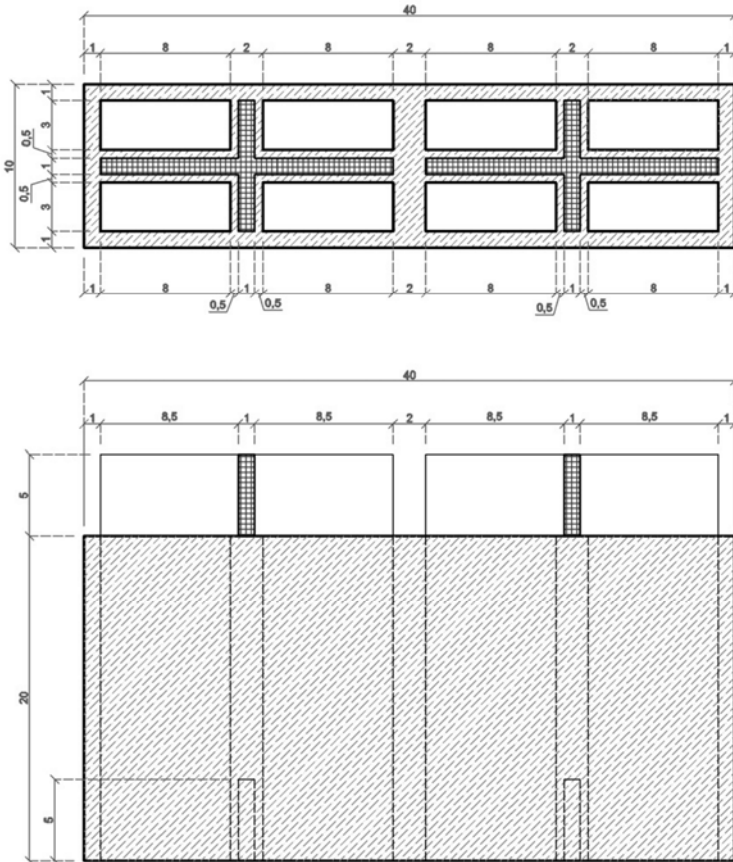
Acabados: El material presenta un acabado poroso y brillante, de un tono café verdoso, que al tacto se siente pulido. El acabado presentado, no puede ser alterado, ya que está determinado por los moldes en los que se fabrican las piezas. De ser necesario, la porosidad del material mismo, puede permitir un acabado fino de tipo yeso o redimix, para lograr una superficie completamente lisa, que posteriormente puede ser pintada de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Mantenimiento: En un escenario común, se recomienda que el material sea rociado con químicos anti hongos, e insecticidas al menos una vez cada 2 años, para garantizar la carencia de pequeñas plagas que puedan arruinar al material. No se recomienda el lavado con manguera o con agua, ya que la porosidad del material favorecería la procreación de insectos y hongos por la humedad.

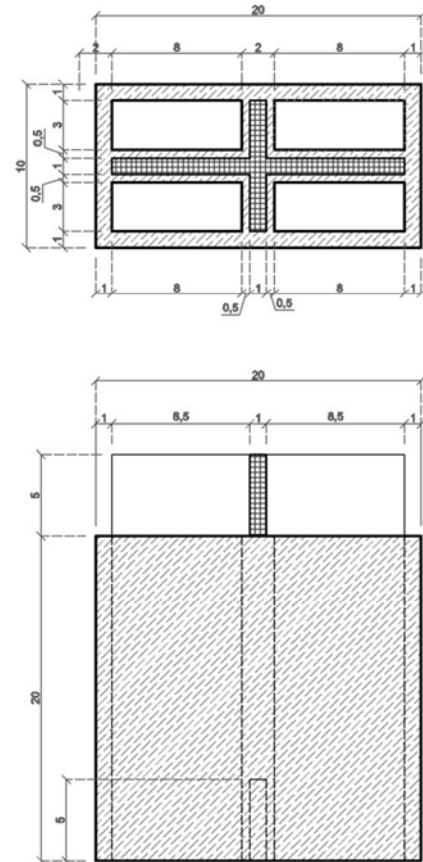
APLICACIÓN DEL MATERIAL

Se propone aplicar el material a través de bloques no estructurales con función en interiores. Se ha diseñado el block con la característica principal de carecer de mortero como método de unión del sistema, usándose ensambles que permitan construir de manera simple, limpia, y reutilizable. El bloque que se propone tiene las siguientes características:

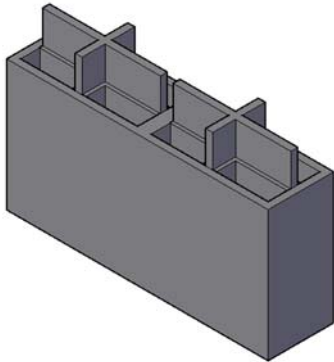
Diseño de Pieza de Block (plano en cm):



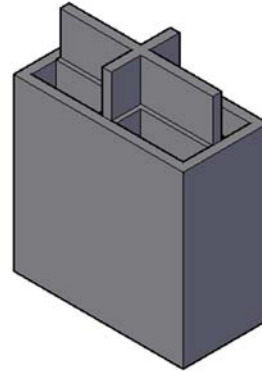
Diseño de Pieza de Ajuste Horizontal:



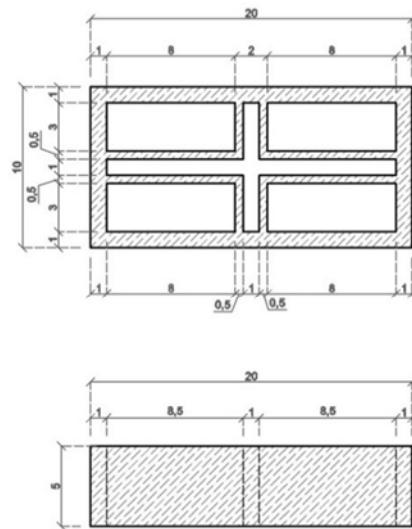
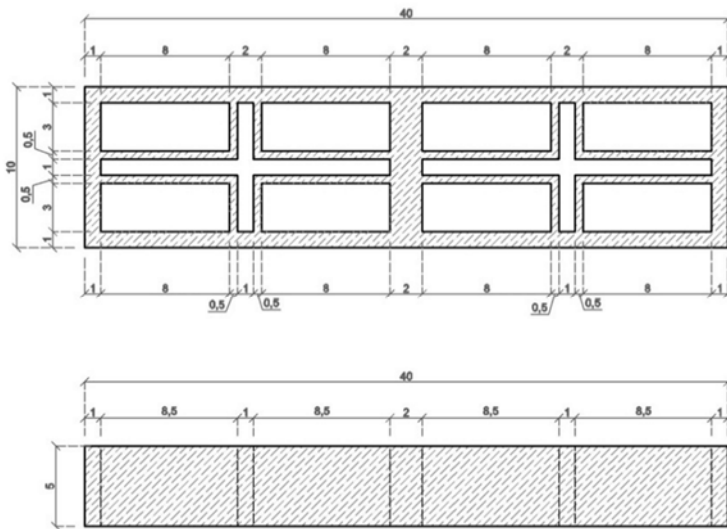
Isométrico del Bloque prototipo:



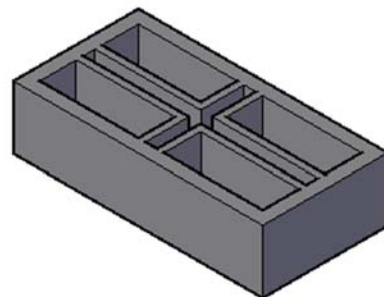
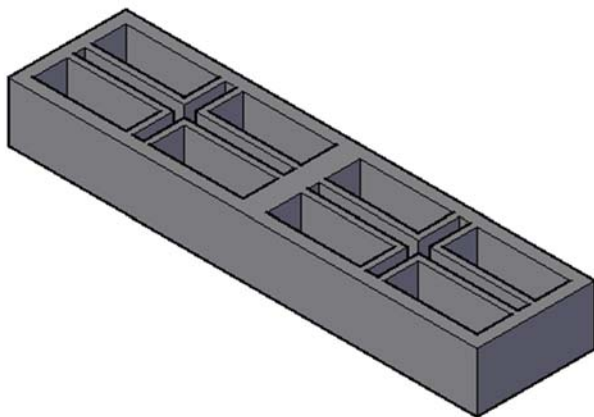
Isométrico de la pieza de ajuste horizontal:



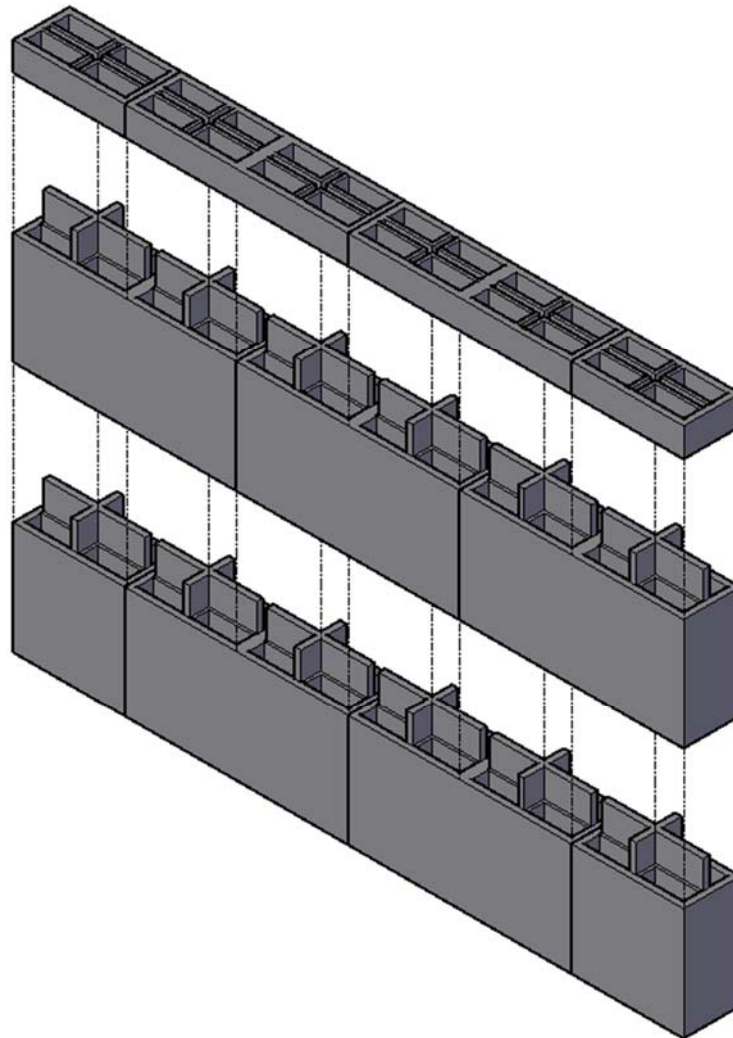
Diseño de Piezas de Ajustes Verticales:



Isométrico de las piezas de ajuste Verticales:



Isométrico de ensamble de piezas:



Estructuración: Funcionará mediante un ensamble tipo “lego” en el cual cada pieza embonará con precisión a las piezas que se encuentran debajo, lo que permite una rápida construcción de muros divisorios, dejando la posibilidad de ser transportado a una nueva ubicación si así se requiere, sin tener que destruir el muro previo.

Limitantes constructivos y formales: Como limitante constructivo, es la carencia de resistencia estructural, así como una posible debilidad ante movimientos de carga lateral, lo que podría representar algún tipo de inconveniente al momento de ejecutar en zonas sísmicas

POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La presente tesis involucra un primer acercamiento a las posibilidades que el bambú puede ofrecernos, sin embargo es un largo camino el que falta por recorrer. Como algunas opciones que se proponen para continuar con esta línea de investigación, son:

- Buscar una mezcla que involucre distintos tamaños de fibras, pudiendo quizá seguir la curva granulométrica del concreto para lograr resultados más eficientes.
- Dentro del material compuesto, sería una buena idea buscar una matriz de resinas naturales que pudiera garantizar la sustentabilidad total del material, tales como baba de nopal.
- Conociendo las ventajas y desventajas del material diseñado, es preciso decir que formalmente, podría rediseñarse la propuesta de block, con el fin de lograr distintos objetivos, tales como rapidez de construcción, bloques estructurales, construcciones de cambio continuo, construcción con instalaciones integradas, construcciones aislantes, o repelentes, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, Donald R., and Pradeep P. Phulé, *Ciencia E Ingeniería de Los Materiales*, ed. by International Thomson Editores, 3a edn (México, D.F.: International Thomson Publishing, 2004)
- ASTM international, 'Compressive Properties of Rigid Plastics', *Technology*, 2002
- , 'Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials', *Technology*, 2000, 1–9 <<https://doi.org/10.1520/G0154-06.2>>
- ASTM International, 'Standard Test Method for Water Absorption of Plastics', *ASTM International*, 16 (1998), 1–4 <<https://doi.org/10.1520/D0570-98>>
- Bjørn, Berge, *The Ecology of Building Materials*, ed. by Elsevier, Second Edn (Linacre House, Jordan Hill, Oxford, UK: Architectural Press, 2009)
- Callister, William, *Materials Science and Engineering: An Introduction, Materials Science and Engineering*, 7th edn (Utah, USA: John Wiley and Sons, Inc, 2007), XCIV <[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90343-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90343-0)>
- Cedeño Valdiviezo, Alberto, and Jaime Irigoyen Castillo, 'El Bambú En México', *Arquitectura E Urbanismo*, 1 (2011), 223–43
- Cigarroa Espinosa, Christian Ivett, 'Biocompositos (Materiales de Residuos Aplicados a La Arquitectura)' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2017)
- Cortés Rodríguez, G. R., 'Los Bambúes Nativos de México', *CONABIO, Biodiversitas*, 30 (2000), 12–15
- Cuéllar, Alneira, and Ismael Muñoz, 'Fibra de Guadua Como Refuerzo de Matrices Poliméricas', *Dyna*, 77 (2010), 137–42 <<https://doi.org/10.15446/dyna>>
- Dávila, José, Salomé Galeas, Víctor Guerrero, Patricia Pontón, Nelly Rosas, Verónica Sotomayor, and others, *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*, ed. by Victor Hugo Guerrero, 1ra Edició (Quito, Ecuador: Imprefepp, 2011)
- Dávila Moreno, María Elena Nancy, and Samuel Immanuel Brugger Jakob, *El Aprovechamiento Del Bambú Para Impulsar El Desarrollo Económico Sustentable En México*. (México, D.F., 1973)
- Delgado Trujillo, Antonio, Enrique De Justo Moscardó, Javier Lozano Mohedano, and María Concepción Bascón Hurtado, 'Tema 4: Esfuerzos Y Solicitaciones' (Sevilla, España, 2011), p. 40 <<http://personal.us.es/ejem/wp-content/uploads/2016/02/T04-Esfuerzos-internos.pdf>> [accessed 16 November 2017]
- Flores Gómez, Ricardo, 'Diagnóstico de La Industria Del Plástico En México' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013)

- Freitas, Domingos, 'Fibrenamics', 2017 <<https://www.web.fibrenamics.com/es/conocimiento/las-fibras/>> [accessed 28 November 2017]
- Guadalupe, Zaragoza Hernández Idalia; Borja de la Rosa Amparo; Zamudio Sánchez Francisco; Ordoñez Candelaria Victor; Bárcenas Pazos, 'Anatomía Del Culmo de Bambú', *Madera Y Bosques*, 20 (2014), 87–96
- Hernández, Agustín Hernández, and Magdalena Trujillo Barragán, 'Metodología Para Determinar Esfuerzos de Diseño Del Bambú', *Academia XXII*, 7 (2016), 39–55
- INEGI, 'Viviendas Y Sus Ocupantes Según Características de Las Viviendas', *Material En Paredes Y Material En Pisos*, 2000 <http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=17164> [accessed 3 March 2018]
- José, Ramón Mercedes, *Serie de Recursos Naturales Guía Técnica Cultivo Del Bambú*, Primera Ed (Santo Domingo, República Dominicana: Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, Inc. (CEDAF), 2006) <<https://doi.org/10.1007/s11250-012-0216-z>>
- Lucena, María P, Alejandro Suarez, and Ivonne Zamudio, 'Desarrollo de Un Material Compuesto a Base de Fibras de Bambu Para Aplicaciones Aeronauticas', *Revista Latinoamericana de Metalurgia Y Materiales*, 1 (2009), 1107–14
- Martha, Ordóñez Candelaria Victor Rubén y Bárcenas Pazos Guadalupe, 'Propiedades Físicas Y Mecánicas de Tres Especies de Guaduas Mexicanas (Guadua Aculeata, Guadua Amplexifolia Y Guadua Velutina)', *Madera Y Bosques*, 20 (2014), 111–25
- Morán Ubidia, Jorge, *Construir Con Bambú*, ed. by Yann Barnet and others, 3a edn (Lima, Perú: INBAR, 2015)
- Moreno Montoya, Luis Edgar, Lina Rocío Osorio Serna, and Efraín Eduardo Trujillo De lo Ríos, 'Estudio de Las Propiedades Mecánicas de Haces de Fibra de Guadua Angustifolia', *Ingeniería & Desarrollo*, 1 (2006), 125–33
- ONNCCE, 'NMX-C-441-ONNCCE-2005. Industria de La Construcción-Bloques, Tabiques O Ladrillos Y Tabicones Para Uso No Estructural-Especificaciones', 2005
- Ordóñez Candelaria, Victor Rubén, Teresa Mejía Saulés, Guadalupe M. Bárcenas Pazos, and Instituto de Ecología A.C. (Inecol)., *Manual Para La Construcción Sustentable de Bambú* (CONAFOR, Comisión Nacional Forestal, 2011) <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>
- Osorio, Jairo Alexander, Juan Manuel Vélez, and Héctor José Ciro, 'Estructura Interna De La Guadua Y Su Incidencia En Las Propiedades Mecánicas', *Dyna*, 74 (2007), 81–94
- Osorio Saraz, Jairo Alexander, Albeiro Espinosa Bedoya, and Eduard A. Garcia Galeano, 'Evaluation of Mechanical Properties of the Internal Structure of the Guadua With Matematical Modelling', *Dyna*, 76 (2009), 169–78 <http://dyna.unalmed.edu.co/ver_resumen.php?id_articulo=a16v76n160>

- Oviedo, Universidad De, 'Síntesis de Polímeros. Técnicas de Polimerización', *Escuela de Ingeniería de Minas, Energía Y Materiales* (Oviedo, España, 2012), p. 160 <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T2.1-MPyC.Tema2.TecnicasPolimerizacion.pdf>> [accessed 16 November 2017]
- Pérez Alonso, Carlos, 'Naval Composites: Los Materiales Compuestos Y La Industria Naval' (Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Nautica de Barcelona, 2016)
- Pérez Gonzalez, Rodrigo Rafael, 'Reaprovechamiento Del Plástico En Elementos Arquitectónicos. PET Reciclado Para La Obtención de Elementos Modulares Plásticos' (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013)
- Sampieri, R Hernández, and P Baptista Lucio, *Metodología de La Investigación*, ed. by McGraw Hill, 4th Editio (Mexico, 2006)
- Vigil Montaña, Reyes, Alejandra Pastoriza Martínez, and Inés Fernández de Piérola, *Los Plásticos Como Materiales de Construcción*, 1a edn (Madrid, España: SAFEKAT, S.L., 2002)