

POLARM Compuesto de ARamida con matriz POLimérica



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
POLARM: Compuesto de aramida con matriz
polimérica en estructuras arquitectónicas

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de Tecnologías

PRESENTA:
Arq. Jesús Eduardo Moctezuma Perea

TUTOR PRINCIPAL
Mtro. en Arq. Alejandro E. Marambio Castillo
Facultad de Arquitectura UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz
Facultad de Arquitectura UNAM

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos
Facultad de Arquitectura UNAM

CDMX, Julio 2020





Universidad Nacional
Autónoma de México

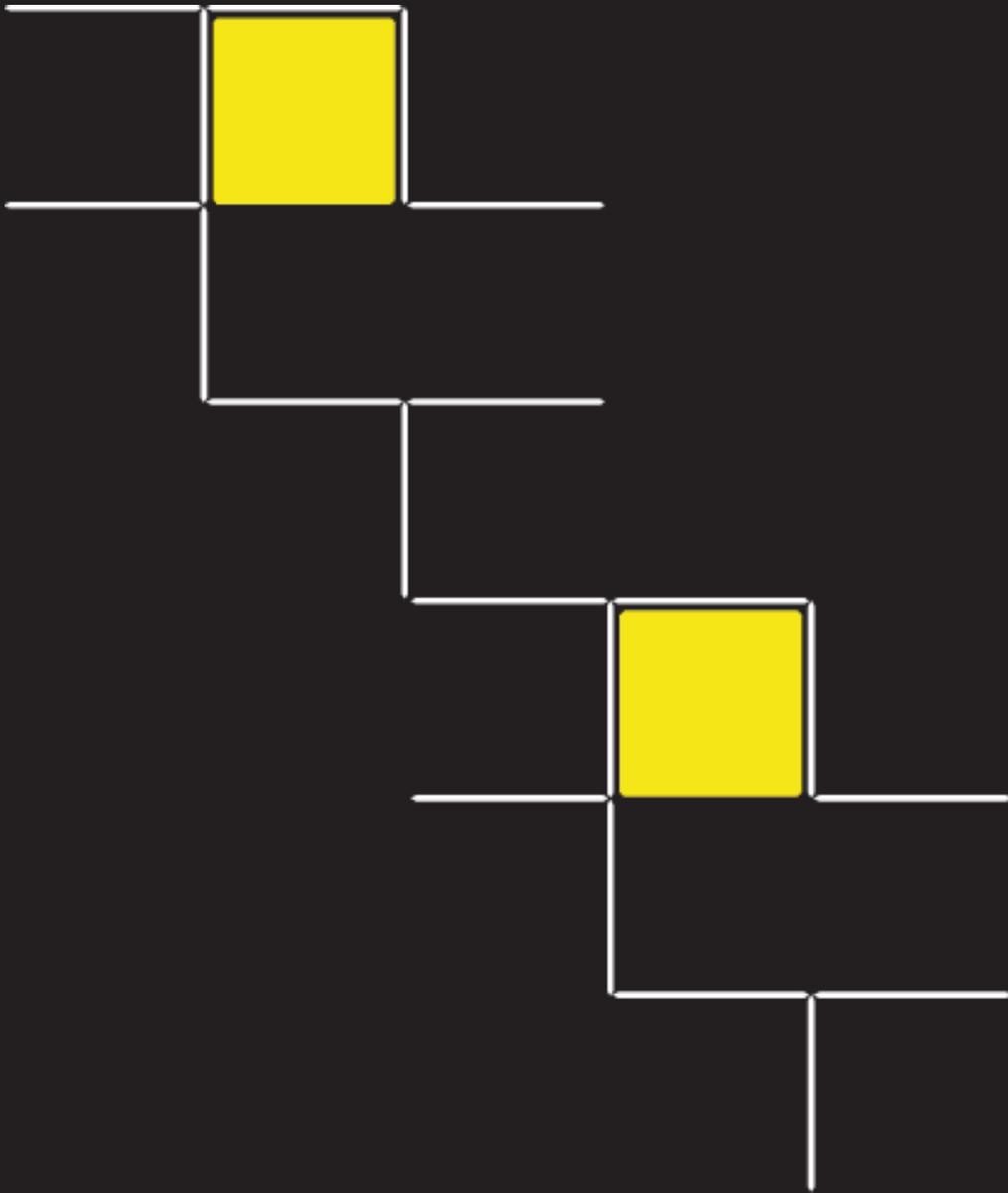


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



POLARM: Compuesto de aramida
con matriz polimérica
en estructuras arquitectónicas



Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me brindaron su apoyo para lograr concluir este ciclo de mi vida, espero poder dar siempre lo mejor de mi y seguir creciendo como persona.

Pro mi raza hablara el espiritu.

Comité sinodal:

M. en Arq. Alejandro E. Marambio Castillo
M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz
M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos
Dr. en Ing. Alejandro Solano Vega
M. en Arq. Rodrigo Rafael Pérez González

Indice

Introducción

I Antecedentes en Arquitectura

1.1 Mesopotamia	12
1.2 Egipto	12
1.3 Sumerios	14
1.4 Minoicos y Micénicos	15
1.5 Cultura Paleo Cristiana	15
1.6 Arquitectura Budista	16
1.7 Arquitectura Funcionalista	16

II Materiales y sus usos en Arquitectura

2.1 Materiales simples	20
2.1.1 Metales	21
2.1.2 Cerámicos	23
2.1.3 Polímeros	24
2.2 Materiales compuestos	
2.2.1 Características generales	25
2.2.2 Fibras Naturales	28
2.2.3 Fibras de vidrio	31
2.2.4 Fibras de carbono	33
2.2.5 Nuevos materiales compuestos fibroplasticos en la arquitectura	36
2.2.6 Procesamiento y producción en arquitectura	39
2.2.7 Usos y ejemplos en la arquitectura	
2.3 Aramidas	
2.3.1 Características generales	41
2.3.2 Propiedades específicas	42
2.3.3 Casos de uso en arquitectura	50

2.4 Polipropileno	
2.4.1 Características generales	52
2.4.2 Propiedades específicas	53
2.4.3 Casos de uso en arquitectura	53
2.5 Materiales compuestos con aramida	54
III POLARM (aramida + polipropileno)	
3.2 Caracterización de los materiales	69
3.3 Determinación del compuesto	70
3.4 Procedimiento de ejecución	70
3.5 POLARM en la arquitectura; posibles usos	71
3.6 Protocolo de experimentación	73
3.7 Instrumentos de medición	74
3.8 Creación de muestras	75
3.8.1 Diseño	77
3.8.2 Creación	81
3.9 Aplicación y validación	
IV Simulación	
4.1 Antecedentes y ejemplos en la simulación	88
4.2 Herramientas de simulación	89
4.3 Método de simulación	95
4.4 Análisis e interpretación de resultados	96
4.5 Hacia la primera experimentación	101
Conclusiones	103
Glosario de terminos	108
Bibliografía	109

POLARM Compuesto de ARamida con matriz POLimérica

INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda los materiales compuestos con bases poliméricas como una opción factible para su uso dentro de diversas aplicaciones en el campo de la arquitectura ya que hoy en día los nuevos usos y exigencias del diseño presentan nuevos retos que van dejando de lado los materiales convencionales, partiendo de la hipótesis que asevera que un material compuesto por dos o más materiales tiende a tener un mejor rendimiento o mejora en sus propiedades mecánicas tales como resistencia a flexión o a compresión entre otras.

Tras una ardua investigación se llegó a la afirmación que el material que a continuación se desarrolla a lo largo de esta tesis tiene un alto potencial de mejorar sus capacidades físicas como las resistencias a flexo-compresión así como características adicionales tales como la ligereza y sus propiedades para retardar los agentes corrosivos como el fuego y algunos solventes como bien se ilustra dentro de la simulación asistida por computación donde se muestra un comportamiento positivo dentro de algunas de las pruebas realizadas.

Esta tesis comenzó por la inquietud de tener materiales alternos que pudieran generar herramientas para sistemas constructivos más simples dentro de la arquitectura, partiendo de la evolución que se ha observado a lo largo de los años en diferentes culturas y como han tenido nuevas soluciones a problemas cotidianos del diseño y la construcción.

Los estudios que se especializan en la generación de nuevos materiales tienden a estar sujetos a varios ensayos de prueba y error que en muchas ocasiones es inviable de solventar para desarrollos o investigadores que no tienen acceso a los materiales y equipo necesario para realizar las pruebas específicas que requiere cada nuevo material, por este motivo se cree que una de las opciones más amigables para nuevos investigadores es la simulación asistida por computadora, además de que no se requiere de maquinarias costosas y procesos extensos permite jugar con diferentes valores y los errores son menos costosos o a veces nulos.

La simulación si bien es una herramienta que en nuestros días es una opción alterna para aquellos investigadores jóvenes que no tienen un gran presupuesto para invertir, no suple a las

pruebas y normativas por las cuales un material tiene que pasar para ser aprobado.

Tomando como referencia otras disciplinas como la mecánica o la aeronáutica en donde se generan modelos complejos para someterlos a simulaciones extensas se rescata la idea primordial que plantea que una simulación ayuda a bajar los costes de inversión inicial y ayuda a prever si un modelo o material es factible para proceder al siguiente paso de la investigación que sería la generación de prototipos. En una escala industrial esto podría presentar inversiones de millones de pesos que impactan en la viabilidad de ciertos productos.

La literatura del TRL por sus siglas en inglés Technology Readiness Level desglosa una serie de nueve puntos o pasos para el desarrollo de productos tecnológicos, ya sean materiales, métodos o alguna herramienta que requiera de una experimentación previa a su distribución. La presente investigación se centra en los primeros cuatro pasos del TRL que constan del desarrollo de principios básicos observados, la creación de un concepto o aplicación, la aplicación de pruebas experimentales (simulación) y la validación del prototipo mediante pruebas físicas.

El primero de los puntos a tratar dentro del método tiene como alcance primario encontrar las características esenciales de aquello que se está por investigar, obteniendo así la mayor de las ventajas posibles y estudiando también el posible funcionamiento evaluando su comportamiento y su sistema.

Comprendiendo los valores fundamentales del objeto a estudiar se pretende alcanzar una segunda etapa que está basada en el entendimiento o comprensión del objeto a estudiar pudiendo plantear un esquema o prototipo inicial que sirva de base para la investigación, se elabora un diseño primario y se establecen puntos a desarrollar y plasmar para la prueba posterior de simulación.

Una vez obtenido el estudio preliminar y analizando la factibilidad del prototipo se continua con el desarrollo y factibilidad técnica que tiene como fundamentación la literatura que recopile información fiable y veraz sobre pruebas o prototipos previos, partiendo de un análisis crítico y llevando a la mesa una compilación de ideas solidas. En esta etapa es pertinente la

POLARM Compuesto de ARamida con matriz POLimérica

realización de un modelo simulado para determinar y validar las características del producto.

Continuando con el proceso de diseño nos encontramos con una etapa de prototipaje burda, en donde la idea clave es tener un objeto (prototipo) perfectible que contenga todos los elementos de la investigación previa, con el fin de que al ser sometido a pruebas físicas en un laboratorio pueda acercarse a los resultados obtenidos en la simulación, este proceso es muy importante ya que recaba información valiosa que retroalimenta el diseño preliminar.

Tomando en cuenta el método de desarrollo y debido a los problemas técnicos que tuvo la investigación se optó por centrarse hasta las pruebas de validación del concepto o producto y realizar un proceso de simulación para demostrar su factibilidad técnica mediante pruebas mecánicas aplicadas en un software especializado para la simulación asistida por computadora.

Esta investigación recopila y trata de entender los procesos evolutivos de los materiales, así como las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los materiales estudiados a continuación, si bien hay un campo extenso para la elección de materiales para generar un nuevo compuesto, se partió de uno en específico que es la Aramida ya que por sus propiedades tan nobles lo volvía un candidato ideal para ser estudiado en el campo de la arquitectura.

Esta tesis no pretende crear verdades absolutas, más sin en cambio muestra el desarrollo y esfuerzo a lo largo de tres años para llegar al resultado que se tiene hoy en día.



Capítulo I : Antecedentes de materiales en la arquitectura

1 ANTECEDENTES EN ARQUITECTURA

A lo largo de los años la arquitectura ha sido y seguirá siendo una parte muy importante en nuestras vidas como seres humanos. La arquitectura no solo nos sirve como refugio para protegernos de las inclemencias del clima, sino que nos ha hecho seres sedentarios que construyen ciudades para poder tener la oportunidad de convivir en sociedad.

Desde Mesopotamia en el milenio IV a.C. podemos ver ésta transición entre un asentamiento rural a algo más complejo, lo que genero un sentimiento de apropiación y de cuidado por el medio que nos rodea, procurando que las soluciones para el funcionamiento de nuestra arquitectura sea el más eficiente para cada lugar en el que esta se inscribe.

Sin duda la oportunidad que la arquitectura no dota al ser un objeto poco perecedero es el de poder estudiar cómo es que estos elementos fueron concebidos y construidos, aquí es donde radica la importancia de la conservación de nuestra tan amada arquitectura. Hay y seguirá habiendo muchas teorías que se contraponen al

conservadurismo de nuestro patrimonio, pero creo firmemente que nuestra historia es aquello que nos hace ser humanos y entender nuestros procesos de consolidación como sociedad. Ya que mucho impacta la forma en la que vivimos un espacio hacia nuestros usos y costumbres.

No hay ni habrá una arquitectura genérica puesto que cada gramo de la esencia de nuestras obras responde a lo más esencial de la vida, un cómo, un cuando, un dónde y un por que, aseveraciones que conservan la diversidad de la vida en el planeta.

Al iniciar el proceso de conceptualización de un nuevo asentamiento los constructores miraban a su alrededor esperando encontrar en la naturaleza aquellos elementos con los cuales empezar a edificar su ciudad, ya que era prácticamente imposible buscar otros materiales que se encontraran a miles de kilómetros de distancia. Pero con las tecnologías este proceso fue cambiando poco a poco, hasta que hoy en día prácticamente podemos conseguir materiales de cualquier parte del globo terráqueo. Tal vez no sea lo más práctico pero nos ha ayudado a expandir nuestra frontera del conocimiento y la experimentación en

cuanto a materia les para la construcción se refiere.

La mayoría de los materiales con los cuales construimos, sino es que todos, son materiales compuestos. Un material compuesto es la unión de dos o más elementos que difieren tanto en composición química como en su forma y que son esencialmente insolubles entre sí. El objeto principal de los materiales compuestos es el de combinar cualidades de los materiales para obtener mejores resultados a la hora de la aplicación.

Dentro de la historia de la arquitectura encontramos una gran diversidad de materiales que se han usado para edificar un sin fin de obras, estos materiales tienen una gama que se extiende tecnológicamente hasta hoy en día.

A lo largo de este capítulo encontraremos una breve explicación de cómo han ido evolucionando los materiales y del porqué de este fenómeno. También analizaremos los factores físicos de los mismos, esperando se entiendan las características que pueden tener y a qué se debe este comportamiento.

Antiguamente la cartera de materiales que teníamos disponibles para la construcción

si bien no eran escasos, no se comparaba para nada con los que contamos actualmente.

En la antigüedad se construía con materiales próximos al sitio de edificación, lo que condicionaba en gran medida el diseño del objeto. Éste podía estar limitado en su resistencia como material matriz o bien en su geometría, esto llevó a que se buscara una forma de encontrar una combinación entre materiales que aumentara sus propiedades mecánicas. Es el caso, por ejemplo, del adobe, que se ha ido perfeccionando poco a poco desde sus inicios, con simples fibras naturales como paja, que le daban la propiedad flexible al bloque y las arcillas que otorgan rigidez y aglutinan la mezcla, hasta el día de hoy, en que la paja puede ser suplida por fibras sintéticas que refuerzan las propiedades flexibles del material pero que sigue conservando la esencia del mismo.

Capítulo 1: Antecedentes de Materiales en la Arquitectura

1.1 MESOPOTAMIA

En la arquitectura Mesopotámica, hacia el IV milenio a.C., encontramos vestigios de bloques de piedra o de compuestos con arcilla que eran la base de la arquitectura, en estas construcciones encontramos un factor determinante para que las edificaciones se mantengan en pie y este factor es la geometría del objeto. El ancho del muro era esencial para soportar las cargas tanto verticales como horizontales.

Dentro de la arquitectura Mesopotámica encontramos una diversidad de soluciones para las construcciones, como es el caso de la *Srefa* que es un tipo de vivienda con una techumbre de parábola invertida hecha con juncos que funcionan como estructura principal recubierta con barro. En este caso vemos un aprovechamiento de las propiedades mecánicas de cada componente.

Por un lado, los juncos que edifican una estructura rígida pero que por si solos no logran solventar las inclemencias del tiempo, allí es donde entra en acción el barro, amalgamando el sistema y convirtiéndolo en una estructura con componentes mixtos.

1.2 EGIPTO

Los egipcios del periodo de la Dinastía (3100-2600 a.C.) también adoptaron la posición de crear la mezcla de sus materiales derivando así el tan conocido adobe que proviene de la antigua palabra egipcia *djbet* que significa ladrillo.

El *djbet* estaba compuesto por barro del Nilo como componente principal. Con el paso de los años y debido a las demandas constructivas que se requerían se tuvo que migrar a un material diferente que lograra funcionar como ellos querían y es donde surge “la era de las Pirámides” (2686-2125 a.C.).



Ilustración 1: Construcciones con adobe en el antiguo Egipto

Las pirámides fueron construidas con piedras calizas de la región y gracias a ella se pudieron lograr construcciones más atrevidas, ya que la preocupación por las fuerzas verticales había desaparecido, el único

inconveniente era la geometría sobre la cual se basarían para crear sus construcciones. En las pirámides observamos una forma orgánica, y por orgánica me refiero a que es una forma natural en la que los materiales tienden a reposar, además que las figuras piramidales son las geometrías naturales más estables que se conocen, lo cual hacía perfecta la combinación del sistema constructivo con el material. La piedra caliza al igual que el adobe es un material compuesto generado por la clasificación que se obtiene con la disolución en aguas con altos índices de dióxido de carbono (CO₂), por lo que obtenemos la siguiente composición:



Donde:

- CaCO₃ es Carbonato de calcio
- H₂O es Agua
- CO₂ es Dióxido de carbono

La piedra caliza por si sola tiene una resistencia a la compresión de 128.0127kg/cm² que se refiere al peso puede soportar el material antes de tener un punto de ruptura.

En comparación, el adobe tiene apenas una resistencia de tan solo 3 a 5kg/cm². Por estos motivos observamos una evolución natural en la forma

como concebimos los posibles materiales con los cuales trabajaremos sobre un proyecto.

Todas las propiedades mecánicas que los materiales tienen se adaptan para cada tipo de estructura, funcionamiento, capacidad de población, etc. lo importante es saber utilizar de manera adecuada aquellos que nos resulten más eficientes.

En la comparativa piedra caliza-adobe encontramos diversos factores que podemos analizar, uno de éstos es la densidad del material. Por un lado, encontramos a la piedra caliza, que tiene una densidad de 2500kg/m³, ésta se refiere a la cantidad de material existe en cierto espacio dentro del compuesto, lo cual lo hace un material perfecto para la baja transmisión de radiación solar hacia el interior, pero ¿qué pasa si se quisiera usar en una vivienda común y corriente como en el caso de los Egipcios?

En este caso evaluamos que no solamente porque tenga una gran densidad y su resistencia a la compresión sean muy buenas éste va a ser el material correcto para el uso que requerimos. Es entonces donde el adobe con su densidad de 1500 a 1700kg/m³ es un perfecto componente para la aislación térmica ya que en esos espacios donde no se encuentra material habrá aire, que es un elemento

Capitulo 1: Antecedentes de Materiales en la Arquitectura

esencial para la aislación térmica, lo cual hace más confortante su disposición para el uso doméstico.

Hacia el periodo Medio y Tardío Egipcio (2040a.C.-300d.C.) con la necesidad de seguir construyendo a lo largo del río Nilo los egipcios recurrieron a otro tipo de materiales pétreos naturales como la piedra arenisca y el granito que extraían de canteras cercanas a la zona.

Estas construcciones con piedra principalmente eran templos de ceremonias en donde solo accedían los sacerdotes y personas de sangre noble. Estos materiales permitieron aparte de generar una arquitectura completamente innovadora, un desarrollo en la escultura arquitectónica, en elementos portantes que además eran estilizados gracias a la naturaleza de la arenisca porosa, que por tener una densidad de $2400\text{kg}/\text{cm}^3$ la hacía ideal para poder tallarla con figuras icónicas de los faraones o con simple formas ornamentales.

1.3 Sumerios

Esta civilización es un paso muy importante en la evolución de los materiales ya que no se conforman con la mezcla de materiales de la zona, ni con

la extracción de piedras de las zonas canteras.

La aportación más significativa es la de la cocción de los ladrillos de arcilla, lo que lograría la cristalización de los minerales de la tierra formando un proceso similar al de la creación natural pero creada por humanos. Ésto generaría lo que conocemos hoy como ladrillo cocido, éste ladrillo tiene como propiedades mínimas de resistencia a la compresión de $60\text{kg}/\text{cm}^2$ lo cual es una resultante de más de 10 veces el valor que nos arrojan las arcillas sin cocimiento como el adobe.

Gracias a estos avances se lograron construir obras como La Puerta de Ishtar en el año 600 a.C., además de tener un material más manejable se le modificó la tonalidad con pigmentos naturales por lo que empezamos a ver una química muy básica sobre las modificaciones que podemos hacer sobre el material base¹.



Ilustración 2.- Puerta de ishtar Babilonia

1.- Daniel Borden, Jerzy Elzanowski, Cornelia Lawrenz, Daniel Miller, Adele Smith y Joni Taylor. Architecture a World History. Barcelona, España: Blume, 2009.

1.4 MINOICOS Y MICENICOS

El aporte que tuvo esta cultura fue el de mezclar materiales para la generación de nuevos sistemas en cuanto a la inclusión de capas. El sistema estructural que encontramos es muy similar al de todas las culturas de su periodo (2700 a 1200 a.C.) con muros gruesos que fungían de base estructural. Lo interesante aquí es la diversidad con las que eran construidos, lo cual iba desde adobe, piedra natural y el agregado de yeso, que sin duda podemos apreciar en la Puerta del León en Micenas Grecia (1250 a.C.)²



Ilustración 3.- Puerta del León en Micenas

En este punto de la historia nos dimos cuenta de que los materiales para la construcción no solo eran eso, sino que también podían implementarse nuevos materiales para dar una evolución estética y diferente a las construcciones. Algo que dotaba de carácter propio a las mismas estructuras y que además de ser ornamentales

también funcionaban a la hora de incrementar o mejorar las propiedades básicas de las edificaciones.

1.5 CULTURA PALIO CRISTIANA

Aquí es donde encontramos la mayoría de las innovaciones que entendemos como arquitectura clásica, desde los acueductos romanos, el Partenón griego, el Panteón de Agripa, etc. Lo destacable de esta arquitectura es la innovación en las formas de construcción y en las geometrías usadas para resolver aquellas obras monumentales.

Encontramos también una gran diversidad de materiales a la hora de catalogar las construcciones. Por ejemplo, el Partenón es totalmente hecho de mármol pentélico y la cubierta construida con una estructura de madera en donde descansan tejas de mármol, lo interesante de esto es el uso de elementos que trabajan a flexo compresión para librar claros más largos y poder generar al interior espacios más abiertos.

El éxito de estas construcciones se debe al uso de las matemáticas para la resolución de las construcciones.

2.- Richard Rogers & Philip Gumuchdijan. Architecture the Whole Story. London, England: Quintessence Editions Ltd, 2014.

Capítulo 1: Antecedentes de Materiales en la Arquitectura

1.6 ARQUITECTURA BUDISTA

En la cultura oriental encontramos un mayor avance en el uso de los materiales y las formas constructivas, como el caso del templo de *Kofuku-ji* (600 d.C.) en Japón. Estos templos fueron inspiración de las estupas indias que tenían una forma muy esbelta y lograron consolidar torres de cinco niveles construidas totalmente con madera en la estructura con un tejado con vértices apuntados. Ésta es una de las ventajas que otorgó la construcción en madera, ya que es un material muy noble y fácil de trabajarlo, además de que es relativamente renovable a diferencia del proceso por el cual una piedra logra consolidarse. Actualmente este templo sigue en pie y es uno de los más antiguos del mundo, lo cual nos indica que la madera es bastante longeva siempre y cuando tenga los cuidados necesarios ya que es un material delicado debido a su estructura.

La madera es un compuesto de fibras naturales llamadas celulosas y lignina que es un material que aporta rigidez a la estructura de las fibras. Funciona como lo que en composites conocemos como material matriz, que es aquel que aporta rigidez y aglomera a los demás elementos.



Ilustración 4.- Templo de Kofukuji Nara Japón

1.7 ARQUITECTURA FUNCIONALISTA

A lo largo de la historia encontraremos características similares que se han reproducido a través de generaciones. Si comparamos la arquitectura de la cultura Maya, Azteca, China, Egipcia, Griega, tienen varias características comunes, como por ejemplo: el uso de la piedra natural en la mayoría de sus construcciones, la utilización de los materiales más accesibles que pudieran encontrarse o bien, que hubiera una característica que solo ese material tuviese, como es el caso de la piedra utilizada para la pirámide de *Khufu* que se obtuvo de canteras a 800km de distancia de su destino.

El hombre siempre ha buscado la forma de innovar en la construcción. En un principio con un fin religioso para estar en contacto con un ente abstracto y poderoso, pero para este motivo tuvo que evolucionar en la forma en como concebía la materia prima de la cual hacía uso recurrente. Todo este proceso de descubrimiento y experimentación con los materiales se intensificó con la Revolución Industrial (S.XVIII) gracias a los procesos industriales en los que se veía inmerso tanto el mercado como la producción.

Mientras el modelo económico se estabilizaba y creaba esferas de tranquilidad tuvieron que continuar los modelos tradicionales de construcción. Aunque en Armenia para el siglo XVI ya se hubiese trabajado el metal con fines industriales era complejo de ocupar debido a que era una práctica que se mantenía en secreto y no fue sino hasta el año de 1856 cuando Henry Bessemer desarrolló un método para la producción a gran escala. El cambio de la industrialización de los materiales tuvo su auge con la llamada arquitectura del Funcionalismo donde encontramos grandes exponentes como Mies Van der Rohe (1886-1969) donde su lema era *“Die Form folgt der Funktion”* la forma siempre sigue a la

función, haciendo alusión a los procesos funcionalistas de producción, generando un nuevo paradigma en la arquitectura que sería acompañado de nuevas e innovadoras tecnologías.

En el funcionalismo observamos un sincretismo de las técnicas antiguas con los nuevos materiales, los cuales eran: el acero como un sistema estructural, cerámicos artificiales como el concreto, elementos mixtos entre acero y concreto (concreto armado), vidrios con distintas aleaciones y colores, ladrillos, madera, piedras naturales, etc. Con una cartera tan amplia las posibilidades de crear nuevas formas eran casi infinitas, pero muchas veces la globalización de los materiales y la arquitectura generó un efecto contraproducente.

Si bien era más sencilla la generalidad de la construcción, se volvió menos eficiente en términos de confort interno debido a las propiedades de los materiales.

Analicemos el caso de la radiación lumínica y la pérdida y ganancia de calor hacia el interior y el exterior:

La conductividad térmica del vidrio es de 1W/mK (vatios (metro × kelvin) /kilocaloría

Capítulo 1: Antecedentes de Materiales en la Arquitectura

o su equivalente (hora \times metro \times kelvin), esto explica la cantidad de flujo de calor que se gana en cierta unidad de tiempo.

Por otro lado, encontramos el adobe, un material utilizado por siglos que tiene un coeficiente de 0.25W/mK que significa que es cuatro veces más eficiente en términos de termicidad y transferencia térmica. Por lo tanto, en países como Países Bajos, Alemania, Noruega, etc. se tiene una pérdida de calor bastante significativa, lo que ocasiona el tener elementos de climatización al interior de la construcción y son sistemas que gastan energía y hacen ineficiente el funcionamiento del edificio en términos de gastos calóricos o energía. En la antigüedad no había sistemas de climatización activos como lo son los difusores de aire frío o calefacciones, por lo que había que construir con materiales que produjeran un confort interno lo más adecuado posible, esto también se veía reflejado en las geometrías constructivas que había.

Actualmente ha habido una evolución en cuanto a teorías y métodos para concebir la arquitectura como el brutalismo, estructuralismo, metabolismo, high tech, por mencionar algunos. Pero estos

avances en la arquitectura han sido gracias a las nuevas tecnologías que permiten recrear modelos tridimensionales y que a su vez generan cálculos complejos para el diseño de estructuras. Esto sumado con los nuevos materiales con altas resistencias, con nuevos sistemas que permiten un desarrollo de techumbres sin tantos apoyos intermedios generan una arquitectura más libre para el diseño pero que se va exigiendo cada vez más, una arquitectura que hoy en día esta o debería estar muy de la mano de los avances tecnológicos.



Ilustración 5.- Edificio de la Bauhaus diseñado por Walter Gropius



Capítulo II : Materiales y sus usos en la Arquitectura

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

II MATERIALES Y SUS USOS EN ARQUITECTURA

En el siglo XXI encontramos una gran diversidad de materiales para la construcción, algunos de ellos continúan su larga tradición que data de las culturas antiguas, otros de ellos han sido fruto de los procesos evolutivos que ha tenido la ciencia. Varios de los materiales que encontramos en edificios de renombre como el Museo *Guggenheim* o la torre *Burj Khalifa* han podido ser construidas gracias a la nueva ingeniería de materiales y también gracias a las nuevas formas y diseños que los mismos arquitectos e ingenieros crean a partir de homologar estructuras de la naturaleza y otras fuentes de inspiración. La gran mayoría de los materiales que utilizamos en el siglo XXI podría decirse que son materiales compuestos, concretos, plásticos, aleaciones de metales, adobes etc. Cada uno de ellos tiene cualidades específicas que acompañan a cada uno de los componentes que los forman, por ejemplo: el adobe es un material que tiene una matriz cerámica que tiene ciertas propiedades a la compresión pero que es muy frágil, por este motivo se adicionan fibras naturales ya que al ser más flexibles ayudan a mejorar el comportamiento de las arcillas

y crean un material uniforme más resistente entre sí.



Ilustración 6.- Copernicus Science Centre, Varsovia Polonia

En este capítulo abordaremos de una manera sencilla como es que los materiales están divididos y que propiedades tienen los cuatro grandes grupos de familias, también se abordará de manera general algunos de los procesos por los cuales algunos materiales compuestos llegan a ser sometidos antes de tener oportunidad en el mercado comercial, que pruebas y cualidades son requeridas para cada uso específico.

A grandes rasgos podemos decir que los materiales se encuentran divididos según sus composiciones y cuanto porcentaje de ellos ocupa el compuesto. Como familias de materiales simples podemos denominar las siguientes categorías:

- Metales
- Cerámicos
- Polímeros

2.1 MATERIALES SIMPLES

2.1.1 METALES

Estos materiales se encuentran naturalmente pero casi nunca en un estado puro (que contengan un 100% del componente matriz), normalmente se encuentran en combinación formando óxidos, sulfuros o carbonatos.

Los metales también se dividen en dos grupos, alcalinos y alcalino-térreos, que básicamente explica si un metal es ferroso o no ferroso. En el primer grupo tenemos metales como el hierro forjado (o fundido) y el acero, en los segundos hay metales como el aluminio, plomo, zinc, cobre, plata, etc.

Todos estos elementos metálicos son aleaciones o compuestos de metales con otros metales o bien de metales con algún otro compuesto que pudiera ser no metálico, a los primeros se les conoce como metales y a los segundos como aleaciones. Todo material que encontremos tiene ciertas características físicas que podemos comparar, aunque sus propiedades lleguen a valores casi nulos, en el caso de los metales tenemos las siguientes.

- **Peso específico:** Relativo o absoluto. El peso relativo es la relación entre el peso de un cuerpo y el peso de una

sustancia de referencia de igual volumen. Para los sólidos y los líquidos se toma como referencia el agua destilada a 4 °C³.

- **Densidad:**

Ultraligeros - Inferior a 2 g/cm³

Ligeros - Inferior a 4.5 g/cm³ y mayor a 2 g/cm³

- Pesados - Superior a 4.5 g/cm³

- **Brillo :** El reflejo de una mayor cantidad de fotones.

- **Punto de fusión :** La temperatura a la cual un sólido pasa a estado líquido. Punto de solidificación. Es la temperatura en la cual un material pasa de estado líquido a sólido, en este caso no necesariamente tiene que ser igual al punto de fusión.

- **Oxidación:** La gran mayoría de los metales tienen este efecto causado por el oxígeno en el ambiente y es un efecto de degradación en algunos casos de la capa superficial y en otros de todo el material. Hay casos como el cobre o el aluminio en donde la capa de óxido protege el resto del material, pero en el caso del hierro u otros metales este proceso es permeable y se adentra en todo el material degradándolo hasta destruirlo.

3.- Cristina Paredes Benítez. La biblia de los materiales de arquitectura. Barcelona, España: Köneman, 2014.

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

Características mecánicas.

- **Resistencia mecánica** : Capacidad para resistir los esfuerzos a tracción, compresión, torsión y flexión sin deformarse ni romperse⁴.

- **Dureza** : Propiedad que expresa el grado de deformación permanente que sufre un metal bajo la acción directa de una carga (*ídem*).

- **Elasticidad** : La propiedad que tienen los materiales de recuperar su forma primitiva cuando cesa la carga que los deformaba.

- **Fragilidad** : Es la facultad de un metal de romperse por la acción del choque o por cambios bruscos de temperatura.

- **Fatiga** : Si se somete una

pieza a la acción de cargas periódicas se puede llegar a producir su rotura con cargas menores a las que producirán deformaciones.

Características tecnológicas.

- **Maleabilidad** : Capacidad de los metales para hacerse laminas.

- **Ductilidad** : Propiedad de los metales para moldearse en alambre e hilos.

- **Forjabilidad**: Es la propiedad mediante la cual puede modificarse la forma de un metal a través de la temperatura.

Características térmicas.

- **Conductividad térmica**: Mide la capacidad de transferir calor a través de un material.

Metales				
Hierro (Fe)	Acero (Fe + C)	Cobre (Cu)	Titanio (Ti)	Aluminio (Al)
Densidad: 7.874 Kg/m ³	Densidad: 7.850 Kg/m ³	Densidad: 8.960 Kg/m ³	Densidad: 4.507 Kg/m ³	Densidad: 2.700 Kg/m ³
Ductilidad: Muy buena	Ductilidad: Buena	Ductilidad: Muy buena	Ductilidad: Muy buena	Ductilidad: Buena
Maleabilidad: Muy buena	Maleabilidad: Buena	Maleabilidad: Muy buena	Maleabilidad: Muy buena	Maleabilidad: Muy buena
Dureza Mohs: 4	Resistencia a la oxidación: Mala (sin tratamiento específico)	Dureza Mohs: 3	Dureza Mohs: 4	Dureza Mohs: 2.75
Coefficiente de dilatación: 1.2 x 10 ⁻⁵	Coefficiente de dilatación: 1.2 x 10 ⁻⁵	Coefficiente de dilatación: 1.7 x 10 ⁻⁵	Coefficiente de dilatación: 1.2 x 10 ⁻⁵	Coefficiente de dilatación: 2.4 x 10 ⁻⁵
Resistencia a la oxidación: Mala en estado puro	Resistencia mecánica: Muy buena (según tratamiento)	Resistencia mecánica: Buena	-	Resistencia mecánica: Mala (sin allear)
Estado de oxidación: 2.3	-	Estado de oxidación: 1.2	Estado de oxidación: 2.3	Estado de oxidación: 3
Conductividad eléctrica: 9.93 x 10 ⁴ s/m	Conductividad eléctrica: Aprox. 3 x 10 ⁴ s/m	Conductividad eléctrica: 58.108 x 10 ⁴ s/m	Conductividad eléctrica: 9.93 x 10 ⁴ s/m	Conductividad eléctrica: 37.7 x 10 ⁴ s/m
-	Punto de fusión: 1,375°C (2,507 °K)	Punto de fusión: 1,083°C (1,357 °K)	Punto de fusión: 1,667°C (1,941 °K)	Punto de fusión: 660°C (993.47 °K)
-	-	-	Resistencia a la oxidación: Muy buena (tras formar una capa de óxido de aluminio Al ₂ O ₃)	-

Tabla 1.- Propiedades de los materiales metálicos.

4.- Cristina Paredes Benítez. La biblia de los materiales de arquitectura. Barcelona, España: Köneman, 2014.

5.- Ídem

6.- Ídem

- **Dilatación** : Se mide linealmente y se fija la unidad de longitud para la variación de 1 °C de temperatura.

Características eléctricas.

- **Conductividad eléctrica** : Es la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. Los metales permiten el paso de la corriente eléctrica con facilidad, son, por lo tanto, buenos conductores de electricidad.

- **Magnetismo y ferromagnetismo**: Existen algunos metales cuyos átomos pueden actuar esporádicamente como imanes. Cuando eso ocurre se magnetizan, y se convierten en un imán temporal o permanente(*ídem*).

2.1.2 CERÁMICOS

Los materiales cerámicos se caracterizan por su gran resistencia a esfuerzos de compresión pero ésta dureza del material los hace muy susceptibles a las demás fuerzas como torsiones, empujes laterales, flexibilidad, tensión etc.

Los cerámicos en la construcción pueden dividirse en dos grandes grupos, naturales y artificiales, siendo los segundos compuestos que asemejan propiedades naturales de los pétreos pero con un

tiempo de obtención muy corto y con una forma tan flexible que permite diseñar de muchas formas diferentes.

Un material compuesto por una matriz de SiO_2 (silicatos y aluminatos) que aglutinan otros componentes con una granulometría de partículas constantes. Esto generalmente se da con cemento portland aunque los únicos cambios que regularmente hay son las cantidades de SiO_2 . La obtención de la mezcla es una formula que va a variar dependiendo de las características que se quieran lograr pero generalmente son las siguientes:

- Cemento Portland ~ 7-15%
- Agua ~ 15-21%
- Agregado fino ~ 24-30%
- Agregado grueso ~ 31-51%

El cemento funciona como un aglutinante que mantiene todos los componente unidos solidificándose con la acción del agua, en materiales compuestos los aglutinantes tienen que ser lo suficientemente fuerte para mantener las partículas trabajando adecuadamente sin que haya una separación.

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

2.1.3 POLÍMEROS

Los polímeros son materiales orgánicos sintéticos compuestas de macromoléculas o nanopartículas obtenidas de una forma artificial. Éstos polímeros generalmente se encuentran por medio de extrusión como es el caso del PVC (cloruro de polivinilo $(C_2H_3Cl)_n$), PET (tereftalato de polietileno $(C_{10}H_8O_4)_n$), y en fibras como es el caso del Kevlar (poli phenilnatarftalmida $C_{14}H_{10}N_2O_2$) o el poliéster $(C_{10}H_8O_4)$.

Las partículas de los polímeros son muy resistentes a la corrosión y son muy nobles con respecto a su forma de ocupación, normalmente se clasifican en termoplásticos y termoestables. Los primeros son materiales que a temperaturas relativamente altas se deforman o se vuelven flexibles y mientras más calor se agregue se llega al punto de fusión.

Los termoestables se obtienen mediante la aplicación de una resina que funciona como catalizador uniendo la matriz o los materiales involucrados, esto genera un entrelazamiento de sus cadenas moleculares.

En arquitectura los plásticos tardaron en ser adoptados, pero gracias a su diversidad de usos y formas se adaptó muy

rápido a ser un material para la construcción. Los plásticos son materiales que tienen una gran absorción de impactos, su coste de producción es más bajo con relación a los metales, son muy durables y fuertes, aunque se recomienda no ser usados en estructuras.



Ilustración 7.- Pellet de PVC virgen para su procesamiento en diversas fabricaciones. Teknor Apex.



Ilustración 8.- Pellet de PET tras un proceso de secado precristalino por maquinaria STPLAS.

2.2 MATERIALES COMPUESTOS

2.2.1 CARACTERISTICAS GENERALES

Un material compuesto “Es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí”⁹ Todos los materiales compuestos se diseñan para obtener las propiedades que se quieren alcanzar, este proceso consta de 2 etapas:

La matriz, que es aquella sobre la cual se impregnaran las nuevas propiedades, estas matrices pueden ser.

Metálicas: MMC, Metal Matrix Composites

Cerámicas: CMC, Ceramic Matrix Composites

Fibras: También tenemos las matrices orgánicas, dentro de estas encontramos dos que son muy usadas:

CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics

GFRP, Glass Fiber Reinforced Plastics (*ídem*)

Las matrices de *MMC*, como su nombre lo dice son matrices que incorporan elementos metálicos

como componente primordial del compuesto.

Éstas matrices se dividen en dos grupos los metales llamados de transición (Co, Fe, Ni) y los de aleaciones ligeras (base Al, Ti, Mg)¹¹, normalmente para efectos de investigaciones de materiales compuestos tomamos en cuenta al segundo grupo debido a sus características en el módulo específico y resistencia. En cambio, los metales del primer grupo son materiales denominados metales duros, cuyas características principales son la dureza y su gran capacidad de resistencia al desgaste.

Dentro de los materiales mas recurrente usados en la composición de materiales compuestos con matrices metálicas son el aluminio en sus series 2000, 6000, 7000 y 8000, el titanio que presenta algunos problemas de compatibilidad y el magnesio que presenta problemas de corrosión. Cuando un material monolítico no tiene las características que deseamos incorporamos adiciones de materiales de refuerzo y la optimización de estos es lo que hace que valga la pena su investigación y fabricación.

8.- Anexos, anexo 1 Tabla de propiedades de los materiales

9.- “Materiales Compuestos.” Ciencia de los Materiales. Málaga, España: ., 2004/2005. 8

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

A continuación, se presenta una serie de puntos que explican la matriz metálica en un compuesto:

- Proteger las fibras o partículas del ambiente exterior (aire, humedad, ...)
- Propiciar la unión solidaria de los elementos que constituyen el refuerzo: unir las fibras entre ellas, pero separarlas para evitar la transmisión de grietas a través del compuesto, sobre todo en el caso de un refuerzo con fibras continuas.
- Repartir y transmitir las cargas de los elementos de refuerzo. En general, para que la transmisión sea óptima, la matriz debe deformarse plásticamente para tensiones netamente inferiores a las que ésta sometido el compuesto, y que su deformación sea inferior a la correspondiente a la rotura. La matriz no deberá tener un módulo de elasticidad demasiado elevado (ídem).

Las características que tiene un material compuesto con matriz metálica no son muy diferentes a cualquier otra, dentro de las características que se buscan son que soporte las tensiones necesarias, así como aumentar las características mecánicas que tiene la misma matriz. Como ya lo había mencionado antes la creación de elementos compuestos es para mitigar

ciertas carencias que tiene el material, así que otra de las cosas que se busca de generar un compuesto es eliminar los fallos que esta presenta en su estado primario.

Como compuestos de matriz cerámica o CMC encontramos aquellos materiales que son no metálicos como los carburos, nitruros, etc. los cuales incluyen minerales arcillosos, vidrios, cementos, rocas, etc.

A diferencia de los materiales metálicos éstas alcanzan un mayor valor en el punto de fusión, así como características de aislamiento térmico.

Entre otras propiedades se caracterizan por su gran dureza y ligereza. Gracias a que son materiales muy duros aumenta drásticamente su grado de fragilidad, la fragilidad de estos materiales se debe a que son materiales sumamente porosos, en la creación de nuevos materiales es indispensable proporcionar el grado de porosidad del compuesto para determinar valores específicos.

11.- Edil da Costa, Cesar, Velasco, Francisco & Torralba, Jose. "Materiales Compuestos de Matriz Metálica. I Parte. Tipos, Propiedades, Aplicaciones." Revista Mexicana de Ingeniería Química 2000: 179-192. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Octubre 2016 <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>.

12.- Ídem

Un fenómeno interesante propio de los materiales cerámicos, este fenómeno es denominado choque térmico y se genera cuando los cambios de temperatura generan una expansión térmica importante en el material, lo cual causa

un agrietamiento, actualmente se han hecho investigaciones sobre materiales con expansión térmica negativa y materiales con expansión térmica positiva, lo cual propicia compuestos de materiales con expansiones térmicas cercanas a cero¹³.

Función	Propiedades	Aplicaciones	Materiales
Mecánica	Resistencia a la abrasión	Abrasivos	TiN-Al ₂ O ₃
	Resistencia	Piezas de precisión, álabes de turbina	B ₄ C-WC-TiC
	Capacidad lubricante		Si ₃ N ₄ -SiC
	Superconductividad	Superconductores	YBa ₂ Cu ₃ O ₇
	Cambio de ρ con T	Termistores	BaTiO ₃
	Cambio de ρ con V	Varistores	Zno
Eléctrica	Permitividad (bajas pérdidas dielécticas)	Condensadores	BaTiO ₃
	Piroelectricidad	Detectores piroeléctricos	Pb(Zr,Ti)O ₃
	Piezoelectricidad	Detectores piezoeléctricos	Pb(Zr,Ti)O ₃ ,LiNbO ₃
	Semiconductividad	Semiconductores, substratos CI, Filtors, detectores de IR, Fotómetros	Si(B,Al,P,As),AsGa, Pin,InSb,ZnO,Cds
	Imágenes con buen contraste	Instrumentos de pantalla	WO ₃ ,(In,Sn)O ₂
	Alta densidad de corriente	Electrodos baterías solares	Cd ₂ SnO ₄
Magnética	Ferromagnetismo	Imanes permanentes	SrFe ₁₂ O ₁₉ (ferrita dura)
	Ferrimagnetismo	Elementos de memoria, componentes magnéticos	NiFe ₂ O ₄ (Ferrita blanda), CrO ₂
	Cátodoluminiscente	Pantallas de tubos de imagen	ZnS(Ag),(Zn,Cd)S/Cu,Y ₂ O ₂ S/Eu
Ópticas	Absorción, reflexión	Fibras ópticas	SiO ₂ /Zr,Ge,GaInAsP
	Transmisión	Cerámica translúcida	Al ₂ O ₃ /Mg
	Buena transparencia	Electrodo transparente	SnO ₂
	Biocompatibilidad	Prótesis (dientes y huesos)	Ca ₃ (PO ₄) ₃ OH
Química	Resistencia a la corrosión	Equipamiento químico	SiC-WC,SnO ₂ -ZnO
	Catálisis	Catalizadores	Zeolitas:SiO ₂ -Al ₂ O ₃
	Conductividad iónica	Electrolitos, sensores gases	β-Alumina,ZrO ₂ ,SnO
Nuclear	Resistencia T, refractaria	Revestimientos de reactores	AlN-SiC
	Resistencia a la radiación	Elementos de combustión	UO ₂
	rResistencia a la corrosión	Material moderador	B ₄ C-Al ₂ O ₃ C
Térmica	Aislante térmico	Refractario (para hornos)	Mullita,Y/ZrO ₂
	Conductividad térmica	Cambiadores de calor	BeO
	Absorción de calor	Revestimientos	SiC-AlN,Si ₃ N ₄ -B ₄ C

Tabla 2. Tabla de propiedades de algunos materiales cerámicos.

13.- "Materiales Compuestos." Ciencia de los Materiales. Málaga, España: ., 2004/2005. 8

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

2.2.2 FIBRAS NATURALES

Son todas aquellas que se obtienen de materiales que son considerados de bajo impacto ambiental y que poseen características similares a las de las fibras sintéticas ya que éstas han intentado replicar las cadenas químicas que encontramos en las fibras naturales. Generalmente las fibras naturales tienen un buen comportamiento a flexo-compresión y son de fácil acceso en la mayoría de las regiones del mundo, por eso es que ha sido un material muy recurrente en la arquitectura desde mucho tiempo atrás.

La obtención de estos materiales es de fácil acceso y debido a su flexibilidad para su trabajo se pueden obtener resultados muy variados, ya que los podemos encontrar como parte de techumbres, como soluciones estructurales, recubrimientos en interiores, aditivos para otros materiales etc.

Dentro de estos materiales de fibras naturales encontramos:

- **Método Nebraska** (o autoportante): Inventado en 1870 por colonos de Nebraska (USA) y consiste en la construcción de muros de carga con las balas de paja y unidas entre si y a la cimentación con elementos rígidos como

estacas, una vez fijados todos los elementos se descansa sobre estos muros la cubierta.

- **Paja:** La paja es un material que se puede encontrar en balas de paja o en rollos, dentro de la construcción en paja encontramos los siguientes métodos para construir:

- **Estructura portante:** Este método consiste en la utilización de una estructura con base en madera, acero u otro material autoportante formando los marcos de la estructura y las balas de paja son apiladas para dar la propiedad térmica a la construcción. Resistencia mecánica.

- **Método Canadiense:** Es un método que usa la paja como un material portante mediante la estabilización con un mortero y apilando las balas como una especie de ladrillos esperando a que fragüe y genere un material resistente a la compresión y a los empujes de viento.

- **Técnica greb:** Esta técnica es de los métodos más flexibles para la autoconstrucción ya que consiste en la construcción de encofrados con madera e introducir las balas de paja dentro, en cuanto a los elementos verticales se les adiciona un mortero aligerado con aserrín.

Características físicas: La paja es un material que tiene muchas variantes que determinan tanto su resistencia como otras cualidades que nos interesan en los materiales para la construcción por lo tanto ha sido imposible obtener una tabla de cuantificación como la que tenemos para otros materiales. No obstante, se pueden observar propiedades básicas hacia los esfuerzos a compresión y respondiendo mejor hacia la tensión. Las variables que determinan sus características físicas son:

- Humedad de la paja
- Densidad de la bala
- Tipo de revestimiento
- Espesor de revestimiento

Gracias a su buen comportamiento elástico lo hace un material idóneo para soportar sismos. La resistencia al fuego de los materiales se mide en el tiempo que soporta un material antes de sufrir un cambio, las balas de paja junto con sistemas adicionales como revestimientos tienen una eficiencia de 90 minutos antes de que los materiales se incendien, esto se debe gracias a la propiedad de estanquidad que es una propiedad que determina la hermeticidad de un objeto, por lo que en este caso el oxígeno dentro de las balas de paja queda atrapado y no permite la

circulación. Gracias a la propiedad de estanqueidad también coloca a la paja como un material con buen comportamiento térmico, atrapando aire a su interior y teniendo un bajo coeficiente de transmitancia térmica.

Debido a que es un material natural hay microorganismos que descomponen la celulosa y la lignina como es el caso de los hongos, estos se presentan cuando las condiciones del material no son las adecuadas.

Las fibras por si solas tienden a absorber líquidos y mantenerlos por periodos considerables, lo que produce la proliferación de microorganismos que descompondrán el material, además de poder contaminar el sistema. Por estos motivos hay que dotar a las fibras naturales de fungicidas, así como de impermeables o bien colocarlos en situaciones idóneas donde estos factores no interfieran el funcionamiento del material.

- **Mimbre:** El mimbre es una fibra extraída de la familia de las Salix en donde encontramos las fragilis, viminalis y las porpurea.

Las fibras tienen distintos usos, desde la construcción de muebles hasta la de construcciones autoportantes,

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

el mimbre generalmente se trabaja por el método de trenzado en donde se genera una superficie que puede recubrir muros, servir de base para sillas, generar mallas para cubiertas etc.

Todas las fibras poseen un buen comportamiento hacia la flexión y a la deformación, unas mas que otras y es por eso que el mimbre se vuelve ideal para construcciones efímeras. La autoportabilidad del material yace en la ligereza de las fibras y en las geometrías que se proyectan para estos elementos.

- **Bambú:** Este material es uno de los más recurrentes en la actualidad ya que su tiempo de crecimiento es relativamente corto con un periodo de 7 años para alcanzar troncos de 30m, es una madera altamente resistente a la flexión y es ligero debido a que su estructura es tubular, o sea, hueca por dentro. Cada cierta distancia el bambú tiene nudos o tabiques rígidos que impiden la deformación del tronco. Es un material que crece en climas cálidos húmedos y es parte de la subfamilia de los Bambusoideae.

El bambú puede generar estructuras autoportantes así como soportar esfuerzos tanto a compresión como a tensión,

el material presenta problemas con respecto a la resistencia al fuego si es que no tiene los tratamientos adecuados, así como la maduración necesaria de la madera, sin esto pudiera llegar a presentar problemas serios de cuarteaduras en el sentido paralelo lo cual debilita por completo el material.

Hay distintas técnicas para la construcción con bambú, desde concavaciones en extremo llamadas bocas de pez, donde los ensambles se generan vertiendo una cantidad de concreto dentro del bambú y teniendo uniones metálicas que funcionan a tensión. Otra de las formas mas comunes es por medio de amarres con fibras naturales u artificiales.



Ilustración 9.- Templo Luum en Tulum, diseño de bambú a cargo de Co-Lab Design Office, tomando los preceptos de la arquitectura de Félix Candela y utilizando herramientas de diseño asistido por computadora de Autodesk.

2.2.3 FIBRAS DE VIDRIO

Las fibras de vidrio, así como las de carbón son fibras sintéticas extraídas. En el caso de las fibras de vidrio de dos variables dependiendo la resistencia de la misma y se encuentra la de alta resistencia y la normal, ambas tienen una base de óxido de silicio (SiO_2) en un porcentaje que ronda del 55 al 65% según el caso, más una serie de otros componentes en los que se encuentra el óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de Magnesio (MgO) y óxido de boro (B_2O_3). Una de las grandes ventajas de las fibras de vidrio sobre las fibras de carbón es el bajo costo en el mercado y su fácil aplicación con resinas de poliéster que lo hacen un material propicio para ser usado en carrocerías de automóviles, recipientes de almacenaje, barcos y botes entre otros.

Las fibras de vidrio se obtienen mediante la fundición de vidrio pasando sobre rejillas con agujeros muy finos que a la hora de ser extruidos generan un material lo bastante flexible como para ser trabajado. La mezcla de todos los elementos antes mencionados se le denomina vitrificable y contiene porciones de dosificación específicas para posteriormente

ser introducidas en un horno de fusión directa a temperaturas de 1550°C .

Posteriormente el vidrio fundido pasa por una serie de bandas llamadas hileras que son canales (feeders) creados con aleaciones de platino y tienen diámetros variables controlados, a lo largo de este proceso el vidrio se mantiene a una temperatura de 1250°C lo que permite que el material se siga en un estado de trabajabilidad lo suficiente para ser colado por los canales. A la hora de llegar a su punto de extrusión este es estirado a una velocidad de 10 a 60m/s esto varía dependiendo las micras de diámetro que se deseen en la fibra. Una vez teniendo los filamentos de vidrio se procede a su enfriamiento de 2 fases, la primera consiste en un enfriado de las fibras por medio de radiación. Pero debido a las altas temperaturas por las cuales el vidrio necesita ser manejado requiere de una segunda fase de pulverización de agua fría sobre las fibras de vidrio, esto logra que las partículas de vidrio se orienten y estabilicen. En esta etapa las fibras son prácticamente inservibles ya que carecen de trabajabilidad, además de que son muy frágiles y no soportan los abrasivos, por lo cual es necesario dotarlos de una fina película

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

de compuestos químicos llamada ensimaje.

El ensimaje se adiciona cuando las temperaturas del vidrio siguen oscilando entre los 60 a 120°C en porcentajes que varían del 0.5 a 5%, una vez obtenidas las fibras se procede a su acomodamiento por capas mediante una serie de peines que alinean las fibras y el ensimaje facilita su unión.

El proceso de ensimaje según las características químicas del mismo y la alineación de filamentos nos genera las siguientes propiedades en las fibras:

- Cohesiona los filamentos
- Da resistencia frente la abrasión entre si y con otras superficies
- Elimina las cargas electrostáticas
- Rigidiza la unión de los filamentos
- Facilita su corte y proyección
- Facilita la dispersión de los filamentos¹⁴

Claramente los ensimajes en este proceso nos proporcionan características físicas

específicas que necesitaremos a la hora de trabajar con las fibras de vidrio, es por eso que existen varios tipos de ensimaje que nos dotan de características propias.

El material tras el proceso de ensimaje es bobinado y secado para eliminar los excedentes de líquido que pudiera tener. Dentro de la clasificación de fibras de vidrio tenemos el siguiente orden:

- **Vidrio E**, utilizado desde 1930 por sus características de aislamiento eléctrico y mayormente dependiente del compuesto de refuerzo usado, es el tipo de fibra más común que encontramos.

- **Vidrio R**, se caracteriza básicamente por sus altascualidades mecánicas y es utilizada principalmente en aviación, aeronáutica, tanques para combustible de aviones, proyectiles, etc.

- **Vidrio D**, Caracterizada por sus grandes propiedades de conductividad eléctrica, se usa principalmente en

Propiedades	Vidrio E	Vidrio D	Vidrio R	Vidrio AR
Densidad (g/cm ³)	2.6	2.14	2.53	2.68
Resistencia a la tensión (Mpa)	3600	2500	4400	3600
Módulo elástico (Gpa)	75.5	55	86	70
Resistencia a la rotura (%)	4.5	4.5	5.2	4.3

Tabla 2.- Propiedades de las distintas fibras de vidrio

14.- Águilar, Victor. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010.

impresiones de circuitos de alto rendimiento en ventanas.

- **Vidrio C**, usado normalmente por sus características anticorrosivas sobre vidrios que requieran de esta propiedad.

- **Vidrio AR**, fabricado primordialmente para la adición de estos a morteros y concretos gracias a su resistencia alcalina, normalmente la fibras de vidrio que no son AR presentan problemas de fallas en los concretos después de ciertos años de vida, este problema se debe justamente a la corrosión alcalina que presentan los concretos hacia las fibras.

Propiedades	Fibras E	Fibras AR
Modulo de Elasticidad a 25°C (Gpa)	75.5	70
Resistencia a tracción de una fibra (Mpa)	3600	3600
Resistencia a tracción de un haz de fibras	1700-2700	1450-1900
Deformación de rotura	2	2

Tabla 3.- Propiedades de fibras de vidrio

2.2.4 FIBRAS DE CAROBONO

Por otro lado, tenemos las fibras de carbono que su precio es un factor a considerar, estas fibras están catalogadas en tres, alta, intermedia y baja resistencia. La rigidez de las fibras de carbón es muy parecida a la de un material cerámico, aunque estas presentan un módulo de elasticidad mucho mayor a cualquier material cerámico normal. Las fibras de carbono provienen del poliacrilonitrilo (*PAN*) y su procesamiento surge en tres etapas:

- **Estabilización**, un proceso donde se estiran las fibras *PAN* y se oxidan a 200-220°C mientras se mantienen tensionadas.

- **Carbonización**, se procede al calentamiento a 1000- 1500°C en atmosfera inerte para eliminar H (hidrogeno), O (oxigeno) y N (nitrógeno), proceso en el que se dormán algunas fibras de grafito, pero no las suficientes.

- **Grafitizado**, Calentamiento a $T > 1800^{\circ}\text{C}$ para aumentar el módulo de elasticidad a expensas de disminuir un poco la resistencia a la tracción. En esta etapa se transforma casi todas las fibras a estructura grafito y aumenta su orientación.

Gracias a las características de la fibra de carbono su uso más común es en la aeronáutica, en prótesis de alto impacto para deportistas de alto rendimiento, entre otros. Algunas de sus características mecánicas son las siguientes según el tipo de fibra de carbono:

- Bajo módulo de elasticidad, módulo entorno de $2.3 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ y un alargamiento en rotura aproximado de 1.5%

- Alto módulo de elasticidad, módulo entorno de 4.4 y $6.4 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ y un alargamiento en rotura aproximado de 4 y un 0.6%

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

Regularmente las fibras de carbono se consiguen en el mercado en rollos con espesores de entre 1.2 y 1.4mm × 5 y 20mm, con longitudes que van desde los 100 hasta los 500m. Normalmente las fibras de carbono se adhieren al material mediante una resina epoxi, pero esta resina requiere de ciertas características para evitar desprendimientos entre la misma y son las siguientes:

- Resistencia a tracción y cizallamiento
- Temperatura de transmisión vítrea elevada
- Buena adherencia

Estas resinas pueden aplicarse de distintas maneras:

- **Método de transferencia de resina RTM**, en un molde sellado al vacío se introducen las fibras de carbono y por medio de presión se transfiere la resina por toda la superficie de carbón.
- **Método por inyección**, es similar al anterior, pero difiere en que este se puede usar con moldes sellados o abiertos, inyectando el contenido de resina al interior.

Propiedades	Bajo módulo	Alto Módulo
Modulo de elasticidad (N/mm ²)	230,00	440,00
Resistencia a Tracción (N/mm ²)	3,400	2,400
Deformación de Rotura (%)	15	5.5
Espesor (mm)	0.11-0.16	0.26
Peso (g/m ²)	200-300	300

Tabla 4.- Propiedades de los laminados en función del tipo de fibras empleadas.

- **Infusión RTI**, la resina se encuentra en un estado semiduro y se coloca en forma de placa formando una especie de sándwich y mediante la transferencia de calor y presión esta es esparcida por toda la fibra de carbón¹⁵. La fibra de carbono al igual que todo tipo de fibras además de encontrarse en planchas pre-hiladas se puede obtener por el método de trenzado de hilos, los tejidos pueden variar las direcciones de las fibras, pero mayormente el 95% de las fibras tienen que estar en un mismo sentido, dejando los restantes para generar una aglomeración entre las fibras en el otro sentido para evitar que las fibras se suelte y no tener un material sin cuerpo. Los gramajes de estas fibras van de los 200 a 800g/m³ debido a que el espesor de las fibras oscila entre los 0.13 y 0.3mm, estos rollos alcanzan longitudes de 40 a 100m. Como habíamos mencionado el tipo de tejido puede variar según su forma, los mas comunes son los siguientes:

- **Plain**, es en donde cada hilo longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo, en donde se genera un especie de manto reforzado. Usualmente se ve en materiales laminados y es idóneo para la pulltrusión.
- **Twill**, es un tejido cruzado, el numero de hilados

15.- Águilar, Victor. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010.

longitudinales que puede pasar sobre los transversales puede variarse, generando una gran variedad de tejidos cruzados. Una de las ventajas es que las resinas se pueden adherir mejor ya que presentan mejor accesibilidad al humedecimiento.

- **Satín**, similar al cruzado aunque los hilos que pasan recíprocamente en sentido longitudinal y transversal son más densos, el acabado final es similar al del satín, de allí viene el nombre y es un acabado superficial excelente (*ídem*). El objetivo primordial de las matrices es aglomerar el conjunto y evitar la separación de todos los elementos, tienen la propiedad de transferir al refuerzo las cargas, además de proteger del deterioro a los elementos que lo componen.

Propiedades	Valor
Modulo de Elasticidad (N/mm ²)	165,000
Resistencia a Tracción (N/mm ²)	2,800
Deformación de Rotura (%)	17
Espesor (mm)	<68

Tabla 5: Propiedades de los tejidos

Esto se logra gracias a la compatibilidad de los componentes. El segundo paso es la Fase Dispersa, en esta etapa se producen la microestructura del componente de refuerzo y se refiere a la forma, tamaño y distribución de las partículas, la cantidad de material de refuerzo que se

le aplique a la matriz irá en función al volumen y peso, ya que esta puede variar mucho dependiendo el comportamiento de los materiales. Dentro de los materiales compuestos podemos encontrar tres grandes familias o grupos:

- Reforzados con partículas
- Reforzados con fibras

Compuestos estructurales: Como lo había explicado anteriormente los materiales compuestos se diseñan y las propiedades son dadas por la geometría del diseño, aunque las propiedades del material también son importantes. Dentro del diseño de los materiales podemos encontrarlos en sándwiches o laminares y se caracterizan por su anisotropía, que se refiere a las propiedades intrínsecas de los elementos. Un ejemplo muy sencillo es el *MDF* (*Medium Density Fibreboard*) que es un material hecho a base de fibras de madera aglutinadas o unidas con una resina sintética por medio de calor y presión, esto genera un material lo bastante denso para construir muebles y muchos tipos de recubrimientos. Las ventajas de los materiales compuestos son muchas, pero lo que más nos ha dirigido a la investigación de ellos es que la creación de sus formas es diseñada por la necesidad de nosotros.

16.- Águilar, Victor. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010.

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

2.2.5 NUEVOS MATERIALES EN LA ARQUITECTURA

Actualmente dentro del mundo de la arquitectura nos rodean un sin número de materiales innovadores para la construcción, pero ¿cómo es que están compuestos estos materiales tan innovadores de los cuales muchos se empiezan a implementar poco a poco en los desarrollos arquitectónicos y urbanos más importantes a lo largo de todo el mundo?

Como lo revisamos anteriormente la evolución de los materiales se ha debido a la necesidad por encontrar nuevas soluciones para los proyectos visionarios que surgen. Estos proyectos exigen la máxima capacidad de cada componente que conforma el sistema e incluso más allá de lo que podrían soportar, por lo que tenemos que recurrir a la combinación de diversos materiales para formar una mezcla o compuesto más resistente o con mejores capacidades según su uso.

En esta mezcla de materiales encontramos una gran diversidad de combinaciones, desde elementos con matrices metálicas recubiertas con fibras poliméricas, hasta matrices de fibras naturales con aditivos plásticos. Dentro de este mundo también encontramos el surgimiento de

materiales nanoestructurados, los cuales son manipulados desde su composición.

Los materiales compuestos fibroplásticos (*FRP*) contienen en su mezcla elementos como resinas, plásticos, polímeros y que son adicionados con fibras, de allí proviene el nombre de fibroplásticos. Estos materiales funcionan bastante bien ya que por sí solos los plásticos o resinas tienen un muy buen comportamiento a compresión, pero casi nulo a tracción y las fibras por el contrario trabajan mejor a tracción que a compresión. Los *F.R.P.* se pueden adicionar con fibras de distintas maneras, ya sea en pulpas, guinitado u otros medios, pero no se han presentado tan buenos resultados como haciendo un diseño de material con filamentos de fibras ordenadas o bien en a base de capas.

Actualmente la industria nos presenta un método por el cual es más sencillo obtener un material *FRP* y es un proceso similar al de perfilado de elementos metálicos, este método es denominado pultrusion. En la actualidad esto logra abaratar costos en la industria y nos permite tener una gran variedad de formas modulares en los cuales podemos trabajar.

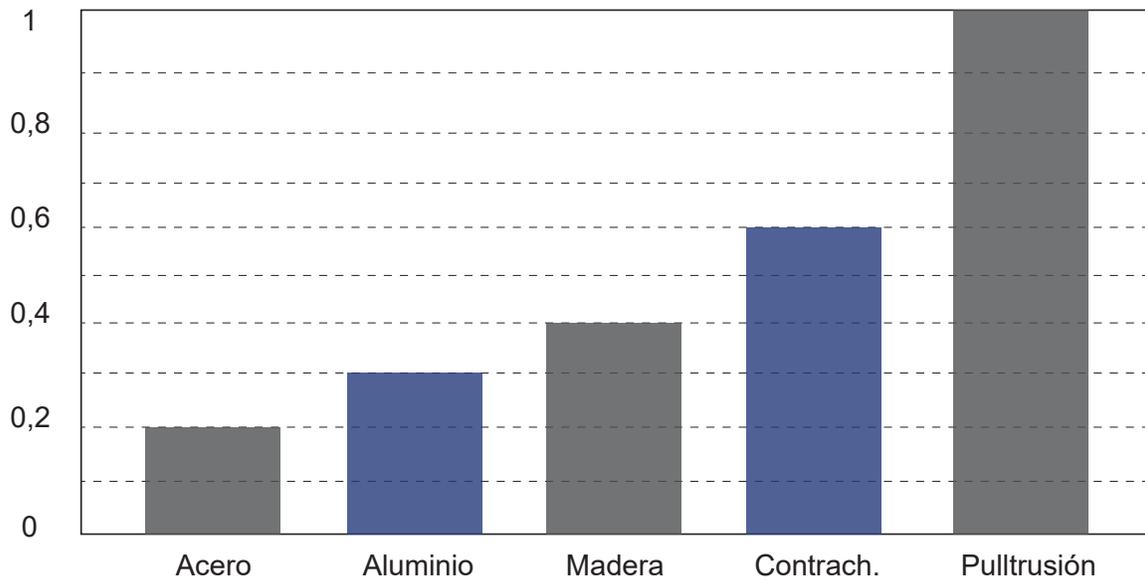


Tabla 6.- Resistencias de materiales por unidad de peso, donde el valor más alto representa una mayor utilidad en los procesos de producción.

En la tabla anterior podemos observar los resultados de resistencia en la experimentación con perfiles por el método de pultrusión.

Otra de las grandes ventajas es que éste proceso si lo comparamos con algunos otros métodos de procesamiento de materiales no resulta ser tan caro como pareciera, colocándolo en un valor cercano al de acero de tubo soldado.

Estos materiales *FRP* aparte de tener una gran resistencia/volumen tienen la ventaja que a diferencia de los perfiles convencionales de acero estos no presentan oxidación, aunque por el contrario es un material más deformable sobre las mismas cargas aplicadas a materiales metálicos.

Estos perfiles presentan una gran ventaja y es que se pueden generar perfiles de todo tipo de formas y que debido a su baja dureza nos entrega un material noble al trabajo como las maderas, permitiendo generar una mayor flexibilidad a la hora de diseño. Los costos si bien no se disparan en el mercado, sí resultan más altos que los del acero convencional, pero con la gran diferencia de no presentar problemas de corrosión.

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

Aquí vemos la resistencia de los materiales por unidad de peso y vemos que la mayor utilidad del material la tiene el método de poltrusión.

Habría que ponderar las ventajas que existen al construir con estos materiales ya que un gran impedimento de

la producción de ellos es que no son reciclables o no lo son por el método de poltrusión ya que las fibras son adheridas a la matriz sin permitir la recuperación o extracción.

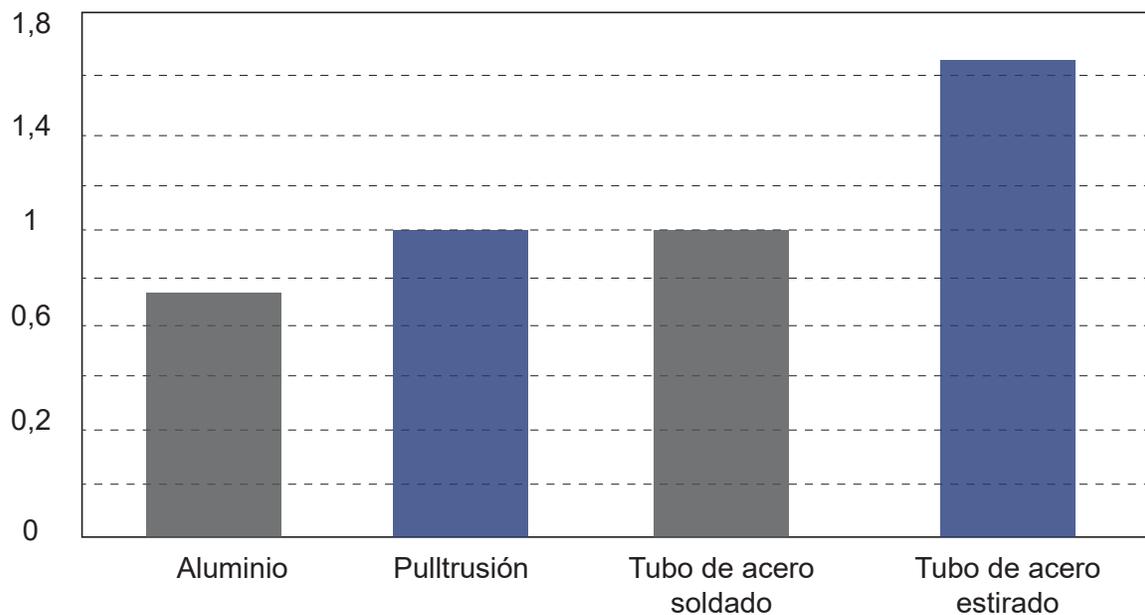


Tabla 7.- Costo de producción de materiales con valores absolutos, donde el costo mayor es representado por el valor 1,8 dentro de la gráfica.

2.2.6 PROCESAMIENTO Y PRODUCCIÓN EN ARQUITECTURA

Existen diversos métodos para la creación de materiales compuestos nanoestructurados, pero lo que buscan todos es encontrar mediante la experimentación y las propiedades intrínsecas del material es aprovechar sus cualidades para generar compuestos con diversas características físicas.

Uno de los métodos más comunes para la generación de materiales nanoestructurados de configuración cerámica y metálica es el **Método de Suspensión** en el que consiste en sumergir las partículas de tamaños nanométricas suspendidas en un gas insoluble sobre el cual descansaran y alcanzarán el tamaño deseado mediante una presión atmosférica constante. Después de tener el tamaño de partículas correctas según el uso que requiere se inyectarán a la matriz que se apropiará de estas características.

Integración por solución en donde se remojan las fibras en un soluto de resinas y la evaporación de un solvente.

Método de impregnación por polvos este método consiste en “introducir el polvo termoplástico seco dentro de una mecha de fibras, entonces,

las partículas son adheridas y fundidas a la superficie de las fibras, lo que genera una preforma que es introducida en un molde para convertirla en una lámina¹⁷.”

La impregnación por fusión se da al fundir la matriz polimérica y adicionar las fibras. No todos los métodos son aplicables para todo tipo de materiales debido a las propiedades físicas que maneja cada material, lo primordial es que el material al que se somete el método no pierda la propiedad que queremos rescatar para adicionarla a otro material.

Como algunos ejemplos de compuestos utilizados en la arquitectura se han hecho muchos intentos por reforzar los concretos ya que es el material de construcción por excelencia y han surgido investigaciones interesantes. La principal característica de un concreto es que es un material cerámico que tiene grandes virtudes en el campo de la compresión, pero carece de resistencia a la tracción lo cual lo hace un material sumamente frágil y normalmente está condicionado a un refuerzo metálico. Éste material es conocido como concreto armado y presenta ciertas ventajas sobre el concreto normal pero también aumenta el peso total

17.- Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. “Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería.” Revista Mexicana de Ingeniería Química 15 Marzo 2007: 51-58. ., Septiembre 2016 .,

18.- Aguilar, Victor. “Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida”. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

de la estructura generando a su vez estructuras menos esbeltas, es por ello que se investigan alternativas que permitan que el concreto sea más ligero pero que tenga una aportación sobre su resistencia a la tracción y que disminuyan por lo tanto su fragilidad como material cerámico.

Actualmente tenemos concretos adicionados con fibras especiales de vidrio llamadas *AR (Alcali-Resistant)* y lo que hace es suplir el trabajo que tiene el acero al ser incorporado con el concreto¹⁸.

Con respecto a los ejemplos que podemos observar en el campo de la arquitectura con GRC (concreto reforzado con fibra de vidrio) encontramos

algunos paneles prefabricados para fachadas y cerramientos, sistemas modulares para viviendas, encofrados, restauración de fachadas, albercas, pavimentos, barreras y sistemas de aislamiento acústico, revestimiento de túneles, etc.

También lo encontramos como sistemas retardantes de fuego en puertas y pantallas. En instalaciones sin duda ha tenido un campo de acción extenso que va desde tuberías para saneamiento, fosas sépticas, pozos y registros, canalizaciones de tuberías eléctricas, paneles con rellenos de fibra para el aislamiento térmico, control acústico etc.

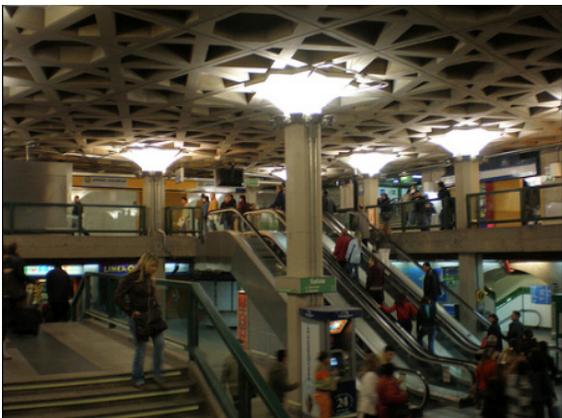


Ilustración 10.- Plafones con uso de fibra de vidrio, España. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida"



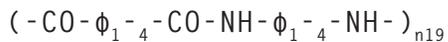
Ilustración 11.- Uso de concretos con fibra de vidrio en fachadas. España. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida"

19.- "Materiales Compuestos." Ciencia de los Materiales. Málaga, España: ., 2004/2005. 8

2.3 ARAMIDAS

2.3.1 PROPIEDADES GENERALES

La fibra fue descubierta por Stephanie Kwolek y fue introducida al mercado por la compañía Dupont en 1972 y son fibras sintéticas poliméricas de la familia de las poliamidas aromáticas las cuales son microestructuras con filamentos que se entretajan formando un entramado tan denso que soporta presiones de hasta ~200Gpa y una tensión de 3.6Gpa. Aparte de tener características tan generosas como estas alcanzan una gran flexión sin lograr deformar su estructura. En el mundo de la química su estructura es considerada de las más estables donde encontramos:



Que se refiere a un compuesto formado por elementos como el Carbón (CO) y NH₂O como el resultado de un enlace peptídico, esto se refiere a la alineación de sus moléculas mediante anillos aromáticos con uniones NH²⁰, gracias a su alto grado de cristalinidad sus propiedades son obtenidas.

Dentro de la producción de las fibras de aramida encontramos un proceso simple de extrusión de filamentos que previamente

fueron reposados en un solvente de entre -50°C y -80°C, este filamento es enrollado en una bobina con una temperatura de 200°C(*ídem*) lo que ocasiona la evaporación del dicho solvente y se obtiene así el filamento puro.

Esta tiene distintos tipos de presentación en el mercado:

- **Fibra continua**, en mechas de filamentos continuos.

Pueden obtenerse los filamentos sin ningún tipo de acabado, son frágiles pero con una relativa alta flexibilidad.

Rovings y mechas se utilizan primordialmente en enrollamiento filamentario, cintas de preimpregnado y pulltrusion.

Tejidos, es el estado en donde mayormente son encontrado todo tipo de fibras.

- **Fibra discontinua**, la inerte tenacidad que presentan las fibras y su naturaleza fibrilar permite formas que no son posibles con otro tipo de refuerzos y vienen en presentaciones de fibra corta de 6.4 hasta 100mm de longitud, es favorable ya que presenta mejor resistencia al pandeo. Tenemos también los mats y feltros de fibra corta, como su nombre lo dice son fieltros

20.- "Materiales Compuestos." Ciencia de los Materiales. Málaga, España: ., 2004/2005. 8

21.- *ídem*

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

formados por entretejidos de fibras cortas de aramida unidos con un ligante. Pulp que está compuesto a base de fibras cortadas y fibriladas que pueden usarse como aditivos especiales y por último el Nomex que también es su nombre comercial, en donde se dispone la fibra en estructuras hexagonales de nido de abeja²².



Ilustración 12.- Fibra hexagonal Nomex grado aeroespacial. DuPont de Nemours, Inc.

2.3.2 PROPIEDADES ESPECÍFICAS

Las aramidias al ser fibras poliméricas sintéticas tienen una composición química muy particular de moléculas de carbono con uniones de anillos aromáticos e hidrogeno, reciben el nombre de anillos por la composición teórica en forma circular donde encontramos carbonos con enlaces dobles y simples, éstas familias de compuestos aromáticos provienen del benceno (C_6H_6), también son caracterizados por sus aromas intensos de donde deducimos el nombre de compuestos aromáticos, algunos ejemplos que encontramos son los bálsamos y las resinas por mencionar algunos.

Formando parte de las familias de poliamidas aromáticas encontramos entonces un compuesto sumamente estable en su estructura molecular, además las aramidias presentan un enlace denominado peptídico en donde el compuesto tiende o está obligado a perder una molécula de agua y la formación de un enlace covalente como lo vemos en la expresión que representa la composición química de las aramidias en su generalidad:



Una de las grandes ventajas que tiene la aramida sobre otros

22.- Águilar, Victor. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010

polímeros es la calidad de la composición que tiene lo cual lo vuelve más resistente contra elementos que químicamente desestabilizan o aceleran los procesos de degradación en la mayoría de los polímeros tales como la fotodegradación, la solubilidad ante acetonas o solventes químicos y la descomposición total del elemento mediante la aplicación de calor directo.

Como lo habíamos mencionado con anterioridad las aramiditas al formar parte de los polímeros presentan algunos puntos débiles en cuanto a sus características químicas, pero, las aramiditas al tener su estructura tan bien resuelta logra darle un giro a algunas debilidades que sus primeros no lo hacen, una de estas características es la resistencia a aceites y químicos derivados del petróleo, hay una gran variedad de elementos entre los que podemos hacer mención como el xileno, el hexano, heptano, acetona, tricloroetileno, tetracloroetileno, entre otros. Normalmente en un polímero encontramos cierta debilidad a la aplicación de estos solventes, lo que genera en su mayoría una degradación y descomposición del polímero, acelerando su proceso de vida. Como ejemplo podemos describir el proceso de aplicación del

conocido pegamento Resistol 5000 al contacto con cualquier recipiente de tereftalo de polietileno, mejor conocido como *PET*. El resistol 5000 al hacer contacto con el envase presenta de inmediato una deformación en la estructura del contenedor, degradando y destruyendo las cadenas, por lo que vemos la solvencia del tereftalo de polietileno, esto se debe a los compuestos con los que está fabricado el Resistol que son básicamente acrílicos, tolueno, acetatos de etilo entre otros compuestos no aromáticos los cuales son sumamente corrosivos para éste tipo de contenedores, ahora bien las aramiditas presentan una gran resistencia hacia la mayoría de los solventes utilizados comúnmente en la industria de la construcción, aeronáutica, marítima, balística, espacial, etc.

Tabla:

- Ácidos concentrados - Mala
- Ácidos diluidos - Aceptable
- Alkalís - Buena
- Alcoholes - Buena
- Cetonas - Buena
- Grasas y Aceites - Buena
- Halógenos - Buena
- Hidrocarburos Aromáticos Buena

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

Podemos observar también la degradación natural de la mayoría de los polímeros hacia los rayos UV en donde también encontramos una degradación del polímero, pero con una continuidad menor a la que se observa con los solventes, las aramidas presentan el mismo proceso de degradación hacia los rayos UV, éste proceso es comúnmente llamado como fotodegradación.

El proceso de fotodegradación se da cuando el compuesto está expuesto a la radiación ultra violeta de los rayos solares combinada con la acción del oxígeno de la atmósfera, lo que produce los llamados carbonilos que son carbonos con enlaces dobles de oxígeno, esto afecta la cadena principal del compuesto generando deficiencias en su composición, lo que aterriza en problemas o reducciones en sus características primarias, así como la posible desintegración del elemento.

Éste proceso puede frenarse en gran medida gracias a los recubrimientos o compuesto por los que está o estará integrada la fibra, recomendando siempre evitar la exposición al sol en la medida de lo posible.

Otra característica que hace bastante atractiva la oferta de las aramidas en la industria

no solo de la construcción sino en muchos otros campos en los cuales se ha utilizado con consecutividad es debido a su elevado grado de estabilidad térmica.

La estabilidad térmica nos habla sobre el punto de descomposición del material en un ambiente controlado y en el caso de las aramidas son un material que no se funde por debajo de los 500°C por eso es que es muy usada en trajes para bomberos. Aunque sea muy resistente a altas temperaturas la exposición prolongada al calor afecta la composición de las aramidas por lo que se observa una reducción del 20% de las capacidades mecánicas que normalmente presenta en un estado regular a temperatura ambiente. Por este motivo sería ideal para estructuras en edificios ya que tiene la capacidad de autoextinguir la flama, lo que evita la propagación del agente agresor y protegerse a sí misma.

Gracias a que se autoextingue la flama es necesario la aplicación constante de calor para lograr degradar la fibra por medio de temperatura, misma que está muy por encima de los polímeros comunes.

Las fibras de aramida presentan varias propiedades físicas entre las que podemos destacar

su resistencia a los cortes, esto significa que debido a la forma del tejido súper denso no es posible fracturar la estructura mediante ciertos cortes, gracias a esta propiedad las fibras de aramida han sido utilizadas como forros para la protección contra ataques de armas blancas y armas de pólvora.

El kevlar es la aramida más comúnmente usada para estos propósitos, donde encontramos compuestos o paneles en capas donde las fibras de aramida reciben el impacto impidiendo que las balas penetren al interior del panel o chaleco y mediante espumas hiper densas disipar el golpe que la expansión provoca, lo interesante es que es muy difícil penetrar las fibras por medio de fuerza bruta aunque hay ciertas resinas que incluso realizando cortes cuidadosos impiden que se rompan las fibras, es tan fuerte ésta propiedad de las aramidas que incluso se usa para trajes antibombas, en donde se ha investigado cual es el daño generado por las ondas explosivas hacia la estructura entretrejida de la tela y ha respondido favorablemente aunque por sí sola no absorba toda la cantidad de presión generada por los explosivos, es por esta razón que generalmente va acompañada de materiales que disipen la

energía. Las fibras de aramida al ser telas entretrejidas no tienen una resistencia hacia la compresión ya que es una estructura que trabaja hacia una sola dirección a diferencia de elementos pétreos como el concreto, o a diferencia de cualquier otro componente que tenga rigidez en el eje z por decirlo de algún modo, pero a diferencia de muchos otros materiales tiene una elevada estabilidad dimensional; Ésta es una propiedad que los materiales tienen y se refiere al cambio que estos pueden llegar a sufrir si se les aplica calor o si llegaran a absorber humedad llegando a cambiar las dimensiones originales del material, el fenómeno es muy importante en el sector de la construcción ya que hay materiales que tienen una estabilidad dimensional muy baja lo que ocasiona agrietamientos en juntas con otros materiales como es el caso de las tierras y el concreto.

La conductividad térmica de los materiales es importante, y en este caso la aramida es bastante buena debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica, esto significa que la cantidad de energía que permea es muy poca, por lo que aparte de resistir temperaturas muy altas la energía que deja pasar del otro lado es muy

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

poca, de no ser así los trajes de bombero no funcionarían ya que el material seguiría intacto después de 100° pero seguramente el cuerpo de una persona sufriría quemaduras muy severas y no es el caso.

Son grandes aislantes eléctricos como casi todas las familias de los polímeros lo son, el fenómeno de la aislación eléctrica se refiere a que no existe paso de corriente o de electrones impidiendo el intercambio de energía entre un cuerpo y otro, los aislantes eléctricos son usados también gracias a su capacidad de resistir el calor ya que el paso de electrones de un cuerpo a otro genera una elevación en las temperaturas que en algunos casos puede llegar a derretir el material, es por eso que los materiales que sirven para llevar cableado eléctrico en instalaciones requieren de una certificación, en el caso de las *aramidas* pueden ser seguras desde 18 a 40 V/mil de KV/mm, esto dependiendo del tipo de compuesto de aramida y del grosor del material que se ocupe.

La contracción térmica se refiere a la capacidad que los materiales tiene al reaccionar hacia el frío, generando comúnmente una contracción o disminución en las medidas que el material presenta a

temperatura ambiente, de los casos mas sensibles a los cambios de temperatura son algunas aleaciones metálicas, pero en el caso de las aramidas estas responden muy bien hacia los cambios bruscos de temperatura, no solo al frío, sino como mencionábamos anteriormente a las altas temperaturas, colocándolo como un material bastante noble y con propiedades excelentes para ser probado como agregado en algún otro material. De hecho, el *Nomex* que es una variable de las fibras de aramida soporta temperaturas de hasta -196°C lo cual es la temperatura en la que el nitrógeno hierve, por eso se ha pensado su posible uso en criogenia y gracias a sus propiedades tan estables de contracción térmica no presentan problemas de dilatación o contracción.

Por si fuera poco también es un material que es resistente a la radiación, soportando radiaciones ionizantes de hasta 8Mgy, que es la medida internacional en la que se cuantifica las dosis de absorción de iones por un determinado material, en el caso de algunas fibras de *aramida* aún después de ser expuestas ocho veces a esta radiación conservan sus características mecánicas y eléctricas y gracias a que no tienen productos reactivos

tóxicos son bastante seguros para los seres humanos y los animales.

Se ha comprobado también que las fibras de aramida responden muy bien a los ambientes húmedos mejorando en muchos casos su cualidades mecánicas, uno de los grandes problemas que presentan las aramidas son la cohesión con otros materiales ya que tienen propiedades mecánicas muy grandes y en algunos casos al generar compuestos con ellas el problema surge en la relación de la matriz y el agregado, investigaciones revelan que al tratar las fibras con soluciones aceitosas antes de la creación del compuesto ayuda a estabilizar las variables de desprendimiento de los cuerpos, si bien aún no se encuentra un material con el que funcione perfectamente, es lo más acertado que se conoce por el momento.

Entrando a las propiedades mecánicas del material nos damos cuenta de que es un material que funciona excelente a la tracción soportando fuerzas de hasta 1264448.10kg/cm^2 y una resistencia a la tracción de 35690.06kg/cm^2 lo que lo hace un material perfecto para trabajar en la arquitectura como velarias o supliendo las funciones de los tensores de acero, el único problema es

el costo, la mano de obra especializada y que aún no hay incursión tecnológica del material para la implementación de este en la arquitectura como un elemento de uso cotidiano por lo que las conexiones con otros elementos aún no están resueltas del todo.

Tiene una densidad de 1.44g/cm^3 que es bastante baja lo cual en relación con el peso y las propiedades que tienes se genera una relación peso/volumen que funciona bastante bien, aunque normalmente a mayor masa encontramos un mejor aislamiento el caso de las aramidas es especial, ya que tiene un coeficiente de 0.04W/m-1 lo que es bastante bajo, teniendo en cuenta la temperatura máxima de utilización que es de 245°C y la mínima que ronda los -200°C . Su coeficiente de rigidez es de 1223659.45kg/cm^2 mientras que su competidor más cercano usado en la industria de la construcción es el acero con 2039432.42kg/cm^2 , las fibras de aramida a diferencia de las de Carbón no cuentan con tanta rigidez por lo que las hace menos frágiles que éstas y que el acero, permitiendo tener un punto de ruptura mayor aunque las vuelve más elásticas.

Con respecto a su resistencia a la tracción de 35690.06kg/cm^2 si lo comparamos con el

NOTA: El módulo de elasticidad es también conocido como módulo de *Young*, estableciendo el parámetro siguiente: A mayor modulo de elasticidad mas rígido y frágil se vuelve un material, a menor modulo elástico el material tiene a ser maleable y flexible.

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

acero que es de 15295.74kg/cm^2 encontramos un material que seria un mejor prospecto como refuerzo de los concretos ya que además de soportar mayores esfuerzos a tracción posee la ventaja de no presentar corrosiones hacia muchos agentes nocivos como lo son los oxidos en los metales y estos tienden a aparecer cuando hay fisuras en los concretos y llega a haber filtraciones hacia el interior de los refuerzos de acero, por lo que ha habido investigaciones en el campo para determinar la factibilidad de las fibras en forma de tensores trenzados ahogados en vigas de concreto pretensadas, con resultados bastante prometedores para la industria, aunque si bien el costo es mas alto se ve reflejado en la seguridad de las estructuras y en la resistencia que estas obtienen al ser trabajadas con un material alterno que específicamente trabaja a tracción.

La elongación a la rotura es un fenómeno que va de la mano de la rigidez de los materiales ya que a mayor rigidez generalmente su elongación baja ya que la rigidez del material lo vuelve frágil, es el mismo caso de las aramiditas, si comparamos las propiedades del *Kevlar29* contra las del *Kevlar 49* encontramos una diferencia de un 1.2% de la

capacidad de elongarse sin rotura simplemente por el hecho de una composición menos rígida en el primero. Sus porcentajes van en *Kevlar29* de un 3.6% y en el *Kevlar49* de 2.4%, si hacemos la comparación nuevamente con el acero que tiene un 1% de deformación antes de su ruptura empezamos a ver puntos que van haciendo a las aramiditas unos competidores serios en el campo de la construcción.

El valor de tenacidad es en torno a los 50Mj m^{-3} expresado en el sistema internacional de medición, la tenacidad se refiere a la fuerza que contrapone o que se resiste un material a ser deformado o a romperse, como observamos la tenacidad del *Kevlar* es bastante alta comparada con la del acero que es de 6Mj m^{-3} , es poco más de 8 veces la resistencia que tenemos en el acero. Con anterioridad hablábamos de que las aramiditas soportan temperaturas cercanas a los 500°C que es cuando la estructura empieza a descomponerse con mayor velocidad, pero aún a temperaturas cercanas a la de su descomposición sigue manteniendo sus propiedades mecánicas solamente bajando un 20% de algunas de sus capacidades como es el caso de su modulo elástico, pero para esto tiene que estar expuesto a temperaturas de 180°C o más

durante un periodo de 500h lo cual es un panorama bastante inusual para la mayoría de los materiales por lo menos en la construcción.

Según el tipo de fibra se hayan en modulo bajo y alto modulo que oscilan entre $E= 70$ a 130 GPa Las aramidas por sí solas difícilmente las encontraríamos en la arquitectura, es por eso que las grandiosas propiedades de la aramida combinadas con las de otro elemento como matriz nos aportan las cualidades que requerimos.

Materiales de fibras sintéticas como el *spectra*, *kevlar*, *nomex*, *twaron*, etc. Se caracterizan por su alto valor en la tabla de esfuerzos a tensión de 2758 MPa en un estado natural y sin porcentajes de humedad importantes. Las fibras de *spectra* se caracterizan por ser fibras de polietileno ultraligeras recubiertas con gel que vuelven a las fibras bastante resistentes contra abrasivos químicos, luz ultra violeta entre otros. Debido a su ligereza y resistencia tiene usos similares a los que tienen las fibras de aramida, pero con una composición química diferente aunque su uso es más común en cordeles para uso industrial debido a las características antes mencionadas²³. También encontramos las mismas fibras

de kevlar49 impregnadas con resinas para mejorar sus propiedades y nos arrojan en las pruebas valores de hasta arriba de 3447 MPa. Lo más interesante es la capacidad de recobrar su estado natural tras haber sufrido grandes esfuerzos, lo que significa que tiene la capacidad de elongarse 2.4% mientras que el acero se rompe en torno al 1% de su deformación.

El *Kevlar* así como el *Nomex* son resistentes a temperaturas de hasta $420-480^{\circ}\text{C}$ lo cual los hace un material idóneo para recubrimientos contra incendios o bien para trajes de bomberos.

Su temperatura de descomposición ronda los 500°C y se afecta sensiblemente su resistencia del módulo de elasticidad si este material permanece tiempos prolongados a temperaturas por arriba de los 180°C , el resultado es la reducción en un 20% de su módulo elástico.

Las fibras de aramida son materiales que específicamente trabajan a tracción gracias a que presentan cadenas moleculares alineadas y a su grado de cristalinidad, para efectos generales se considera cinco veces más²³ resistente que el acero y con una estabilidad mecánica de relación bastante buena

23.- Águilar, Victor. "Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010

24.- Honeywell International Inc. (2015). Spectra Fiber. Junio 2020, de Honeywell International Inc Sitio web: <https://www.packagingcomposites-honeywell.com/spectra/product-info/spectra-fiber/>

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

como lo vimos anteriormente. Gracias a que son cadenas son tan sólidas tienen un muy bajo índice de fragilidad y presentan muy buenos resultados a la absorción de energía sin fisurarse.

Un inconveniente si se quiere ver de esa manera es la baja adherencia a matrices termoplásticas. Por un lado, es un inconveniente para ciertos modos de producción del material, pero presenta mejores características que la fibra de vidrio y una flexibilidad de usos mayor que la fibra de carbono debido a que no es tan frágil como esta última.



Ilustración 13.- Perfil tubular a base de fibra de carbono unidireccionales, perfil comercializado por DragonPlate®.

2.3.3 CASOS DE USO EN LA ARQUITECTURA

Gracias a las propiedades tan extensas que tienen las fibras de aramida, se han utilizado en muchos sectores de la industria naval, aeronáutica, tecnologías, arquitectura, balística entre otros, pero los usos que se van generando con el material van en aumento incursionando en varios aspectos de seguridad principalmente. Entre los que se destacan podemos mencionar el uso de las fibras para chalecos antibalas con combinaciones de *Nomex* y *Kevlar* donde las cualidades de los dos a parte de generar resistencia a las explosiones y a la abrasión juega un papel importante la cualidad autoextinguible que tiene. Una de las grandes ventajas que proporciona para la seguridad del portador es su eficiencia y ligereza, las estadísticas demuestran que en los EUA ha reducido las muertes y las lesiones en más de 2500 agentes en el 2004, así como ayudado a prevenir quemaduras. Los chalecos no solo sirven contra el impacto de proyectiles, sino que dependiendo del compuesto del chaleco también se hace idóneo para recibir puñaladas, impactos severos o la combinación de otros.

Debido a las investigaciones en armamentaria se han observado

daños severos en víctimas con quemaduras causadas por la explosión de las cámaras de los misiles, bombas o granadas, por lo que la ropa con estos materiales ha sido puesta como medida preventiva en muchas de las industrias que trabajan con materiales peligrosos o que corran peligro alguno de los antes mencionados. Los tejidos con este tipo de fibras pueden

proporcionar transpiración a los usuarios por lo que el uso de las telas se vuelve menos incómoda para la realización de actividades cotidianas, además de ser un material que dura cinco veces más que el polyester o el algodón, que en algunos casos con ciertos aditivos son usados para los mismos propósitos.

Propiedades	Kevlar49	HM-50	Twaron
Modulo de Elasticidad (Gpa)	127.5	75.5	125
Resistencia a Tracción (Mpa)	2.62	3.04	2.8
Deformación de Rotura (%)	2.4	4.2	2
Diametro (10-6mm)	10	12.2	-
Peso específico	1.45	1.39	1.45

Tabla 8.- Propiedades de distintas fibras de aramida

2.4 POLIPROPILENO

2.4.1 PROPIEDADES GENERALES

El *Polipropileno (PP)* es un tipo de polímero obtenido de la polimerización del propileno y tiene una cadena molecular $(C_3H_6)_n$ donde grupos de metilo cuelgan en uno o ambos lados de la cadena, el tipo de propiedades que tenga el polipropileno depende mucho del proceso y el tipo de enlaces de carbono e hidrogeno que presenten según su estructura molecular.

Comercialmente encontramos cuatro tipos de *polipropileno*, primeramente tenemos el isotáctico que es el que se usa comúnmente para inyectado de piezas como tapas, juguetes, contenedores, etc. Tiene una cristalinidad muy elevada que va del 70 al 85% de translucidez, aunque presenta buenas propiedades mecánicas según los estudios de Mireya Matos no ha sido idóneo para ser probado como materiales de alto impacto.

En segundo lugar encontramos el polipropileno atáctico que se caracteriza por tener una alta pegajosidad lo cual permite adherirse a superficies con altos niveles de impurezas, también presenta un punto de fusión mas bajo que los otros.

El *polipropileno sindiotáctico*, dentro de todos los grupos de *polipropilenos* que tenemos éste es el mas elástico que se ha encontrado debido a la forma aleatoria de organización de los metilos en la cadena molecular, de todos los tipos de *polipropilenos* que se encuentran este es el que presenta una resistencia mas baja cuando de cualidades mecánicas hablamos.

Por último encontramos al *copolímero de alto impacto o PPc*, uno de los inconvenientes del *PP* es que la transición dúctil-frágil del *PP* normalmente ocurre a temperatura ambiente alrededor de los 0°C lo que lo hace tener limitaciones mecánicas y este error es corregido mediante refuerzos de elastómeros que se añaden en la segunda fase, que es denominada la más dúctil, este proceso de adición puede darse ya sea por mezclado en fundido o por copolimerización.

Normalmente se utilizan compuestos con *Poli-etileno (PE)* o cauchos poliolefínicos como el *Etileno Propileno (EPR)*, estos mediante la copolimerización son muy efectivos para mejorar las propiedades mecánicas²⁴. Es aquí en donde encontramos el campo del *PPc* o copolímero de alto impacto, que normalmente tienen en su fase dispersa

24.- Matos Mireya, Sánchez Johan, Jimenez María, "Propiedades mecánicas y comportamiento a fractura de un polipropileno homopolímero comparado con un copolímero de alto impacto grado comercial", USB, UPC, 2006 www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

elastomérica (*EPR*) evita la separación de fases macroscópicas. Esto nos da un material sumamente resistente que sigue conservando las características típicas de un *PP* normal solo que con una resistencia mayor.

2.4.2 Propiedades específicas

Rígido pero elástico dentro de los polímeros que se utilizan o que posiblemente podrían utilizarse pocos tienen esta característica que permite que un elemento sea rígido hasta el grado de soportar cargas de compresión pero lo suficientemente elástico para no quebrarse con el mínimo esfuerzo.

Soporta temperaturas de hasta 240°C lo cual es una temperatura bastante considerable para ser un polímero, además de ser uno de los polímeros que cuentan con mayor cristalinidad, por lo que son utilizados para diversos usos que suplen al vidrio.

El *PP* además presenta un fenómeno molecular muy interesante que es el efecto bisagra, éste efecto reorganiza las moléculas de una manera que aunque el *PP* sea doblado no presenta fracturas al momento de ser moldeado lo cual otorga sin duda alguna una ventaja sobre algunos otros polímeros

como el acrílico y el *HDPE*, además de que el comportamiento mecánico que presenta el *PP* rebasa las conductas que estos dos anteriores tienen.

A continuación se muestra una gráfica de características generales del *PP*.

Propiedades	PPh	PPC
Densidad		
A 23°C (g/cm ³)	0.911±0.002	0.899±0.002
A 230°C (g/cm ³)	0.68±0.001	0.76±0.01
Indice de Fluidez		
MFI (dg/min)	6.1±0.2	9.1±0.1
MVR (cm ³ /10min)	9.1±.02	12±3
Termicas		
Tc (°C)	112.9±0.5	122.2±0.5
Tm (°C)	165.4±0.5	163.0±0.5
Xc (%)	46±2	36±2
Vicat (°C)	156±2	150±1
HDT (°C)	68±4	73±2

Tabla 9.- Gráfica de características físicas del homopolímero y del copolímero de alto impacto.

2.4.3 CASOS DE USOE EN ARQUITECTURA

Actualmente podemos encontrar un uso de fibras de polipropileno (*PP*) como agregado de concretos con el fin de proteger al material de altas temperaturas y ayudar al concreto a que reduzca el riesgo de generar agrietamientos por la pérdida acelerada de humedad dentro del proceso de curación del material. Las fibras de *PP* no solo estabilizan la mezcla, sino que también otorgan una rigidez mayor a la mezcla y

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

a diferencia de los metales, los plásticos no presentan corrosión y tienen a tener una vida mas longeva en ambientes húmedos. Presentan también un fenómeno denominado como "Spalling" que consta de la generación de microcanales creados por las altas temperaturas en el fraguado del concreto y que ayudan a disipar los evaporamientos del agua al interior de la mezcla aumentando el tiempo de degradación de la estructura en casos de incendio.

2.5 MATERIALES COMPUESTOS CON ARAMIDA

La aramida por sí sola no tiene los atributos necesarios para ser útil en el mundo de la arquitectura, es por eso que ha habido tanto auge con los materiales compuestos. Los materiales compuestos con fibras de cualquier tipo son regularmente los más usados para sistemas estructurales (hablando del mundo de la arquitectura) y como materiales en industrias textiles.

Desde el año de 1978 se hicieron investigaciones sobre concreto y fibras de aramida con la finalidad de suplir los esfuerzos metálicos pensando que gracias a las capacidades que tiene el material podría ayudar en gran medida al comportamiento mecánico del

material. Pero en las primeras experimentaciones realizadas por Walter y Majumdar aunque los resultados no fueron tan satisfactorios. La experimentación consistió en incorporar trozos de filamentos de *Kevlar* en la mezcla de cemento, permitiendo un volumen máximo de fibras del 2% pero la dispersión no fue la esperada así que los resultados no fueron buenos.

A lo largo de los años encontramos diversas investigaciones que han intentado incorporar las fibras de aramida en los concretos, otro caso es el de Akihama en Japón para el año de 1986 donde tuvieron un mayor control del tamaño de las fibras de refuerzo para con el concreto, en donde tenían medidas variables de entre 1 a 10mm, logrando tener un volumen del 3% del material en fibras. En este caso se comprobó la teoría de que eran muy buenos refuerzos de ingeniería pero que aún no habían logrado ser integradas eficientemente a las mezclas de concreto.

Para el año de 1988 el concreto seguía siendo el blanco de pruebas para ser adicionado con otro tipo de materiales, en estos años encontramos un auge de concreto con fibras de amianto, mejor conocido en México como asbesto. Éste concreto presentaba grandes

propiedades mecánicas, pero con la gran desventaja de que las nanopartículas del material generan problemas de deformación celular, generando muchísimos tipos de enfermedades. Es en donde la investigación de Gale entró como un parteaguas de materiales alternos que realmente funcionaran como aditivos al concreto.

Su módulo de experimentación consistió en la combinación de fibras y pulpa de aramida en proporción 1 a 2 del total del peso para justamente reemplazar el amianto y los resultados fueron que con un 6% del total del peso del material en fibras tenía la misma resistencia a la flexión y tres veces más tenaz que con un 15% de fibras de amianto.

Si bien la aramida no ha sido un material que tenga muchas aplicaciones en la arquitectura, es y será un material que nos dará mucho de que hablar ya que sus propiedades son tan diversas que se usa tanto para crear trajes antibombas que absorban los impactos por ondas de choque hasta en aeronáutica, náutica y trajes de bomberos.

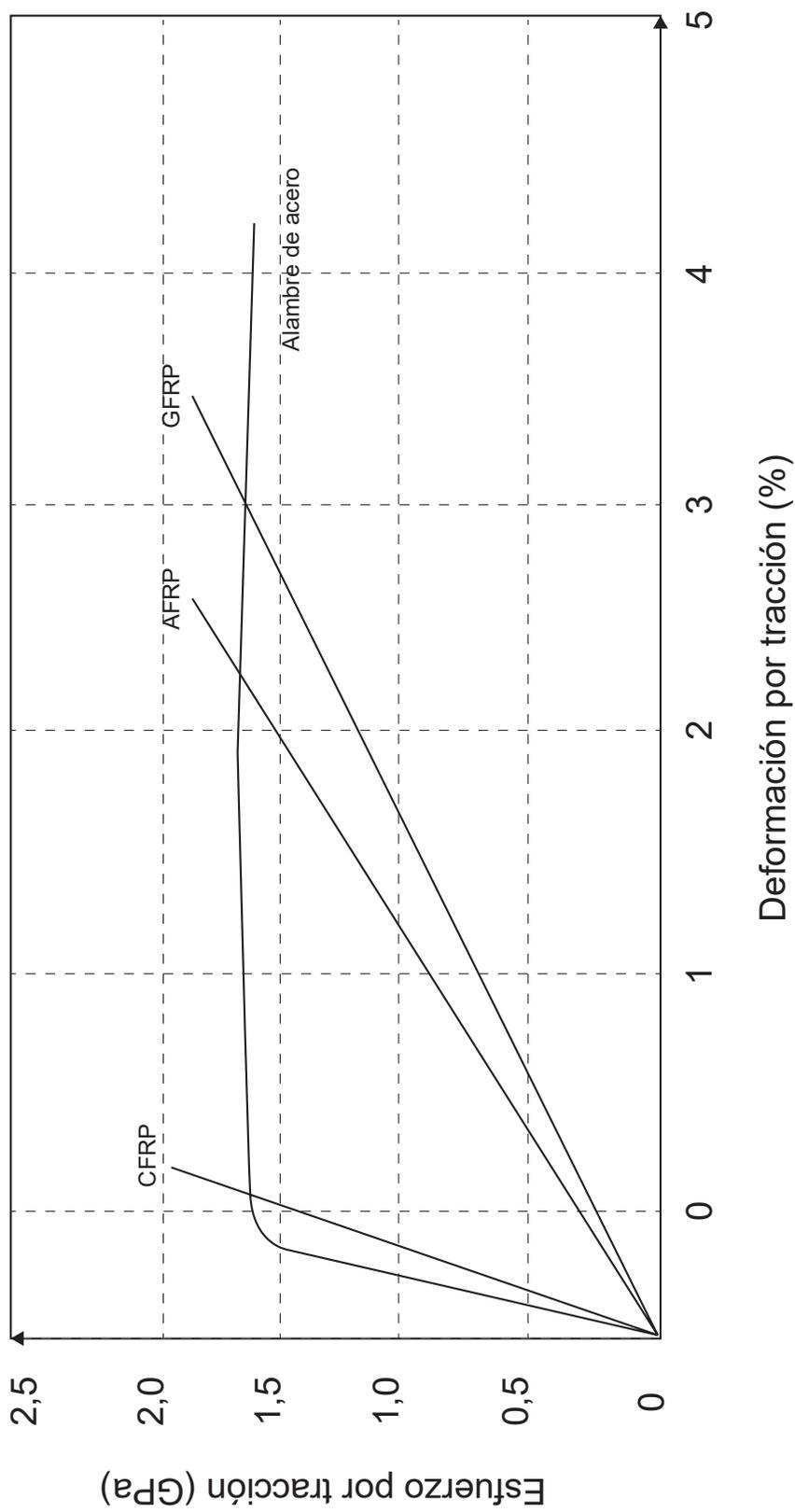
Actualmente se tienen diversas investigaciones sobre la incursión de las fibras de aramida, mas particularmente

el *Kevlar49* y encontramos una serie de resultados sorprendentes con respecto a las propiedades mecánicas del material. Lo interesante del Kevlar 49 es su gran modulo elástico $1.275e+6\text{Kg/cm}^2$ ²⁵, pero tiene la gran desventaja que debido a su forma física no tiene resistencia a la compresión es por eso que se necesita una matriz que aporte estas características al material, es aquí donde entendemos el éxito de los materiales compuestos ya que se adaptan a las necesidades y se crean artificialmente.

Un artículo de Janet M. Leey Chris J. Burgoyne del ACI Structural Journal²⁶ experimentó sobre los beneficios de incorporar fibras de distintos materiales en los concretos pretensados, ya que el acero por sus características físicas es susceptible a la corrosión y en las estructuras pretensadas es muy difícil localizar los daños que recibe el acero ya que están totalmente cubiertas por concreto. En este artículo se pusieron a prueba los *CFRPs* (*fiber reinforced plastics*) como refuerzo para el concreto, estas fibras pueden ser orgánicas o inorgánicas en matrices de resinas. También se pusieron a prueba las *GFRPs* (*carbón fiber reinforced plastics*) y por supuesto las *AFRPs* (*aramid fiber reinforces plastics*)

25.- Dato de la conversion,

26.- Lees, Janet M. & Burgoyne Chris J.. "Experimental Study of Influence of Bond on Flexural Behavior of Concrete Beams Pretensioned with Aramid Fiber Reinforced Plastics." ACI Structural Journal May-June 1999: 377-385. ., Octubre 2015 ,



Gráfica 1.- Comparativa de las fibras en su módulo elástico.

Las fibras fueron probadas con dos diferentes diseños de fibras *AFRP*, la primera es un trenzado de fibras de *kevlar49* con una matriz de resina epóxica y el segundo un espiral enrollado con fibras de *technora* sobre una matriz de viniléster la cual es una resina que soporta altas temperaturas y soporta las corrosiones químicas muy eficientemente. Esta fibra crea el compuesto con la resina por el método de poltrusión, el proceso consiste en impregnar la resina termoestable con las fibras por medio de calor y es un proceso muy común en la extrusión de perfiles plásticos con fibras.

Los tendones de compositos *AFRP* suplieron el acero pretensado y fueron agregados con un 60-65% de la tensión que soportaba el compuesto con diferentes proporciones de tendones agregados a las vigas de concreto donde también se comparó el valor de resistencia que el acero otorga actualmente:

- 3 tensores de *AFRP* trenzadas con un área de 11mm²
- 2 tensores de *AFRP* espiral enrollado con un área de 12.6mm²
- 2 tensores de acero con un área de 19.6mm²

La experimentación se realizó con vigas de cemento portland con la adición de los tensores en dos diferentes consolidaciones, la primera con las vigas totalmente amalgamadas a los tensores, la segunda permitiendo que hubiera movimiento por parte de los tensores, la tercera es un híbrido con una adición intermedia de consolidación. Estos procedimientos se hicieron de igual manera para los tensores tradicionales de acero y esta tabla de agrietamientos en las vigas muestra los resultados que se obtuvieron.

Material	Densidad Kg/m ³	Tipo de fibra	Módulo de Young GPa	Máximo porcentaje de elongación	Resistencia a la tracción	Vf Porcentaje
Fibra trenzada	1.28	Kevlar 49	68.6	2.0	1480	65 a70
Kevlar 49	1.45	Kevlar 49	120.0	2.5	2800	100
Trenzado en espiral	1.3	Technora	54.0	3.7	1900	65
Technora						
Fibra Technora	1.39	Technora	73.0	4.6	3400	100
Acero (Hilo denso)	7.8	N/A	200	10.0	650	N/A
Acero pretensado	7.8	N/A	220	4.2	1760	N/A

Tabla 10.- Tabla de resultados con las vigas y los tensores.

Lo que se puede observar en la experimentación es un excelente comportamiento de los *AFRP* como componentes sustitutos del acero en los concretos pretensados, además de que presentan un comportamiento positivo hacia las corrosiones que normalmente se dan en los elementos de metal que llegan a tener filtraciones de agua hacia el interior del concreto. Aparentemente una de las mayores ventajas es la flexibilidad con la que el material se puede generar y las distintas facetas que puede obtener, además de que es bastante ligero con relación al metal. Pero presenta el factor económico en contra suya además que no es un elemento muy recurrente en la actualidad para el pretensado de concretos por lo que requeriría una mano de obra especializada en lo que el material es impulsado a su inclusión en el mundo de la construcción y la arquitectura. Todos los materiales de innovación presentan puntos a favor y en contra, aunque mayormente los puntos en contra son debido a la baja o nula promoción y que propicia que la mano de obra especializada se encarezca. Las soluciones con materiales de innovación como es el caso de Shiguero Ban y su sistema de tubos de cartón son muy rentables ya que si comparamos este sistema en cuestión de facilidad

constructiva y accesibilidad global deja muy por de lado a otros materiales. El problema es ¿hasta qué punto puedes realizar arquitectura a gran escala?, es por esta razón que los materiales innovadores aparte de ir enfocados hacia distintas áreas de la arquitectura es indispensable que su comercialización y su forma de incursionarlo en la industria sea lo más sencilla posible.

Podemos encontrar dentro del mundo de las aramidas aplicadas a la arquitectura un sistema de generación de perfiles estructurales llamado pultrusión, que se deriva de la palabra en inglés de *pull* (estirar o tirar), lo que básicamente hace es mediante un proceso mecánico ir tirando de las fibras y generar mediante la compresión y guías nuevos perfiles, esto se ha probado con matrices de *poliéster isoftálico (PEI)* y también con matrices de éster vinílico (E.V.), y los resultados en las tablas de esfuerzos mecánicos²⁷.

Los materiales compuestos con fibras sintéticas también se han trabajado en México y encontramos casos interesantes como el de los investigadores Gonzales-Chi y Ramos-Torres, que trabajaron con matrices termoplásticas de polipropileno

27.- "Materiales Compuestos." Ciencia de los Materiales. Málaga, España: .. 2004/2005. 8

28.- Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. "Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería." Revista Mexicana de Ingeniería Química 15 Marzo 2007: 51-58. .. Septiembre 2016 ..

Capitulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

(PP) con distintos tamaños de polvos, esto sirvió como matriz para adicionar las tres fibras que se trabajarían, cada una respectivamente con sus diámetros específicos y densidades. En estos composites encontramos tres tipos de fibras: *Twaron 2200* de Akzo Nobel, *Kevlar49* de DUPONT y Carbón de HEXCEL.

Twaron 2200: Densidad lineal 1.69mg/cm, diámetro 12µm

Kevlar49: Densidad lineal 1.72mg/cm, diámetro 12µm

Carbón: Densidad lineal 8.2mg/cm, diámetro 7µm ²⁸El

compuesto de los materiales se hizo mediante el método de impregnación por polvos del cual hablamos con anterioridad y que consiste en la adhesión de polvos termoplásticos en una superficie de fibras, que posteriormente se convierte en una lámina. La matriz de PP se había usado en estudios previos en 2005, y demostró tener una gran capacidad para servir con matriz, lo único que se observó diferente es el grado de impregnación sobre el eje y, lo cual demuestra que las fibras de ingeniería (*Kevlar*, *twaron*, etc.) tuvieron una mayor compatibilidad con la matriz de PP.

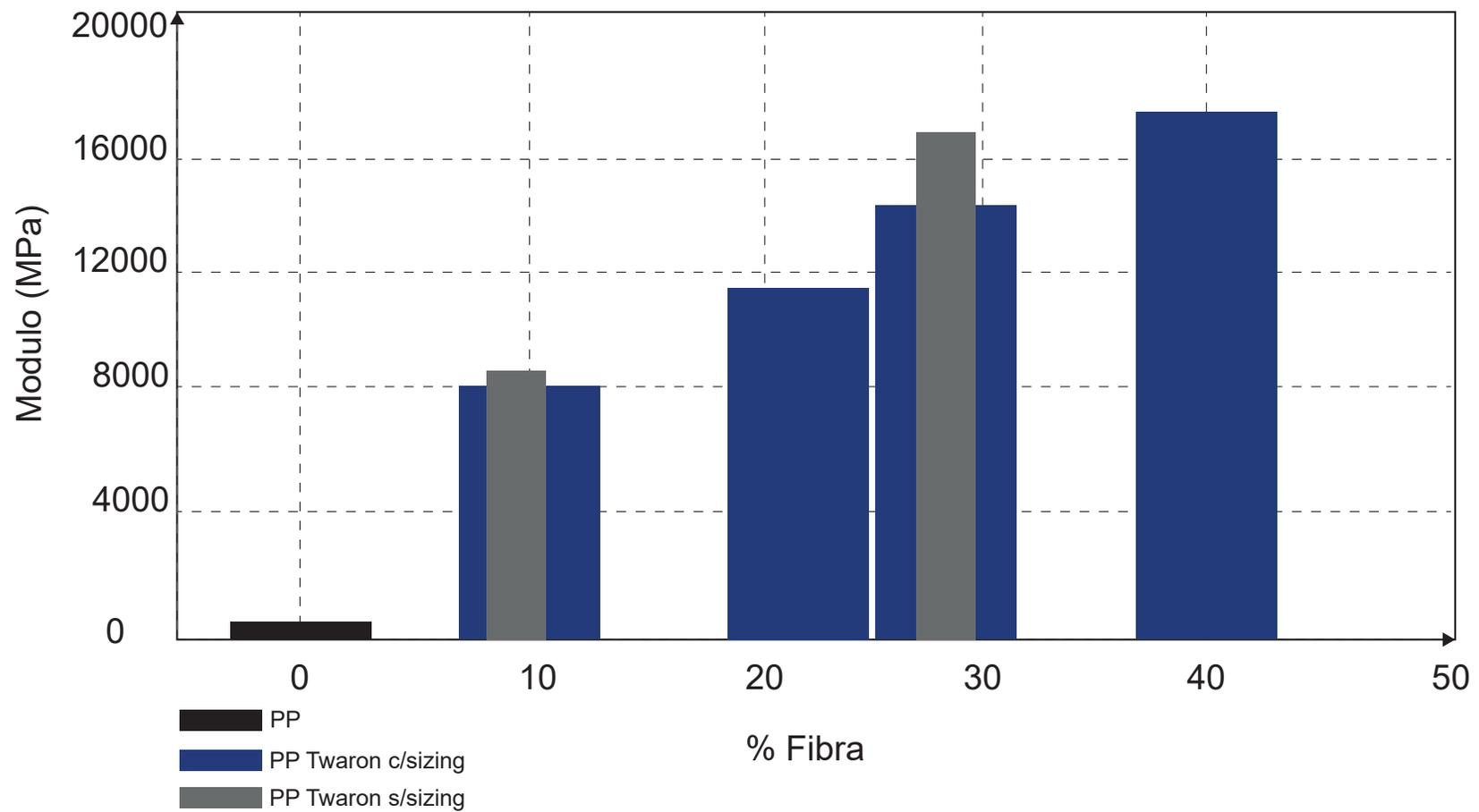
En las tablas de esfuerzo deformación donde se comparan los resultados de los materiales anteriormente mencionados se observa una característica inicial muy similar, con una diagonal constante, pero con mayor resistencia por parte de la fibra de carbono ya que al ser un material cerámico presenta mayor rigidez. Los resultados en la tabla de resistencia para las fibras de aramida en el módulo de esfuerzo máximo también fue muy sorprendente ya que por sí sola la matriz de PP presento una resistencia de tan solo 43.72MPa mientras que las fibras fueron de aproximadamente 500MPa lo cual es casi 12 veces más de resistencia que el material en su estado preliminar.

Se presentó también un suceso interesante de bajo nivel de aprovechamiento de las características intrínsecas de la aramida, esto se atribuye a la resistencia interfacial baja entre los materiales, lo cual provocó que solo se aprovechara un 15% de la resistencia máxima de las fibras de aramida en sus respectivos casos.

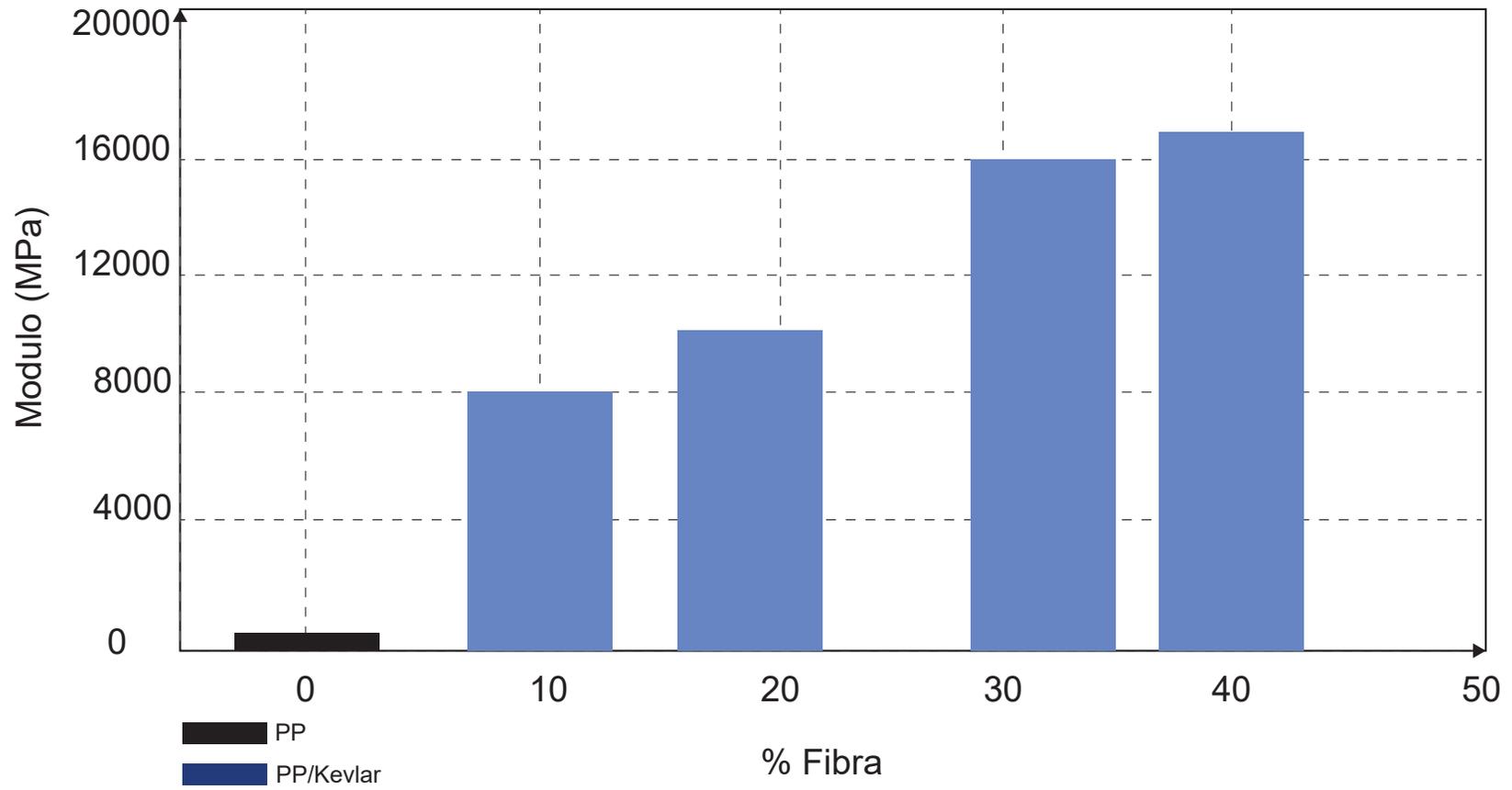
	Polvo A	Polvo B	Polvo C
Media µm	406.70	300.80	88.40
D. Estándar	193.86	167.90	110.07

Tabla 11.- Tabla de tamaños de partícula para el PP

28.- Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. "Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería." Revista Mexicana de Ingeniería Química 15 Marzo 2007: 51-58. .. Septiembre 2016 ..



Gráfica 2.- Gráfica de resistencia a la tracción de poliamidas.



Gráfica 3.- Gráfica de resistencia a la tracción de poliamidas.

Las conclusiones de la experimentación fueron satisfactorias y como era de esperarse las fibras de aramida tuvieron un comportamiento similar debido a su composición química y a la adherencia que esta representaba junto con el PP²⁹, en cambio las pruebas realizadas con las fibras de carbón fueron muy resistentes como se esperaba, pero presentan una mayor fragilidad con respecto a los esfuerzos. Éstas características son las que se busca generar al momento de diseñar y crear un nuevo material, aunque también es un poco ambiguo la generación de un material per se sin ningún tipo de planeación o aplicación futura.

Actualmente tenemos varios ejemplos de materiales innovadores que aún no han sido probados para un uso específico, lo cual condiciona a que estas investigaciones no tengan un impacto positivo para el desarrollo humano. En un principio al comenzar las investigaciones para esta tesis pensaba que lo más idóneo para obtener mi grado era la generación de un nuevo material, pero cuando me vi inmerso en este mundo de química e ingeniería de elementos, aportaciones innovadoras en materiales compuestos etc. Me di cuenta que había un universo enorme de posibilidades que

explotar y de las cuales muchas personas pasan desapercibidas. Por este motivo me he dado la tarea de investigar más sobre el material desarrollado por parte del CICY (Centro de Investigaciones Científicas de Yucatan) Mérida, para poder generar un sistema innovador con este nuevo material de matriz de *PP* con un agregado de fibras de *Kevlar49*.

Dentro del mercado encontramos algunos productos creados parcialmente con materiales compuestos por aramidas como es el caso de chalecos antibalas, gracias a la densidad que presentan las fibras de *Kevlar* impide que la bala atravesase los chalecos, pero evidentemente la absorción del impacto es bastante significativa si no se tiene algún amortiguante por lo que es necesario combinarlo con otros sistemas de absorción como espumas de poliuretano entre otros.

En la arquitectura encontramos el ejemplo de Janet M. Lee y Chris J. Burgoyne donde se adicionan o suplen el acero en los prefabricados de concreto, logrando así resultados bastante favorables. Uno de los mayores problemas que se presentaban en la fabricación de pretensados de concreto era la oxidación de los metales al interior si se presentaban

29.- Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. "Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería." Revista Mexicana de Ingeniería Química 15 Marzo 2007: 51-58. .. Septiembre 2016 ..

Capítulo II: Materiales y sus usos en la Arquitectura

agrietamientos, pero gracias a las fibras sintéticas como el *Kevlar*, esto se erradica además de que los resultados en las tablas de pruebas mecánicas fueron muy favorables para el material en cuestión.

También encontramos investigaciones sobre concreto convencional sustituido con fibras de aramida en su composición, este proceso si bien es similar al de las vigas pretensadas en cuestión de materiales usados, es totalmente diferente en cómo están concebidos ya que uno aborda un trenzado de fibras creando filamentos integrados a la mezcla de concreto y el otro integra las fibras en forma de *whiskers* (fibras con tamaños específicos) como un todo, lo cual tiene ventajas y desventajas. En las que encontramos, que eleva los costos hasta 30 veces más que usando un acero convencional de refuerzo, otro aspecto es la ausencia de deformación plástica, así como la degradación pasiva y constante de hacia los rayos UV.

Los materiales compuestos buscan generar materiales más resistentes, esa es la premisa que hace que la inversión realizada valga la pena, pero también hay que tomar en cuenta que los materiales compuestos no son milagrosos y que van a

tender a tener fallas en uno u otro aspecto por lo que hay que estar consciente de la dirección que estos tomarán en un futuro.

Uno de los problemas fundamentales que se han encontrado a la hora de trabajar con fibras de ingeniería como lo son la fibra de carbono o las fibras de aramida es sin duda alguno el comportamiento que éstas presentan para con la matriz con la cual son o serán combinadas.

Las fibras de aramida como el *Twaron*, *Kevlar 49* o *Kevlar 29* presentan un problema bastante serio con respecto a la compatibilidad que tienen con las matrices de resinas, el problema fundamental es que no llega a haber una conexión lo bastante eficiente para lograr el máximo resultado que las fibras nos pueden otorgar, es por eso que actualmente se realizan varios tipos de estudios de la superficie de los compuestos, así como el comportamiento químico que se presenta al unir dos materiales diversos como lo son las aramidas y las resinas.

Dentro de los estudios que encontramos se destacan *X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)*, *static (time-of-flight) secondary ion mass Spectrometry (ToFSIMS)*, *low energy ion*

30.- de Lange, Pieter, Akker Peter, Mäder, Edith, Gao Shang-lin, Prasithphol W, Young R.. "Controlled interfacial adhesion of Twaron aramid fibres in composites by the finish formulation." Elsevier2007: 2027-2035. Elsevier. Enero 2017 www.elsevier.com/locate/compscritch.

*scattering (LEIS), inverse gas chromatography (IGC), atomic force microscopy (AFM) and micro-Raman spectroscopy*³⁰.

El proceso experimental que presentan de Lange, Akker, Mäder, entre otros, es el siguiente:

Tomando como base fibras de *Twaron 2200*, 1280 dtex, f1000, con terminados “*oily*” en diferentes cantidades. El componente de cohesión son sistemas de epoxy-amina, que contienen diglicidylether de polyglycol como matriz epóxica y piperazina como amina en relación 9:1. La cantidad aplicada fue de 0.3% (del peso de hilo) y la cantidad de aceites utilizados variaba del 0% al 4.8 (del peso de hilo). Generando laminados de 300x300mm con un grosor de 4mm.

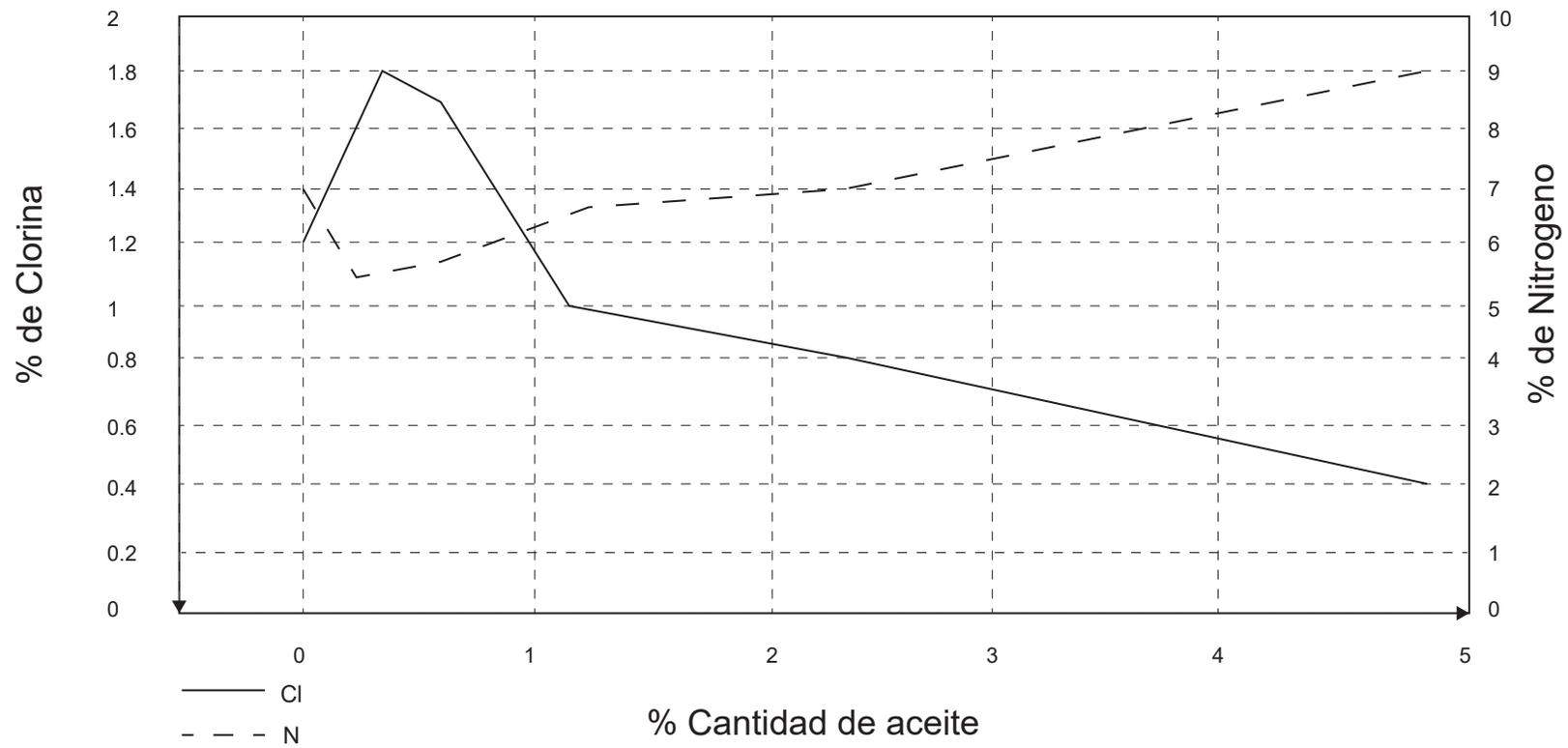
Normalmente a la hora de generar un compuesto con matriz epóxica adicionada con fibras de aramida presenta altos niveles de clorina, lo que ocasiona una falla en la adhesión debido a la composición de las fibras, pero las investigaciones adicionando porcentajes de aceite a las fibras previas al tratamiento con la matriz epóxica demuestran que las fibras reaccionan en función a las capas responsables de la activación de la adhesión, encontrando entonces que a

mayor porcentaje de aceites los niveles de nitrógeno se acercan muchísimo a los niveles que presenta por sí solo el *Twaron*, esto presenta una relación de:

- A mayor nivel de resina epóxica en la superficie, es mayor la señal de clorina que se obtiene y menor la cantidad de nitrógeno.

- A mayores niveles de aceite el nivel de clorina decrece a bajos niveles, indicando casi el contenido nulo de una superficie epóxica³¹. Cambio del contenido de clorina y nitrógeno en el acabado de las fibras de *aramida*.

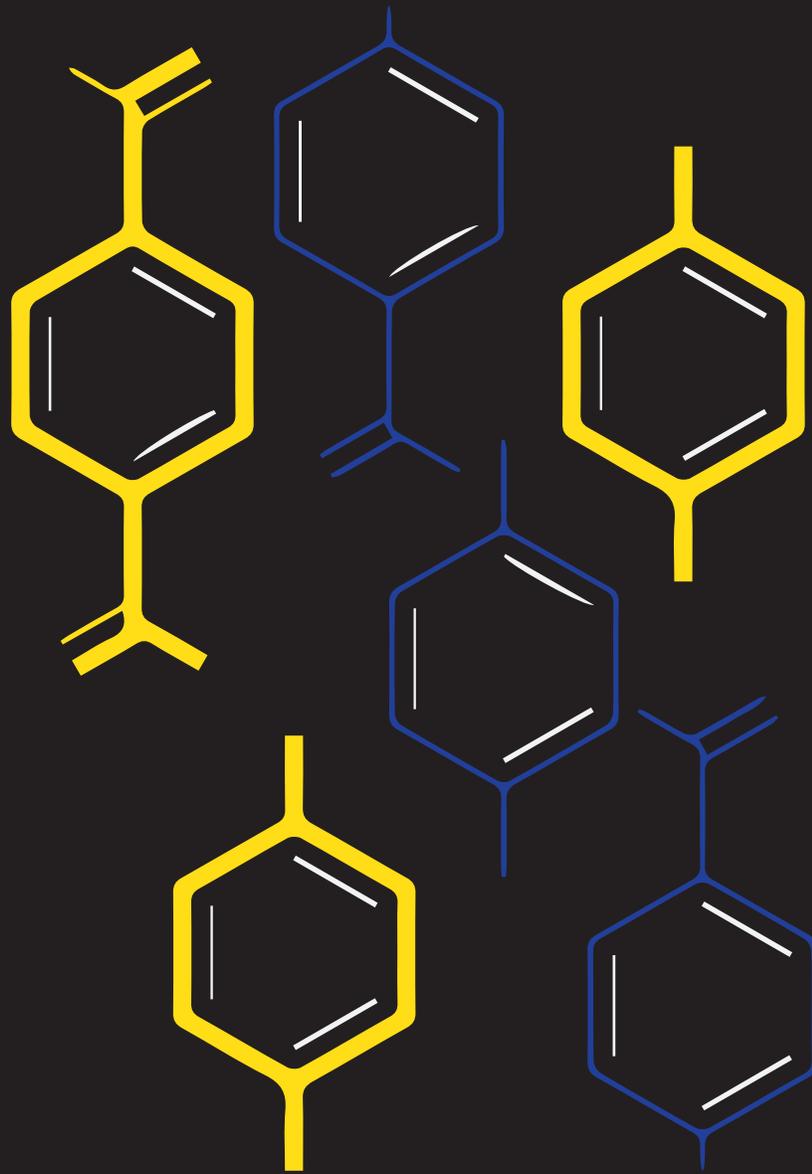
31.- de Lange, Pieter, Akker Peter, Mäder, Edith, Gao Shang-lin, Prasithphol W, Young R.. “Controlled interfacial adhesion of Twaron aramid fibres in composites by the finish formulation.” Elsevier2007: 2027-2035. Elsevier. Enero 2017 www.elsevier.com/locate/compscritech.



Gráfica 4.- Cambio del contenido de clorina y nitrógeno en el acabado de las fibras de aramida.

Polímeros Sintéticos								
Poliuretano	Polimetacrilato de metilo o metacrilato	Polycarbonato	Poliéster	PC (Cloruro de Polivinilo (Politetrafluoroetileno))	Teflón	ETFE (Etileno-tetrafluoroetileno)	Melanina	Nailon
Temperatura de uso: Entre -40 °C y 90 °C	Temperatura de uso: Entre -40 °C y 90 °C aprox	Temperatura de uso: -100 °C y 135 °C	Temperatura de uso: Entre -40 °C y 110 °C aprox	Temperatura de uso: -15 °C y 60 °C	Temperatura de uso: Entre -240 °C y 260 °C	Temperatura de uso: Entre -100 °C y 160 °C	-	Temperatura de uso: Entre -40 °C y 150 °C
Alta resistencia mecánica	Excelente aislante térmico y acústico	Buen aislamiento eléctrico	Termoestable y aislante térmico	Buen aislante térmico, eléctrico y acústico	Buen aislante térmico y eléctrico	Alta resistencia eléctrica y química, buenas características térmicas	-	Alta resistencia y rigidez
Alto poder amortiguador	Alta resistencia al impacto, de unas diez a veinte veces mas que las del vidrio	Alta resistencia a golpes y rigidez	Elevada resistencia mecánica, dureza y rigidez	Sólido y resistente a impactos y choques	-	-	-	-
Buena resistencia a los hidrocarburos	Resistente a la agresión de muchos compuestos pero vulnerable a otros como la acetona, el ácido sulfúrico, el benzol y el tolueno	Incombustible	Bajo coeficiente e fricción	Resistencia a la mayoría de los reactivos químicos	Prácticamente inerte a casi todos los elementos y compuestos conocidos	Alta resistencia a ácidos, cetonas, alcoholes e hidrocarburos	Resistencia a los álcalis	Buena resistencia química a los alcoholes, cetonas e hidrocarburos aromáticos
Se puede fabricar con distintas durezas y colores	De fácil combustión aunque no produce gas tóxico, por lo que se considera seguro	Elevada resistencia a la deformación térmica	Elevada resistencia a sustancias químicas	Resistencia, rigidez y dureza mecánicas elevadas	-	-	Insoluble en los disolventes comunes	Mala resistencia química a las grasas y aceites y a los halógenos
-	Densidad: 1.19 g/cm ³ aprox	Densidad: 1.20 g/cm ³	-	Densidad: 1.4 g/cm ³	-	Densidad: 1.7 g/cm ³	Densidad: 1.574 g/cm ³	Densidad: 1.15 g/cm ³
-	Transparencia: 93%	Transparencia: 90% ± 1%	-	-	-	-	-	-
-	Resistente a la intemperie u a los rayos UV	Resistencia a la intemperie y aceptable resistencia a los rayos UV	Buen aislante eléctrico	Estable e inerte	Termoestable	Resistente a los rayos UV	Termoestable	Resistencia a factores como agua, luz UV y oxígeno
-	-	Alta estabilidad dimensional	Elevada estabilidad dimensional	Resistencia a la acción de hongos, bacterias, insectos y roedores	Resistencia a los agentes atmosféricos y a la luz	-	Se presenta en forma de cristales	-
-	-	-	-	Resistencia a la intemperie (sol, lluvia, viento y aire marino)	Antiadherente	Transmisión lumínica cercana al 100%	Color: Blanco	No es transparente
-	-	-	-	Autoextinguible	-	Autoextinguible	Alto punto de reblandecimiento	-
-	-	-	-	Impermeable a gases y líquidos	-	Larga durabilidad	No reciclable	-

Tabla 11.- Propiedades de polímeros sintéticos



Capítulo III : POLARM
(Aramida + Polipropileno)

3 POLARM (Aramida + Polipropileno)

Tomando en cuenta la escasez de información sobre materiales compuestos con fibras de aramida como refuerzo es necesario generar un análisis científico con pruebas que definan la caracterización del material per se.

El siguiente capítulo tiene como objetivo dar a conocer al lector sobre el proceso de concepción del material. así como los pasos a seguir tras la elaboración de un material nuevo y cuales fueron las problemáticas enfrentadas a lo largo de este proceso, cómo es que son creadas las mezclas, que porcentajes de material se utilizan entre otros factores que hacen que una mezcla de materiales nuevos genere un proceso favorable para con las pruebas posteriores que darán fe y legalidad de sus resistencias y posibles usos dentro de un ámbito en la construcción o el diseño arquitectónico.

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En esta fase se analizan los materiales a utilizar, identificando las características que las cédulas de información nos arrojan para cada uno de los materiales. Una fase primordial que nos delimita los límites permisibles para orientar las características del material, ya que las pruebas para el material pueden variar un poco en sus valores debido a las características físicas del lugar donde se realizan las pruebas.

Procesamiento de los materiales:

Debido a que contamos con materiales de diferentes densidades y características químicas diferentes la forma de procesarlos juega un papel importante, ya que el proceso de moldeo para el polipropileno no es el mismo que requieren las fibras de aramida.

El *polipropileno* tiene las siguientes formas de moldeo:
Moldeo: Se moldean las piezas mediante contenedores con geometrías específicas.

- **Extrusión:** Mediante la fundición de los granos de polipropileno se genera presión para ser expulsadas mediante una boquilla o un inyector que determina la forma final del material

- **Laminado:** Este proceso nos genera laminas del material mediante moldes o extrusión, pero teniendo en cuenta que el producto final está formado por varias capas de un grosor poco considerable para finalmente agrupar y crear un sólido con volumen.

Las fibras de *aramida* como se describió en su proceso, las encontramos de dos maneras diferentes.

- **Carretes:** Con el uso de hiladoras el material es procesado mediante bobinas como un gran filamento que es enrollado en cilindros.

- **Telas:** Usando los filamentos del procedimiento de carrete se crean entrelazados de hilos que generan una superficie planar con doble direccionalidad, lo que significa que los hilos están orientados en dos sentidos para formar la tela.

Tomando en cuenta los procesos por los cuales podemos acceder a los dos materiales que se usaran en cuestión, se tomó la decisión de generar una matriz por medio de la extrusión del perfil para posteriormente ser recubierto por las fibras de *aramida* fijadas con una resina epoxi específica para materiales plásticos.

3.2 DETERMINACIÓN DEL COMPUESTO

Los estudios de gabinete previos nos indican que los porcentajes de fibra de refuerzo no deben de rebasar el 50% del contenido total del compuesto ya que la curva de comportamiento nos arroja una resistencia gradual que se empieza a frenar al acercarse a la mitad de contenido de fibras de refuerzo con respecto a la matriz.

Con la información recabada procederemos a generar un muestreo donde se modifique el contenido de la cantidad de fibras desde un 10% hasta un 40% determinando la relación más adecuada con respecto a la capacidad máxima de resistencia mecánica que presente con la factibilidad de la producción en costo.

3.3 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

Se trabajará con dos materias primas esencialmente, ambas provenientes de la familia de los polímeros.

El primer material en cuestión es la fibra de aramida, esencialmente compuesta por carbonos con enlaces peptídicos y por otro lado tenemos el *polipropileno*, un material proveniente del *propileno* que a su vez es un derivado del petróleo que tiene como

características principales el efecto bisagra, el cual permite que las moléculas se reorganicen para evitar crear una ruptura interior.

El principal problema entre estos dos elementos radica en la unión de ambos, ya que la familia de las *poliamidas aromáticas* a la cual pertenecen las *aramidas* esencialmente repele todas las uniones con otros materiales, lo cual hace muy difícil que se aproveche al cien por ciento las características benéficas de este material, ocurriendo por lo general una ruptura o falla en el compuesto alrededor del 40% de las propiedades naturales de la fibra.

Debido a las características presentadas de estos materiales se parte de una hipótesis donde se realizarán dos pruebas básicas en donde la variable primordial es la forma de integración de las fibras para con la matriz de *polipropileno*, teniendo tres opciones básicas:

La primera se trata de generar una unión encapsulando las fibras de manera equitativa al interior de la matriz de *polipropileno*, uniendo las fibras capa por capa con un diluido de la matriz.

La segunda es más compleja generando una mezcla que

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

funcione como emulsionante, las fibras se ha determinado que responden favorablemente hacia los aceites, mejorando en casi un 10% su valor de adhesión con otros materiales, el problema es que no sabemos el comportamiento que estas vayan a tener al momento de crear la mezcla, por lo que tendríamos que pasar por un proceso similar de homogeneización para que no haya una repulsión entre ambos materiales.

La tercera nos habla de generar perfiles extruidos de la matriz para posteriormente ser recubiertos por el refuerzo en tela, protegiendo la matriz de la degradación a los rayos UV y procurando la unificación de los dos materiales mediante la aplicación de una resina epoxi compatible con poliamidas y polipropileno, donde se pretende que el fallo del material se dé después de sobrepasar las características mecánicas que cuenta el polipropileno, pero por debajo de las características intrínsecas que poseen las aramidas.

Aramida

En primera instancia habrá que hacer una división de módulos de fibra para determinar que todas las muestras cuenten con el porcentaje de fibra estimado según el número de la

muestra y la prueba a la que será sometido, siendo rigurosos con el conteo por gramaje de las fibras. Las fibras en cuestión serán obtenidas de un rollo de Quintum aramida, con una tonalidad ámbar, con una densidad lineal de 1.72mg/cm y un diámetro de 12µm.

Polipropileno

Se utilizará un *PP* de alto impacto comúnmente llamado "copolímero de alto impacto" *PPc* con un *MFI* (índice de fluidez) de 8 dg/min, con un tamaño de pelletización que ronda de los 100 a los 450 µm inyectándose con una máquina MATEU & SOLÉ Meteor 440/90, con 40mm de diámetro de tornillo y una relación de *L/D* (*lift to drag*) de 20,5.

3.4 POLARM EN LA ARQUITECTURA: POSIBLES USOS

POLARM fue pensado en su origen como un material que pudiera ser auxiliar para el reforzamiento de estructuras arquitectónicas, pero también se visualizó dentro de la rama de la conservación y la generación como un sistema constructivo independiente y modular, por lo que sus usos pudieran diversificarse en el ámbito arquitectónico ya que presenta muchos beneficios que fueron mencionados con anterioridad.

México se encuentra ubicado en una zona altamente sísmica, rodeada de cinco placas tectónicas (Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y Cocos) lo que lo vuelve una zona vulnerable y que sufre bastantes afectaciones, sobre todo al sur del país. Los daños que causan los sismos dejan gastos de millones de pesos para la inversión, además de dejar muchos inmuebles en riesgo de derrumbes o con problemas estructurales serios. Algunas de las técnicas usadas actualmente son el recubrimiento y refuerzo de estructuras primarias con fibras de carbono, lo que en muchos de los casos con afectaciones leves puede ser de utilidad, pero en casos

de afectaciones severas no es posible la aplicación de este método. Analizando las opciones que se tienen en el mercado surgió la idea de incorporar POLARM como una opción de reestructuración ligera, pero con beneficios mejores que los que brinda el acero estructural, partiendo de un sistema modular que pueda ser instalado en un tiempo relativamente corto y sin tener que esperar largos tiempos de secado o fraguado como en otros casos. Su densidad aproximada de 1.11g/cm³ lo coloca como un material lo bastante ligero para ser maniobrado sin tanta dificultad como lo sería una viga de acero al carbón o un prefabricado de concreto.



Ilustración 14.- Capilla de Santa María, Ocuilán, Estado de México. Afectaciones por el sismo. INAH

Otro de los posibles usos que podría tener POLARM sería en adecuaciones o conservación de edificios patrimoniales ya que pretende ser una estructura modular, lo que aceleraría procesos de reestructuración

Capítulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

patrimonial, además de ser menos agresivo con materiales como la piedra natural y no agregaría un peso significativo a la estructura original. Se cree que este material podría tener una flexibilidad de formas bastante extensa y que podrían llegar a ser tratadas también de manera particular, creando moldes para las distintas necesidades que se tengan, lo que lo volvería un material lo suficientemente versátil como para ser contemplado no solo como parte de un reforzamiento estructural, sino también como parte estética de la readecuación que se requiera.

Si bien el material aún se encuentra en una etapa de desarrollo es posible especular sobre los usos que éste podría llegar a tener ya que se cuentan con algunas referencias de materiales como las fibras de carbono, pero la verdad es que habría que generar una serie de estudios de mercado y analizar la viabilidad del producto como un modelo escalable de producción.



Ilustración 15.- Brujas, Bélgica. Intervención en viviendas históricas.

3.5 PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN

Según la literatura encontrada y para que el muestreo tenga una validez para ser aplicado como elementos estructurales en la arquitectura se procederá con la aplicación de dos pruebas para determinar las capacidades mecánicas del compuesto en cuestión, estas dos pruebas están basadas en las normas del *American Standard for Tasting Materials (ASTM)* en donde se toma de base la norma ASTM D638-02 y la norma ASTM D695-02^a, la primer norma determinará las capacidades a flexión del elemento en donde la prueba será concluida hasta que exista una falla en el material. La segunda prueba busca determinar las propiedades a compresión que un material presente, de igual manera que la primera este valor se reflejara hasta que el compuesto presente una falla en su comportamiento, ambas pruebas buscan determinar las propiedades de plásticos reforzados y sin refuerzo, caracterizando así materiales poliméricos.

Con relación a la literatura estudiada se determinó la factibilidad de las siguientes pruebas mecánicas para analizar las características que el material pudiera presentar al tener un refuerzo de aramida

dentro de una matriz de *PPc*.

Estas pruebas determinaran las capacidades máximas de los materiales reforzados para posteriormente ser comparadas con pruebas similares de materiales semejantes usados en la construcción como lo es el acero o el concreto armado. Lo ideal sería analizar todas las propiedades que este nuevo material posee, pero por tiempo y presupuesto la investigación se centrara solamente en medir las capacidades más destacadas del compuesto en cuestión y poder obtener una validación sobre las bondades del material y que sea una opción viable para el uso del compuesto en materia de refuerzos estructurales, o que bien cumpla las medidas necesarias para ser usado en el campo de la arquitectura como un material más con capacidades diferentes a las que encontramos en materiales convencionales.

Se contempla en primera instancia una prueba de flexión para plásticos reforzados basada en la norma ASTM D 790 - 03 donde se derivan dos procedimientos según las características del material:

- **Procedimiento A:** Para materiales que soportan o se rompen teóricamente a una baja deflexión.

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

- **Procedimiento B:** Para materiales que puedan o están sometidos a una mayor deflexión y que teóricamente soportan las cargas administradas.

El procedimiento consiste en aplicar presión a una barra rectangular que descansa sobre dos apoyos en los extremos, logrando así una carga puntual en el punto medio de la probeta y generando una deflexión.

El valor de resistencia se determina hasta que el material alcanza su punto de quiebre o rebasa el límite superior del 5% con relación a su resistencia máxima.

La segunda prueba mide las propiedades de tensión de un plástico reforzado basado en la norma ASTM D 638 - 02^a donde se parte de cinco tipos de muestra según el grosor del material.

Se recomienda por defecto la muestra tipo I y con relación a la resistencia que logre obtener se determina la posibilidad de migración a otro tipo de grosor de la muestra para garantizar el valor obtenido.

El procedimiento se realiza tomando la muestra de los extremos con unos apoyos que tiran de la probeta en sentidos opuestos generando una deformación en el núcleo del

material, siendo la resultante de la deformación el valor final.

Las pruebas pretenden validar las resistencias del compuesto basándose en la resistencia de otro material usado en la construcción actualmente.

3.6 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Primeramente, se necesita tener un procesamiento del polipropileno, el cual será generado mediante una extrusora de plásticos peletizados, que consta de una tolva en donde las partículas de polipropileno son vaciadas en un cañón con calentadores, los cuales son empujados al cabezal extrusor mediante un tornillo rotatorio, en el proceso de ser empujados hacia el extrudado son calentados de manera gradual hasta ser fundidos a la temperatura indicada.

Las ventajas de esto son que el plástico sale de una tanda por lo cual las características del plástico tienden a ser mas homogéneas, además de contar con las medidas exactas en los moldes para las pruebas universales mecánicas de plásticos que son normalizadas por las ASTM.

La segunda parte se realiza en una maquina universal de

pruebas, que consta de dos partes esenciales, la parte superior consta de dos placas con separaciones entre si lo cual nos genera tres espacios, la parte superior es la utilizada para las pruebas de tensión, la intermedia son las zonas de compresión y la inferior es donde se aloja el gato hidráulico que nos otorga la presión necesaria para realizar las pruebas.

La parte inferior de la maquina es básicamente el soporte de la maquinaria y puede constar de una base metálica o un pilar que de estabilidad a la súper estructura.

En esta máquina se realizarán las pruebas mecánicas pertinentes, que en este caso serán dos:

La primera prueba será a tensión, por lo que se requiere que la maquina conste con el aditamento presionador y los apoyos para que descansa la probeta en un apoyo a dos puntos.

Para la prueba a flexión la maquina universal de pruebas debe de contar con un aditamento de mordazas en donde los extremos de la probeta serán sujetados mediante las mismas para posteriormente aplicar una fuerza en direcciones opuestas para generar un punto

de quiebre equitativamente distante.

Las mediciones de las pruebas generalmente están dadas en unidades de presión que son los pascales, que indican cuanta presión es ejercida en la probeta antes del punto de quiebre, en el caso de las estructuras en la arquitectura en México normalmente se usan medidas en Kg/cm² que de igual manera es una medida de presión que nos indica el peso ejercido en una superficie determinada.

Además de estos instrumentos habrá que generar una tabla de comparaciones y gráficas que nos ilustren mejor el comportamiento de las probetas en sus pruebas por lo que se usara un software de análisis estadístico para determinar la viabilidad de las muestras mediante cálculos de las mediciones, el software utilizado será Minitab, en donde además de procesar los datos recabados se generaran gráficos para describir mejor el comportamiento de los materiales puestos a prueba.

3.7 CREACIÓN DE MUESTRAS

3.7.1 DISEÑO

Se diseño el molde con las características presentadas con tal de estar dentro del estándar de la norma para ser tomada como referencia.

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

El siguiente diseño de probeta es el de compresión, la norma específica que puede ser un cilindro o un prisma, por motivos de practicidad al diseñar el molde se opto por el diseño de un prisma rectangular con las siguientes características. Al igual que la probeta a tensión se tomaron en cuenta todas las consideraciones que la norma establece para la generación de elementos que se someterán a pruebas bajo los estándares de control del ASTM donde los valores fueron los siguientes:

La tabla de valores es la siguiente:

- W0-25.4 (0.50) Anchura general
- L0-25.4 (1.00) Longitud general
- T-12.7 (0.50) Espesor

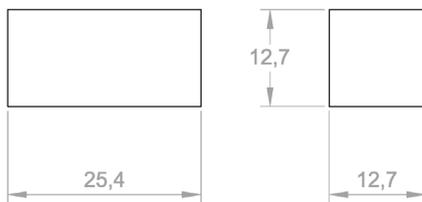


Ilustración 16.- Probetas a compresión segun la norma ASTM D695-02^a

Tomando en cuenta las consideraciones que el apartado 6 de la norma D638-02 hace se diseño una probeta con las medidas indicadas en la tabla de especificaciones de la norma en donde nos arroja los siguientes valores de diseño: La tabla de valores es la siguiente:

- W-13 (0.50) Ancho de sección estrecha
- L- 57 (2.25) Longitud de sección estrecha
- W0-19 (0.75) Anchura general
- L0-165 (6.5) Longitud general
- G-50 (2.00) Longitud calibrada
- D-115 (4.5) Distancia entre los agarres
- R-76 (3.00) Radio del quiebre
- T-7 (0.28) Espesor

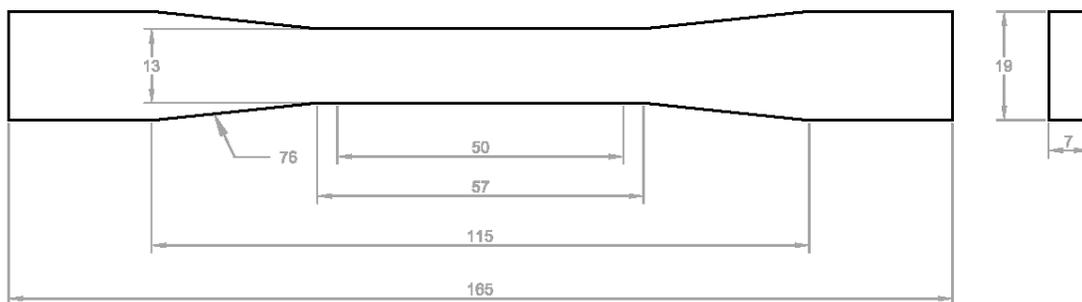


Ilustración 17.- Probeta a Tensión segun la norma AST D638-02

3.7.2 CREACIÓN

Se analizaron tres métodos viables para la generación de las probetas aunque solo se ocupase uno, estos métodos consisten en lo siguiente:

1.- Por inyección en molde:
Este método nos habla sobre la posibilidad de inyectar un polímero a presión mediante una inyectora semiautomática que controla la temperatura de fusión al igual que la presión ejercida dentro del molde, el molde por lo tanto tiene que ser de un material resistente dentro de los que se destaca el aluminio por su ligereza y trabajabilidad dentro de los cortes CNC. Para la generación de un molde a inyección se requiere de ingeniería en moldes ya que el molde al ser inyectado por presión requiere de válvulas de escape, las válvulas de escape son diseñadas para evitar que el contenedor explote y que la maquina salga dañada.

2.- Por extrusión de laminado:
Un método bastante común en el procesamiento de polímeros, y requiere de un extrusor con un molde con las medidas que indica la norma, a diferencia del primero este no es generado con tanta presión ya que a final de cuentas el material es generado en pequeñas laminas que son apiladas para dar el

grosor necesario que solicita la norma.

3.- Por vaciado de polímero:
Este método es el mas sencillo de generar ya que solo se requiere de un molde que soporte la temperatura del PPc fundido que ronda los 450°F o 230°C. Consta de la generación de un molde ya sea semi rígido o rígido que soporte la temperatura y que no presente deformaciones al calentarse.

Posteriormente se vierte el plástico fundido o bien se calienta el molde con la cantidad necesaria de PPc peletizado para generar un cuerpo sólido.

Todos los procedimientos de creación requieren de un procedimiento de enfriado que ronda de las 2 a 3hrs para estabilizar la temperatura del PPc, esto se hace además para evitar deformaciones en la pieza ya que al ser un material termoformable sufre del efecto de choque térmico en donde las moléculas se contraen y deforman la pieza.

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

Primero se hizo un perfilado de moldes en positivo en madera de pino con un router con una broca de carburo de $\frac{1}{4}$, esto para garantizar que el molde en positivo tuviera las dimensiones requeridas por la norma, una vez con el molde en positivo se le aplico dos capas de aceite mineral para sellar los poros y evitar que el caucho de silicón penetrara los poros y dificultara la extracción del molde negativo.

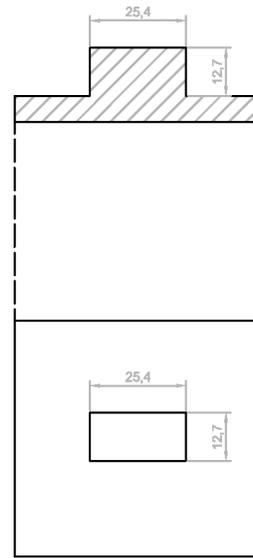


Ilustración 18.- Probeta a compresión según la norma ASTM D695-02^a

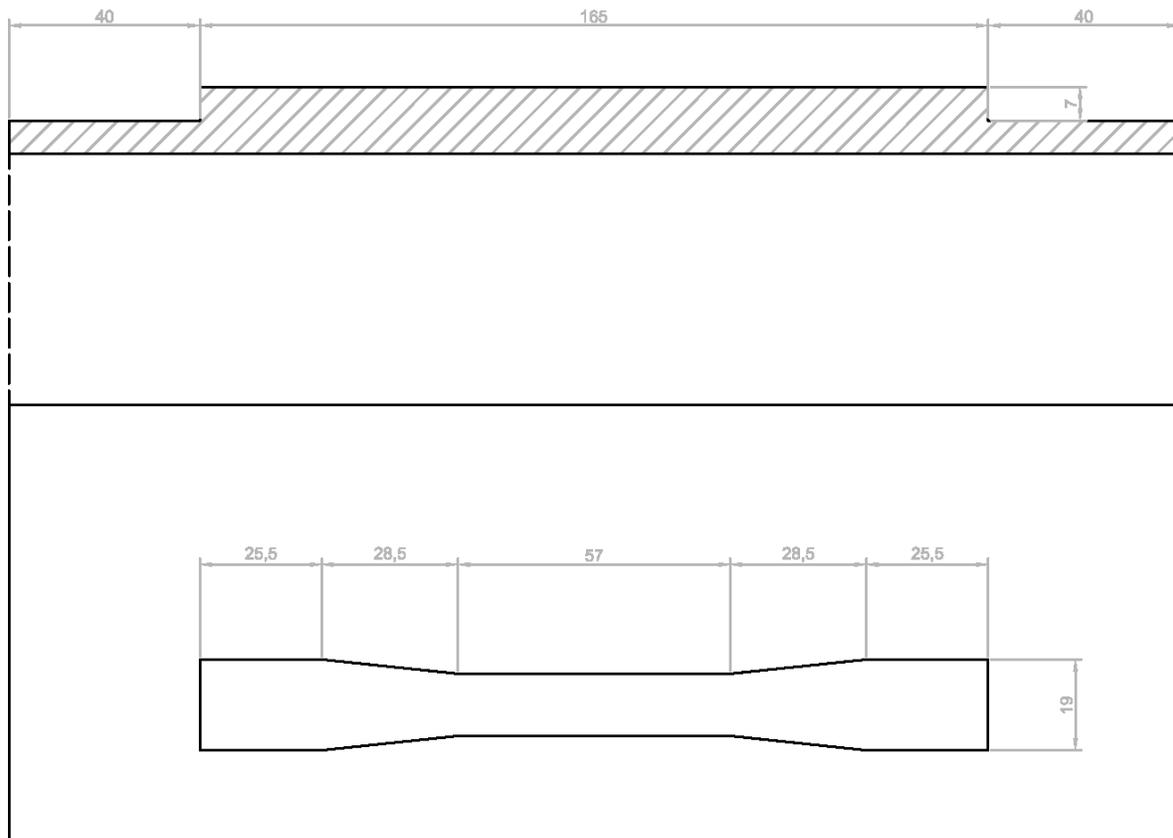


Ilustración 19.- Probeta a tensión según la norma ASTM D638-02

Posteriormente se realizaron los moldes con caucho de silicón P-48 con un 40% de catalizador para diluir la mezcla haciendo un encoframiento con poliestireno, se vertió la mezcla y se dejó tener un proceso de curado de 24hrs después del vaciado.

Con los moldes de silicona listos se prosiguió con el llenado de los mismos con pellet de *PPc Formolen 2610a*, se procuró que hubiera una dispersión uniforme del plástico dentro de los moldes para que la dilución del polímero se diluyera en todo el molde. El horno de convección fue calentado a una temperatura constante de 450°F monitoreado cada 10min para revisar el proceso de fusión de las piezas.

El proceso completo para que el *PPc* lograra fundirse por completo duro 30min \pm 3min, una vez verificando el estado del polímero se procedió a la etapa de consolidación de la forma en donde gradualmente se enfrió la probeta mediante la dosificación de calor al interior del horno, esto para evitar que hubiera un diferencial de temperatura que afectara la forma final.

El proceso final de las probetas es el de consolidación en donde se mantiene a temperatura ambiente el *PPc* para que logre

homogeneizar la forma e impida las deformaciones casuales, este proceso se realizó durante 24hrs, aunque una vez alcanzando su estado de solidificación puede realizarse un muestreo.

Con las muestras de *PPc* se puede realizar una prueba de control para determinar las resistencias base de la matriz, así se caracteriza y se compara con la cédula de información que el proveedor nos facilita³².

Una vez con las piezas totalmente solidificadas se procede a hacer un perfilado para quitar impurezas de la superficie, esto se realiza mediante una lija de grano fino y lo único que se pretende es que la superficie quede más trabajable para añadir la resina epóxica que será el conector entre la matriz y la fibra, una vez que la superficie está completamente lisa y perfilada se agrega la resina y se adhiere la fibra de refuerzo de Kevlar49 de la marca DUPONT, posteriormente se agrega otra capa de resina epóxica y se deja secar durante 4hrs para repetir el proceso de perfilado para mantener la probeta con forma a las normas.

A continuación, se muestra un esquema de procesos de creación para probetas con el método de vaciado adicionadas con fibras de ingeniería.

32.- Anexos cédula de información Formolene 2610a

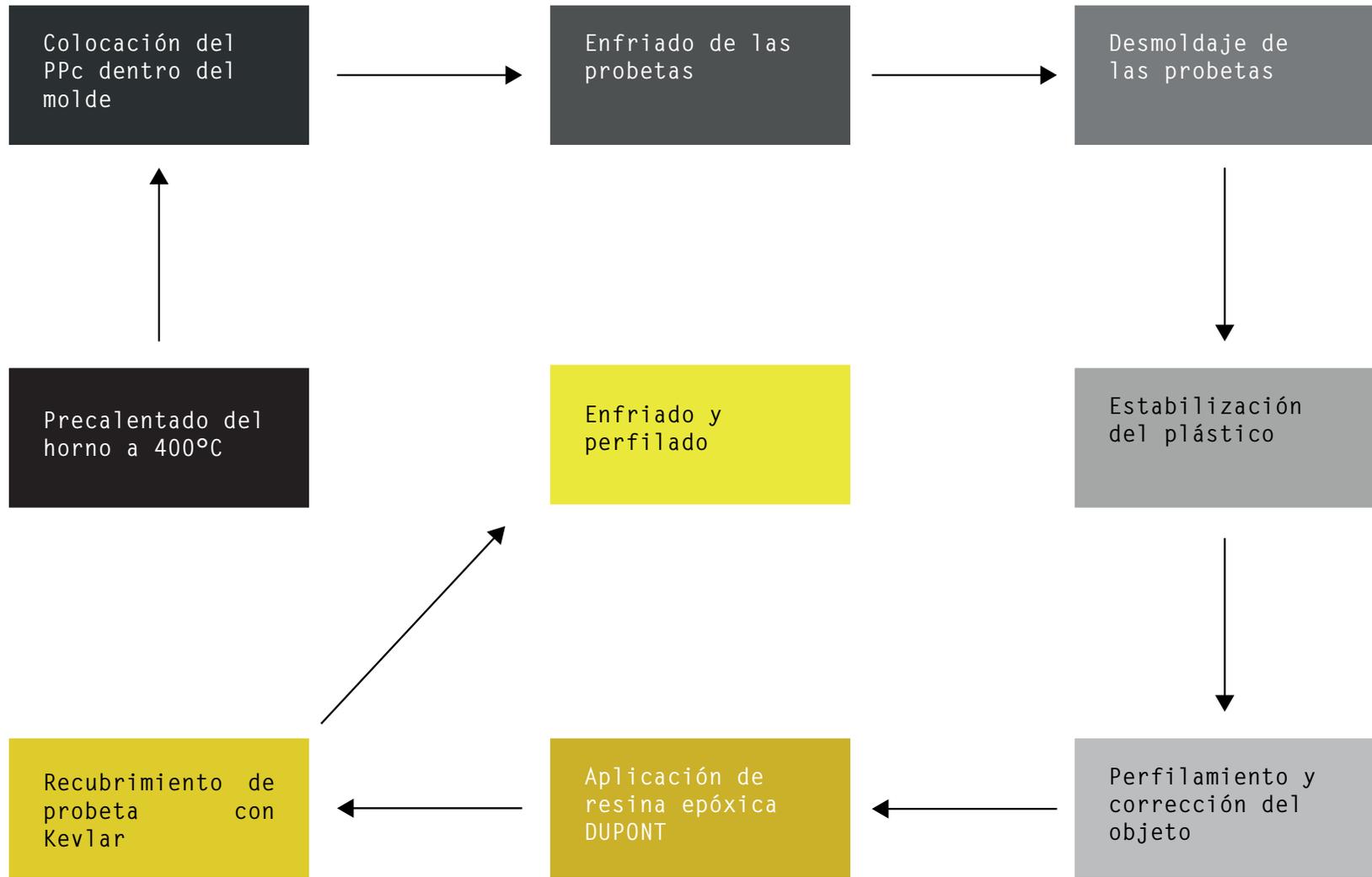


Tabla 12.- Mapa conceptual de la creación de una probeta de PPc con refuerzos de fibras de Kevlar.

3.8 Aplicación y validación del método

Aplicación y validación del método. La medición se realizara en una maquina de pruebas universales mediante la cual se realizan las pruebas a tensión y a compresión

Las características de las mediciones son las siguientes, en este apartado se especifica la temperatura así como las características de velocidad y forma de aplicar la medición.

- Humedad relativa de $50 \pm 5\%$
- Temperatura ambiental de $23 \pm 2^\circ\text{C}$
- Al menos 5 probetas por prueba
- Se generan 5 pruebas en sentido paralelo al eje y 5 en forma horizontal
- Las probetas que se fallen a una carga obvia son descartadas del procedimiento
- Velocidad de la prueba $1.03 \pm 0.3 \text{ mm/min}$
- Temperatura ambiental para pruebas de referencia $\pm 1^\circ\text{C}$ y $\pm 2\%$ de humedad relativa
- La velocidad aumenta de 5 a 6 mm/min si se alcanza la resistencia de la fibra
- Contacto de presión de $25 \pm 2.5 \text{ kPa}$
- Velocidad de prueba de 5 mm/min $\pm 25\%$

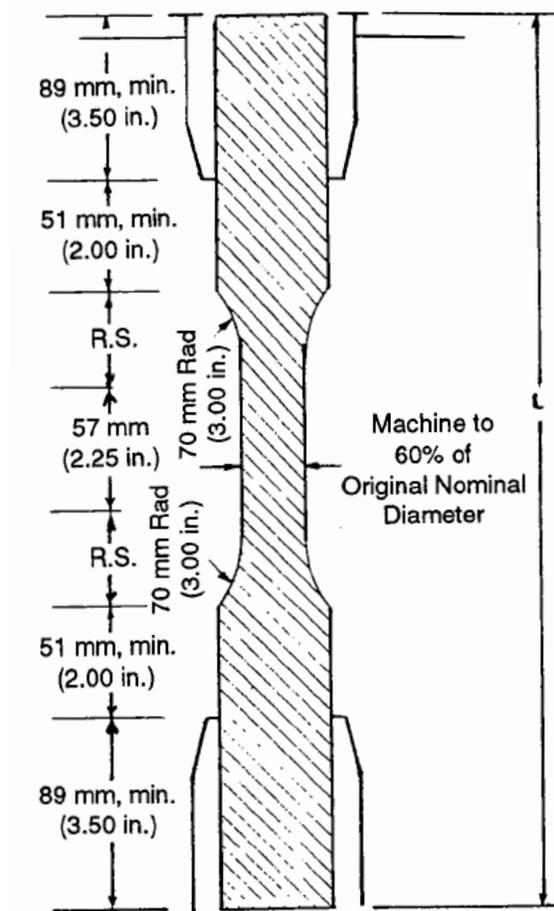


Ilustración 20.- gráfico extraído de las normas contra que se quiere comparar ASTM con especificaciones para la realización de pruebas según la norma ASTM D638 y 695-02a apartado 7 y 9

Capítulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

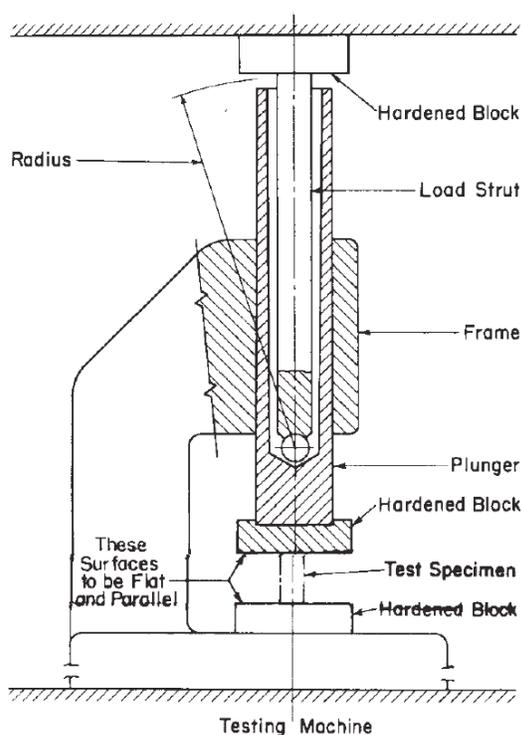


Ilustración 21.- gráfico extraído de las normas contra que se quiere comparar ASTM con especificaciones para la realización de pruebas según la norma ASTM D638 y 695-02a apartado 7 y 9

Debido a que no se tiene un punto de referencia para comparar las capacidades mecánicas del material se toman las cedulas de información que son las siguientes y también contra que se quiere comparar. Las normas ASTM indican una cedula de información en donde se reportan los resultados obtenidos de una manera ordenada en donde se especifican puntos específicos para vaciar los datos, a continuación se presenta el orden de la cedula de datos para vaciar la información:

- Reporte de la identificación del material así como su tipo, fuente y forma de manufactura
- Método para la preparación de los especímenes
- Condiciones del procedimiento de pruebas
- Condiciones ambientales a la hora de la realización
- Número de especímenes probados
- Velocidad de la prueba
- Fuerza de compresión o tensión aplicada
- Determinación del modulo de elasticidad, así como el esfuerzo de compresión máxima del material
- Valores generales de compresión así como análisis estadístico de los datos
- Fecha de realización de las probetas
- Fecha de realización de las pruebas

Propiedades	Metodo de prueba	Inlges	SI
Melt Flow Rate, I2 @ 230°C	ASTM D1238	10 g/10 min	10 g/10 min
Density	ASTM D1505	0.9 g/cm3	0.9 g/cm3
Tensile Strength at Yield (50 mm/min)	ASTM D638	2,950 psi	20 MPa
Elongation at Yield (50 mm/min)	ASTM D638	6 %	6 %
Flexural Modulus (1.3 mm/min), 1% Secant	ASTM D790	140,000 psi	965 MPa

Tabla 13.- Propiedades mecánicas del PPc Formolene 2610a

Propiedades	Metodo de prueba	Inlges	SI
Melt Flow Rate, I2 @ 230°C	-	-	-
Density	ASTM D7269/D7269M-11	-	1.44-1.45 g/cm3
Tensile Strength at Yield (50 mm/min)	ASTM D7269/D7269M-11	348090-522135 psi	2.4-3.6 GPa
Elongation at Yield (50 mm/min)	ASTM D7269/D7269M-11	-	2.2-4.4 %
Flexural Modulus (1.3 mm/min), 1% Secant	ASTM D7269/D7269M-11	8702264-17404528psi	60-120 GPa

Tabla 14.- Propiedades mecánicas del Kevlar49 DUPONT

Propiedades	Metodo de prueba	Inlges	SI
Compressive Strenght	I	63816.6 psi	440Mpa
Density	AISI 1080	0.284 lb/in3	1.44-1.45 g/cm3
Tensile Strength at Yield (50 mm/min)	ASTM E8/E8M-16a	36300psi	250MPa
Elongation at Yield (50 mm/min)	ASTM A370-17	20%	20%
Flexural Modulus (1.3 mm/min), 1% Secant	ASTM E8/E8M-16a	29000Ksi	2.6GPa

Tabla 15.- Propiedades mecánicas del Acero A-36

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

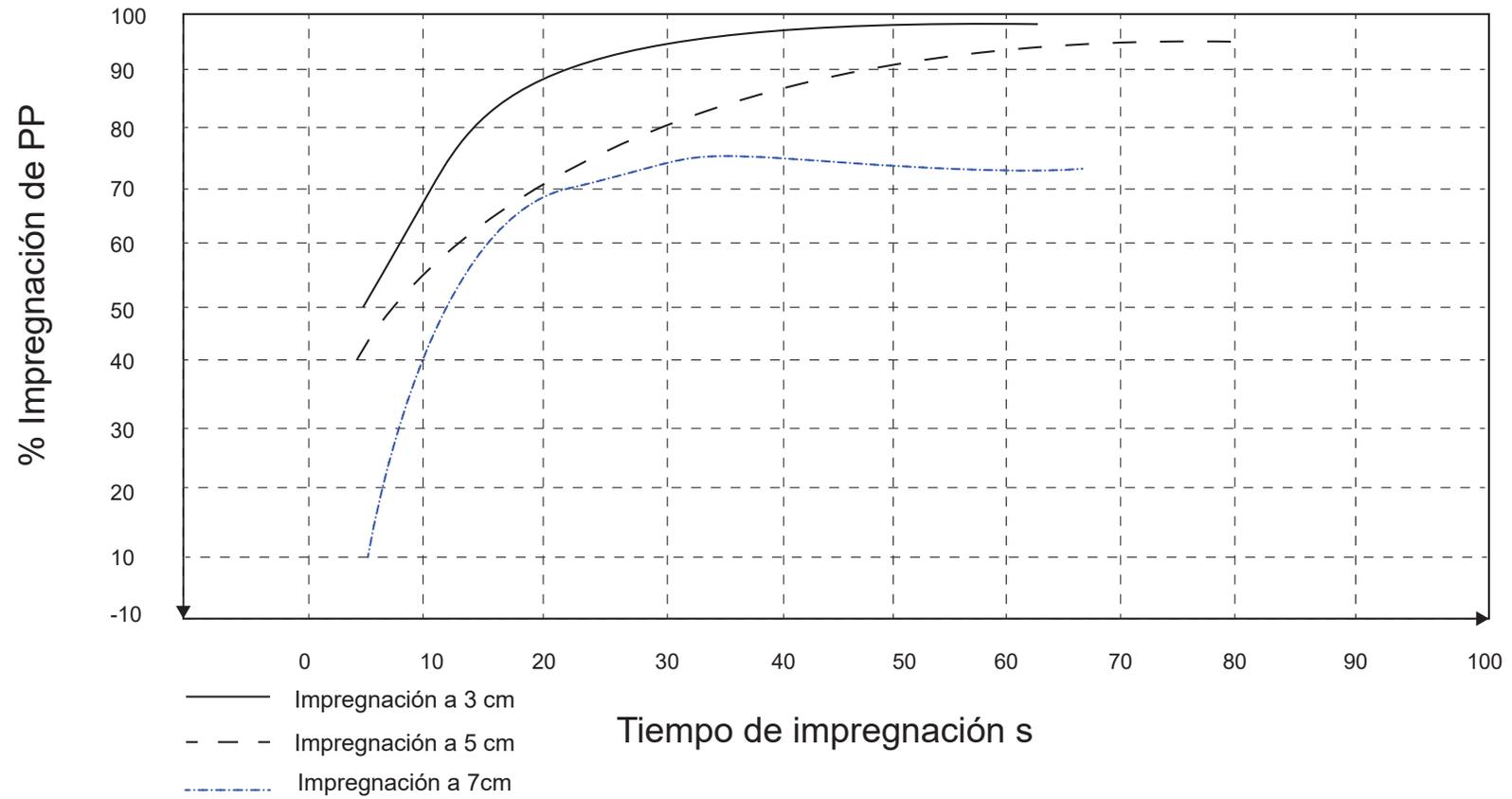
Propiedades	Polypropilene	Polystyrene	SI
Compressive Strenght	-	106 psi	-
Tensile Strength at Yield (50 mm/min)	2.97 psi		
Tensile Stress	3.63 psi	-	-
Compressive Modulus	-	3.28 psi	-

Tabla 16.- Propiedades mecánicas base según las normas ASTM D638 y 695-02a apartado 11

Del muestreo que se evalúa tiene que entrar en un control de calidad que básicamente se refiere a los valores que el proveedor indica en sus pruebas de resistencia mecánica que vienen en la ficha de especificaciones, de esta ficha se sacan los valores bases para determinar qué tan cerca del rango se encuentran las muestras evaluadas en el laboratorio para colocarlas como población de control.

Una vez teniendo los valores de las pruebas D638 y D790 se prosigue a generar una base de datos que funcione como parámetros de medición en donde los valores obtenidos serán aquellos de los que se parta para realizar las pruebas con las fibras de refuerzo, en donde se toman en consideración la saturación con fibras de la matriz para poder generar un refuerzo al material que en este caso es el *copolímero de alto impacto*.

El próximo paso es determinar los porcentajes de fibra para los refuerzos, cada población consta de 5 probetas para cada prueba y con porcentajes inferiores al 50% de contenido, por lo que habrá que determinar cuál es el mejor comportamiento según las características que se quieran enfatizar.



Gráfica 5.- Impregnación de partículas de PP Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. "Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería."

Capitulo III: POLARM (Aramida + Polipropileno)

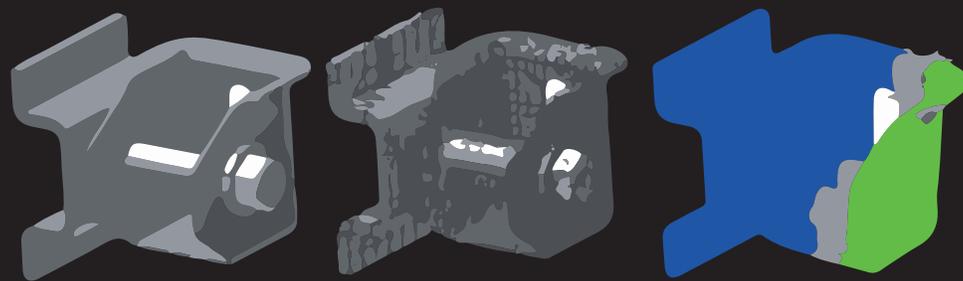
En la tabla según la literatura se puede observar que el porcentaje de impregnación no se da de manera homogénea a partir del 50% por lo que se descartaron las muestras, esto nos da un panorama general de hacia donde habría que enfocar las variables en el porcentaje de la fibra.

Una vez teniendo todas las probetas se pasa a realizar las pruebas de resistencia mecánica D638-03 y D790-02 con el mismo procedimiento donde al final encontraremos valores con una desviación estándar que abra que graficar para sacar un promedio de los valores y poder calificar la resistencia real que pudiera tener el compuesto.

La forma de validación será mediante el análisis de los datos obtenidos por la muestra y cotejados con la población de control en donde se determinará a que valores se logró llegar y cómo es que los resultados se dieron.

Debido a que aún no se realizan las pruebas pertinentes y a que el material aún no ha sido creado resulta imposible el analizar resultados preliminares puesto que no hay datos que revisar, además de que las conjeturas no pudieran ser acertadas ya que al tratarse de un nuevo material no podemos determinar como es que se va a comportar o si va a tener alguna cercanía con las tablas de propiedades que el material nos arroja en sus pruebas de caracterización.

Por este motivo es que se realizan las pruebas en softwares de simulación asistida por computadora, para poder evaluar y determinar si las hipótesis planteadas en un inicio son viables y reales.



Capítulo IV : Simulación

Capítulo IV: Simulación

4.1 ANTECEDENTES Y EJEMPLOS EN LA SIMULACIÓN

La simulación asistida por computadora se crea a partir de la necesidad de reducir los costos de producción basados en el prototipaje de piezas o elementos que están sujetos a la aprobación mediante al rendimiento que presenten, esto quiere decir que al ser elementos nunca antes probados existe la probabilidad de que no funcionen, o que su desempeño no sea el óptimo necesario para su correcto funcionamiento. La simulación fue creada a la par que se hizo el desarrollo tecnológico para herramientas computacionales, se cree que uno de los primeros proyectos en los cuales fue importante la simulación se remonta a las pruebas para generación de armas y desarrollo de nuevos materiales para fisión nuclear del “*Proyecto Manhattan*” que surge a raíz de los conflictos bélicos de la segunda guerra mundial, en donde la producción nuevo armamento era primordial para obtener ventaja sobre los rivales.

Las simulaciones están basadas en la programación de modelos matemáticos que presentan las características más similares en las cuales se tendría que someter el elemento a prueba. Uno de los beneficios de la simulación es que abarata los

costos del prototipaje y permite generar condiciones extremas para las pruebas que en muchos casos serían imposibles de alcanzar, esto nos da márgenes de seguridad con los que se pueden trabajar dependiendo del área de ingeniería en la que se trabaje. La rama de la simulación es un campo bastante extenso ya que no se centra específicamente en la creación de materiales o en el modelado de prototipos para ingenierías automotriz o espacial, los modelos y simulaciones se utilizan también en ramas de la cinematografía o videojuegos, con herramientas que imitan condiciones similares a las del mundo en el que vivimos e incluso pueden predecir comportamientos en lugares creados desde cero, esto se debe a la amplitud de condicionantes que se pueden agregar a un modelo matemático de simulación.

Actualmente hay una diversidad más grande de softwares especializados para simulación, cada uno de ellos se centra en ramas específicas y usos específicos, aunque la mayoría de ellos podríamos decir que se basan en el principio básico del código de programación C++, basándonos en su uso común para simulación de elementos finitos y dinámica de fluidos. La apertura que este lenguaje nos brinda es bastante extensa

por lo que se pueden acoplar los parámetros para moldearlos a nuestra conveniencia.

Diversas disciplinas han optado los modelos de simulación como una herramienta mas asequible para las investigaciones que intentan innovar o producir nuevos materiales, prototipos, ambientes, entre otros usos. Comúnmente las ramas que son mas beneficiadas de la asistencia por computadora son la de generación de materiales, ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería aeroespacial, entre otros. Lo que hace tan popular el uso de la simulación es que varios de los materiales que se ocupan para estas industrias son bastante costosos o difíciles de obtener, por lo que el uso correcto y dosificado es primordial para su desarrollo y ayudándonos de las herramientas digitales podemos absorber esos costos de producción e incluso adelantarnos a invertir grandes cantidades de dinero en posibles investigaciones que no lleguen al fin esperado.

4.2 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

El mundo de la arquitectura también se ve beneficiado de las herramientas de simulación con softwares que aprovechan el máximo las condiciones ambientales digitales, como el correcto cálculo de la reflexión de luces o la física de materiales en su representación tridimensional. Para tener algún ejemplo de ello podemos observar la evolución que ha tenido el uso de la realidad virtual y las presentaciones gráficas computacionales como los renders, la industria de la arquitectura se beneficia de los avances que genera la investigación para videojuegos y la industria del cine, ya que son quienes aprovechan al máximo las capacidades de los softwares para presentarnos entornos lo mas parecidos a la realidad. Si hacemos una revisión rápida de los softwares que podemos encontrar en el mercado por mencionar los más comunes encontraríamos las siguientes.

UE4 (Unreal Engine 4): Que se especializa en simulación y visualización realista mediante el trazado de luces en tiempo real y la optimización de geometrías para eficientizar los tiempos de renderizado de una escena.

Capítulo IV: Simulación

Autodesk Maya: Es un software de modelado 3D que es muy utilizado en la industria del cine y de los videojuegos ya que permite crear animaciones y simulaciones con físicas muy parecidas a como las encontramos en nuestro planeta. Imaginemos la caída libre de una pluma desde 1m de altura, con base en ciertos parámetros de la física podemos simular su movimiento y aproximarlos a la realidad, esto gracias a algoritmos matemáticos que analizan valores reales provenientes del mundo donde vivimos, pero estos parámetros pueden ser modificados para generar comportamientos diferentes.

Substance Designer/Painter: Es un software especializado en la simulación visual de los materiales mediante el sistema de reflexión *PBR* por sus siglas en inglés (*Physically-Based Rendering and Shading*)³⁴ que genera comportamientos de reflexión de luces basados en cálculos paramétricos del mundo.

SAP2000: Utilizado normalmente en el cálculo, análisis y diseño de estructuras, nos provee de un extenso catálogo de materiales con resistencias preestablecidas mediante las normativas mundiales y una posibilidad para poder sus modificar parámetros y poder generar cálculos más acertados.

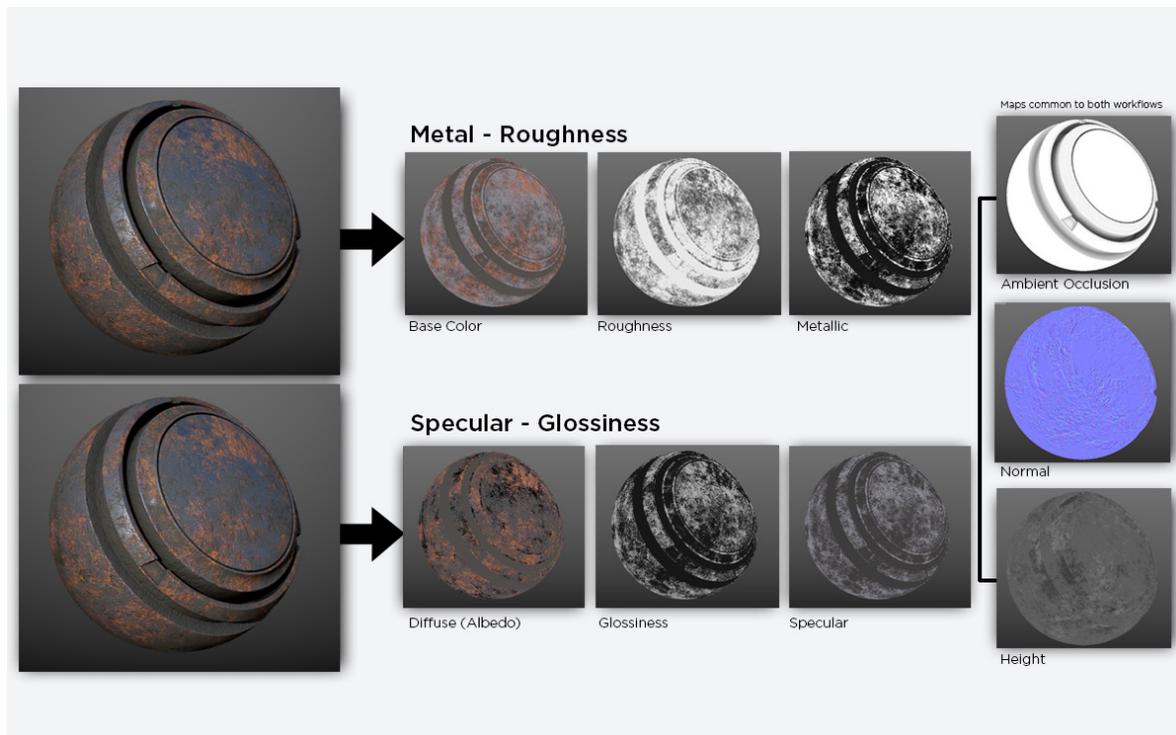


Ilustración 22: Metallic/roughness y especular/glossiness línea proceso de trabajo. <https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-2>

34.- McDermott Wes. (Febrero 2018). The PBR Guide Vol.1. Tercera Edición: Allegorithmic.

Dentro del segmento de los softwares especializados para simulación mecánica y de materiales encontramos los siguientes por mencionar algunos, ya que la lista puede ser muy extensa ya que también hay desarrolladores independientes open source que van surgiendo con forme a la demanda:

MUESLI: Proporciona interfaces con programas comerciales y se pueden utilizar códigos existentes o crear nuevos códigos también es accesible a la divulgación de las investigaciones en sus redes abiertas además otorga comparaciones por cada modelo y material añadido. El enfoque del software se dirige hacia la compilación de modelos en una plataforma abierta y está centrado a trabajar en plataformas LINUX y MAC OS, desarrollado con código C++.

COMSOL: Paquetería de resolución para elementos finitos con compatibilidad para MATLAB. Desarrollado para plataformas *Windows, Mac, Linux, Unix*, permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales y está enfocado a un gran número de áreas dentro de las que se encuentran: acústica, electroquímica, geomecánicas, transferencia de calor, fluidos moleculares,

módulos de plasma y mecánica estructural.

LAMMPS: Diseñado para la simulación atómica molecular como la mayoría de otros softwares trabaja con lenguaje C++ y al igual que MUESLIE es una fuente abierta desarrollada por la Sandia National Laboratories basada y funcional en la Veret list, que es una base de datos para dinámica de moléculas, este software está diseñado para correr en plataformas *Linux, Osx, Windows*.

ACCELRYSS: Orientado a la resolución química y biotecnológica de materiales. Tiene como campos de desempeño la farmacéutica, biotecnología, aeroespacial, energía e industria química. Los softwares de desempeño son los siguientes: Accelrys Enterprise Platform, Pipeline pilot (análisis de resultados automatico), Isis/draw, Basem Host. Su área de estudio se enfoca en la simulación por teoría cuántica para algunos elementos.

ABAQUS: Es un software diseñado para la simulación mecánica de elementos finitos especializada en vibración dinámica, sistemas con multicuerpos, impactos, estáticos no lineares, cálculo térmico y acústico. Compatible con geometrías CAD y cuenta

Capítulo IV: Simulación

con un apartado específico para materiales compuestos, termoplásticos, metales y está desarrollado para la plataforma de Windows.

Muchos de los softwares antes mencionados tienen una complejidad bastante extensa ya que son programas especializados para cada área en específico y los requerimientos que presentan son bastante puntuales. Por este motivo y debido a que la literatura no es muy abundante para poder tener una aproximación más amigable fueron descartados del proceso experimental en esta tesis y nos enfocamos en dos programas en concreto los cuales son *Autodesk Inventor* y *Solidworks*, softwares que están enfocados en el desarrollo y asistencia en el diseño de elementos mecánicos los cuales simulan distintos tipos de pruebas mecánicas a elementos sólidos y no sólidos.

Autodesk Inventor

Es un software bastante flexible que permite la inclusión de modelos cad para hacer diversas pruebas aplicándoles físicas reales a elementos digitales. Está enfocado principalmente en la generación de diseño industrial en donde se requiere de un proceso de diseño 3D y un proceso de pruebas que

sustenten el funcionamiento del diseño, por este motivo es usado frecuentemente en industrias de prototipaje automotriz y en el diseño de procesos industriales aunque también tiene la capacidad de hacer simulación de materiales debido a la base de datos que maneja y a las herramientas que se requieren para hacer un análisis completo de una prueba mecánica. Es capaz de realizar pruebas recopilando información basadas en la nube y puede crear un proceso de desarrollo de ciclos de vida con datos obtenidos del modelo, también es capaz de generar cadenas de ensamblajes con tecnología de *iLogic*³⁵, además cuenta con una biblioteca de componentes estandarizada para realizar conexiones sencillas o complejas para maquinaria específica.

Autodesk desarrollo una forma de trabajo para la simulación de la estructura de uno o varios componentes en donde se analizan los siguientes ocho puntos³⁶:

1.- Definición de expectativas: estime el comportamiento físico usando un modelo conceptual.

2.- Procesamiento previo: especifique los parámetros físicos en el modelo y defina los análisis que desea ejecutar.

35.- Autodesk Inc. (2020). Inventor. Junio 2020, de Autodesk Sitio web: <https://www.autodesk.mx/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>

36.- Autodesk Inc. (2020). Descripción general del análisis de estructura. Junio 2020, de Autodesk Sitio web: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2021/ESP/?guid=GUID-302B683F-8CAC-46A4-BD67-E39D4BAC0997>

3.- Resolución: resuelva el modelo matemático.

4.- Procesamiento posterior: visualice y evalúe los resultados.

5.- Revisión de las expectativas: compare los resultados con las expectativas iniciales.

6.- Conclusión (mejora de los datos especificados): ¿responden los resultados a las expectativas?

7.- Si la respuesta es NO, se revisan y se modifican los datos introducidos para mejorar los resultados. Las modificaciones pueden incluir, entre otras, las siguientes: eliminar las vigas no deseadas, cambiar las cargas o las restricciones, cambiar el tipo de análisis, etc. Existen numerosos caminos que se pueden explorar para depurar los resultados de los análisis y aproximarlos a las expectativas. La idea esencial es que el refinado es un proceso enormemente repetitivo.

8.- Si la respuesta es Sí, el trabajo de análisis ha concluido. El resultado más probable es que el diseño se refina y mejora.

Solidworks

Solidworks al igual que Autodesk Inventor es un software especializado en el modelado y simulación de elementos 2D y 3D, a diferencia de la paquetería de Autodesk, Solidworks tiene una gama de programas y extensiones que permiten hacer la simulación un tanto más específica y con una biblioteca de elementos y materiales más acorde. Dentro de los análisis que podemos encontrar en su paquetería están análisis estáticos lineales y no lineales, así como análisis dinámicos mediante procesos de simulación de elementos finitos (FEA)³⁷.

Dentro de los complementos que podemos obtener en solidworks se encuentra solidworks CAM que se centra en la etapa de diseño previo al prototipaje haciendo una etapa de diseño integral, cuenta con simulación CAMworks(*ibídem*) que permite simular en tiempo real procesos de fresado y elaboración de moldes para detectar inconsistencias en la producción y mejorar el rendimiento y diseño de las piezas. Solidworks plastics(*ibídem*) permite predecir los flujos de inyección de para piezas de plástico para el diseño de moldes y para evitar pérdidas de material.

37.- Solidworks. (2020). Solidworks Simulation. Junio 2020, de Dessault systemes solidworks corporation Sitio web:<https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-simulation>

38.- *Ibídem* Solidworks CAM. Sitio web:<https://solidworks.com/es/product/solidworks-cam>

39.- *Ibídem* Solidworks Plastics. Sitio web:<https://solidworks.com/es/product/solidworks-plastics>

Capitulo IV: Simulación

Solidworks en su guía de usuario presenta un modelos de siete pasos para el diseño eficaz de modelos para tener un mejor flujo de trabajo, a continuación presento los puntos⁴⁰:

- 1.- Identificación de los requisitos del modelo.
- 2.- Conceptualización del modelo en función de las necesidades identificadas.
- 3.- Desarrollo del modelo según los conceptos.
- 4- Análisis del modelo.
- 5.- Generación del prototipo del modelo.
- 6.- Construcción del modelo.
- 7.- Edición del modelo, si fuera necesario.

40.-Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (1995-2015). Método de diseño. En Introducción a Solidworks(23). 175 Wyman Street, Waltham, Mass. 02451 EE. UU:

4.3 MÉTODO DE SIMULACIÓN

Para las pruebas de simulación se tomaron las siguientes consideraciones con respecto a la ingeniería y diseño del compuesto, todos los datos fueron basados en las informaciones de las cedulas de propiedades que cada uno de los materiales tiene.

Para la simulación del material se tomarán en cuenta los siguientes lineamientos:

- 1.- El cuerpo es solido.
- 2.- El porcentaje de fibra de refuerzo que esta contemplado es el 40%.
- 3.- Por lo tanto, los valores mecánicos con los que cuenta el twaron serán calculados con respecto al porcentaje que se ocupa.
- 4.- Modulo de Young del PP 965MPa y el del twaron es de 120 GPa.

El caso es entonces: De la resistencia que tiene el PP de 965MPa se adicionara un 40% del valor del Twaron de 120 GPa contemplando que la adherencia es del 100%, si el resultado es exitoso se hará una prueba con un 80% de adherencia acercándonos más a la realidad de juntar dos materiales poliméricos.

La densidad: En el caso del PP su densidad es de 9 g/cm^3 mientras que en el Twaron la

densidad es de 1.45 g/cm^3 por lo que se aplicara el mismo procedimiento de agregado de propiedades mediante el porcentaje indicado según la literatura, que se refiere a un 40% del material de refuerzo dentro de la matriz.

5.- La obtención del Modulo de Poisson se determina de la división de fuerzas a tensión entre la elongación del material, en el caso del Twaron tenemos que el esfuerzo a tensión es de 3.6GPa y la elongación es de 4.4%, mientras que para el PP su esfuerzo a tensión es de 20MPa y su elongación es de 6%.

La prueba que a continuación se muestra fue sometida mediante las especificaciones que las normativas plantean como pruebas controladas y óptimas para su medición para ompresión según la norma ASTM D695-02.

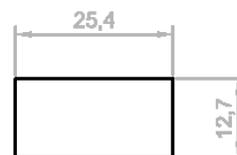


Ilustración 23.- Tamaño de muestra según la normativa ASTM D695-02 para compresión.

Capítulo IV: Simulación

A continuación se presentan en primera instancia las pruebas de resistencia realizadas para compresión de materiales fibroplásticos, según las cedulas de propiedades asignadas a cada material.

En esta sección podemos observar los resultados de deformación para las pruebas de compresión realizadas con las cargas sugeridas según la normativa ASTM.

4.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La creación, conceptualización o diseño de un nuevo material en nuestro mundo no debiera tomarse a la ligera, ya que de nada nos sirve crear materiales sin usos específicos, claramente podemos adoptar esos materiales para usos alternos, pero... ¿realmente reaccionaran como predispone la teoría?, en la búsqueda por nuevos materiales me he encontrado con algunos casos donde los materiales son creados sin propósitos específicos, esto no hace menos a un material, al contrario para poder dejar de generar tecnología ineficiente lo que debemos hacer es buscar un uso apropiado para las cosas que tenemos abandonadas.

Cuando me refiero a que un material sin un objetivo en específico es un elemento

carente de significado en la vida cotidiana lo hago remitiéndome a la naturaleza, como es el caso de los picos de los tucanes, un material fibroso de queratina con un recubrimiento que impide quebrar la estructura fibrosa al interior, el pico del tucán fue creado con un propósito específico, pelar fruta, romper cascaras solidas etc.. pero lo que lo hace tan eficiente es que fue creado para eso mediante siglos de evolución.

Evidentemente podemos asimilar materiales para otros tipos de usos que no son para lo que inicialmente se diseñaron, pero muchas veces estos materiales no explotan al máximo su potencial de desarrollo que tienen.

Analizando el porqué del éxito de algunos materiales como el concreto es muy sencillo, ya que es un material que tiene una tradición constructiva impresionante, desde las culturas pre cristianas hasta hoy en día, la única diferencia es el proceso por el cual este pétreo está constituido, pero imita demasiado bien las características de sus predecesores.

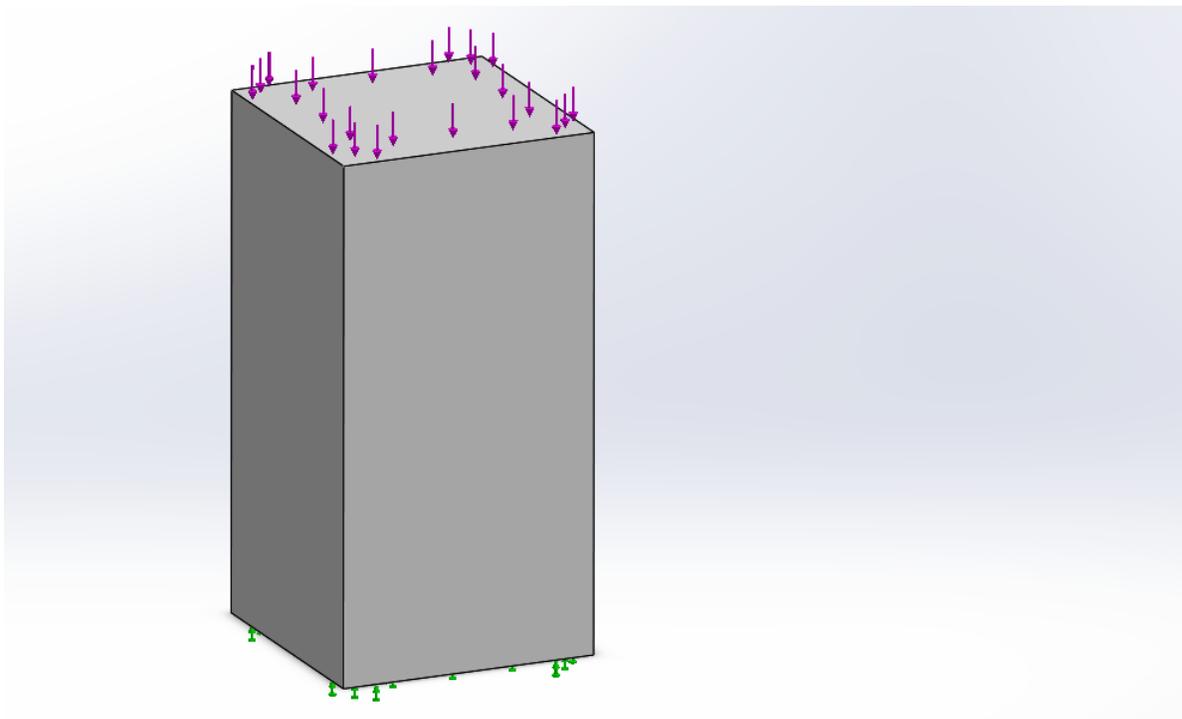


Ilustración 24.- Modelo de referencia.

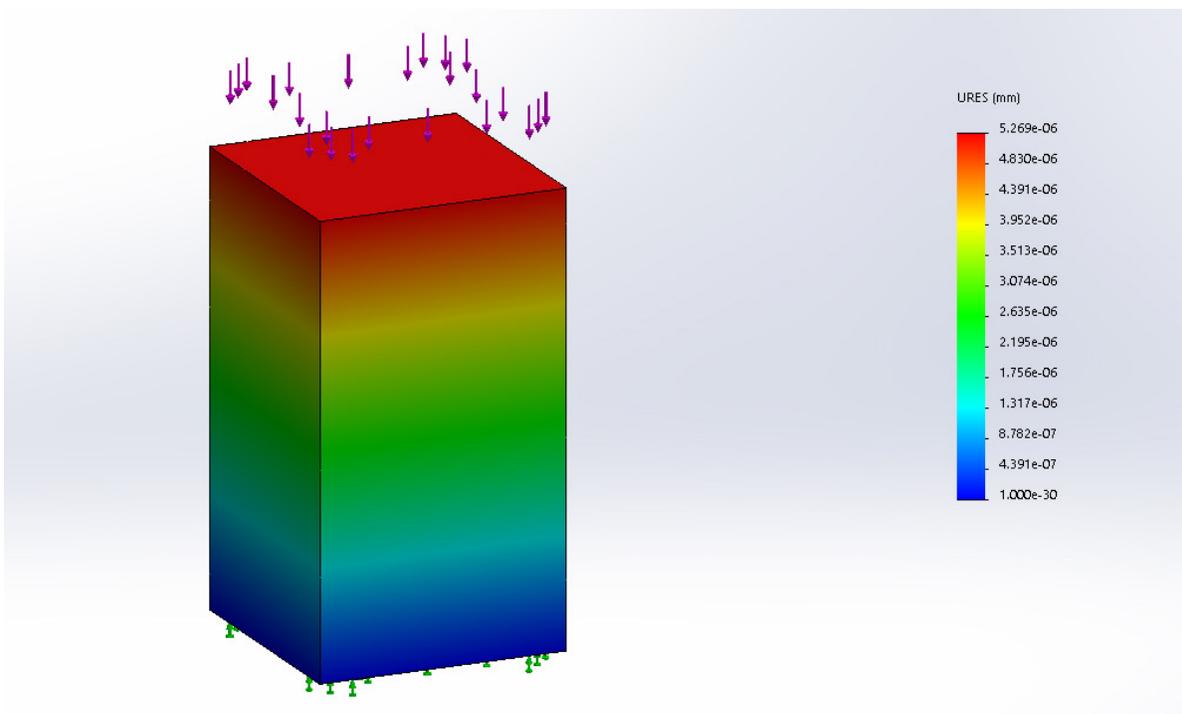


Ilustración 25.- Desplazamiento estático, escala de deformación $4.82054e+06$.

Capitulo IV: Simulación

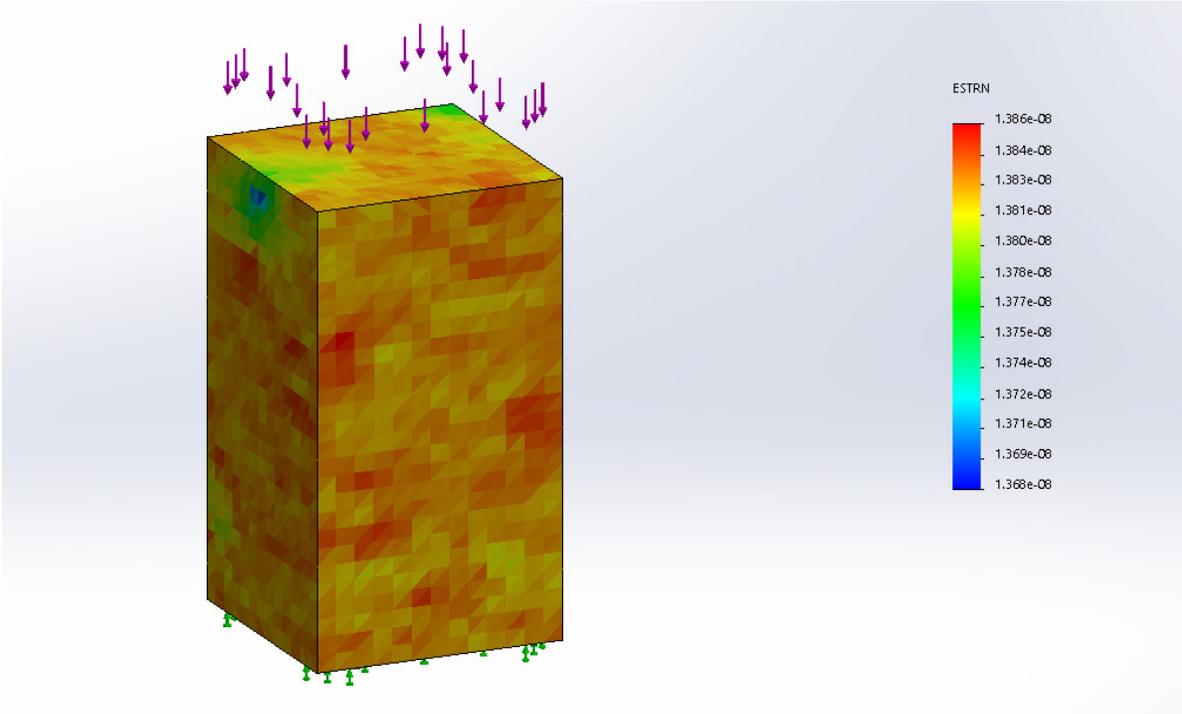


Ilustración 26.- Tensión estática, escala de deformación 4.82054e+06.

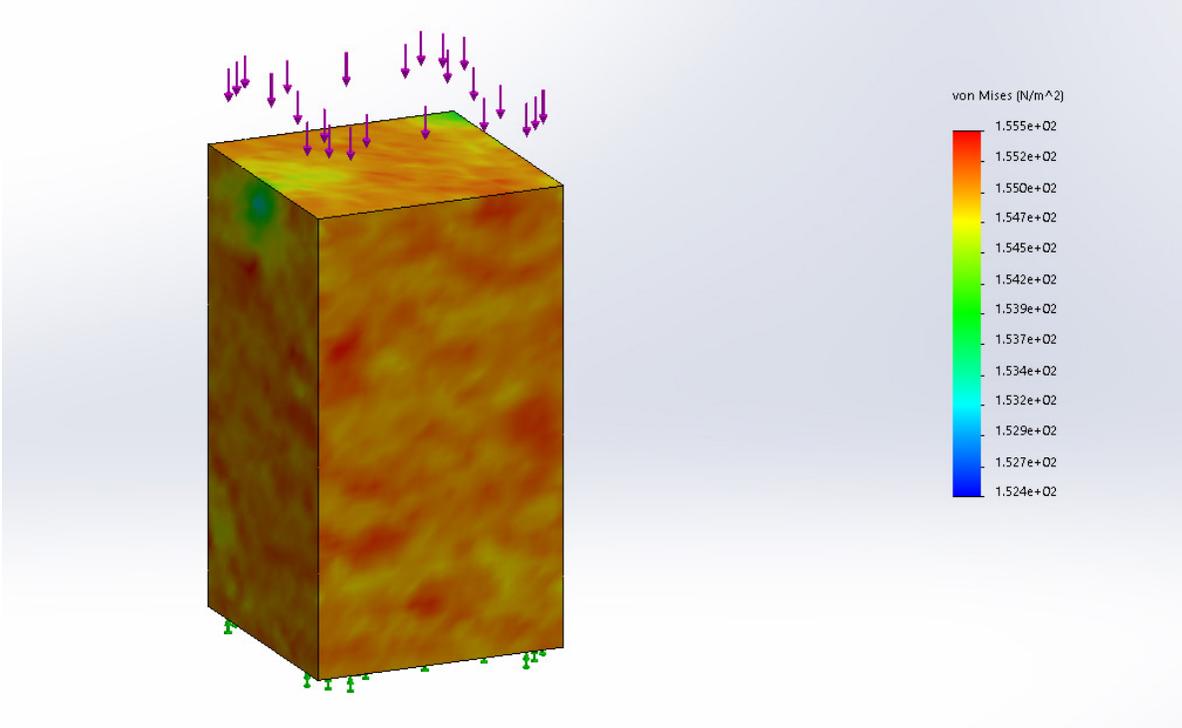


Ilustración 27.- Tensión estática, escala de deformación 4.82054e+06.

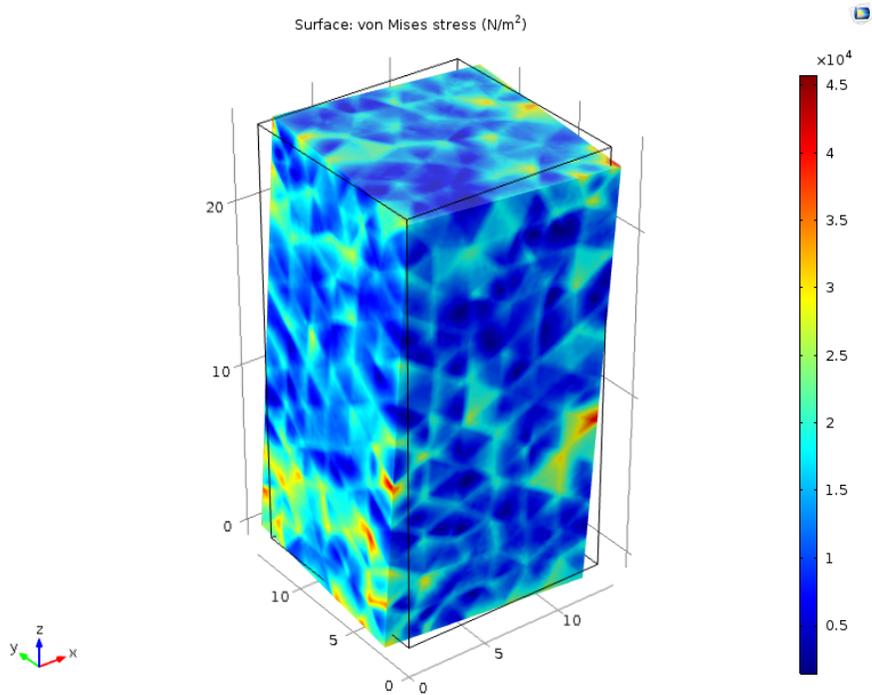
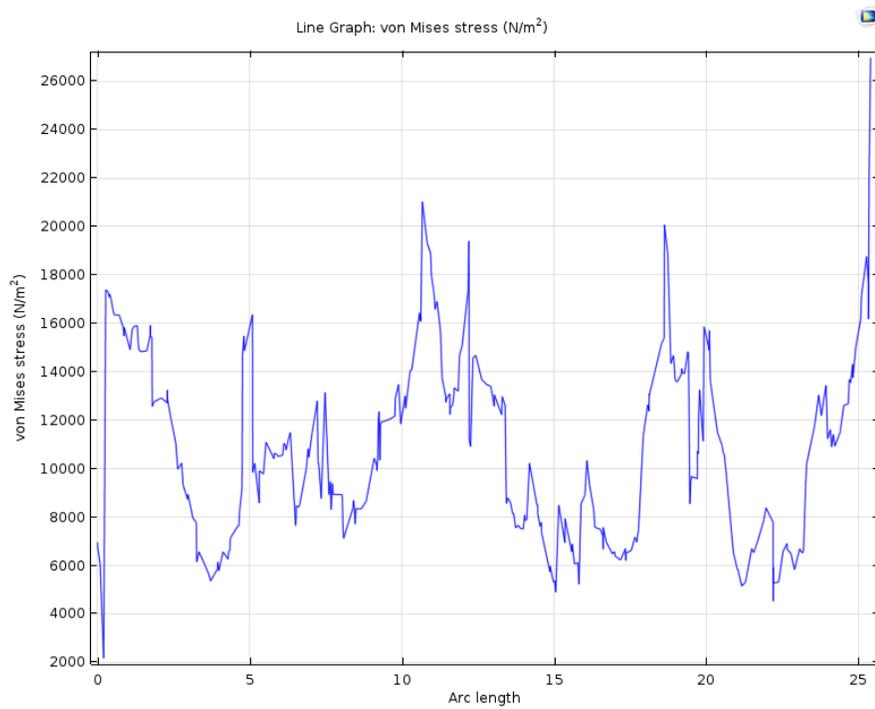


Ilustración 28.- Tensión de von Mises, escala de deformación 4.82054e+06.



Gráfica 5.- Gráfica de deformación en n/m2.

Capitulo IV: Simulación

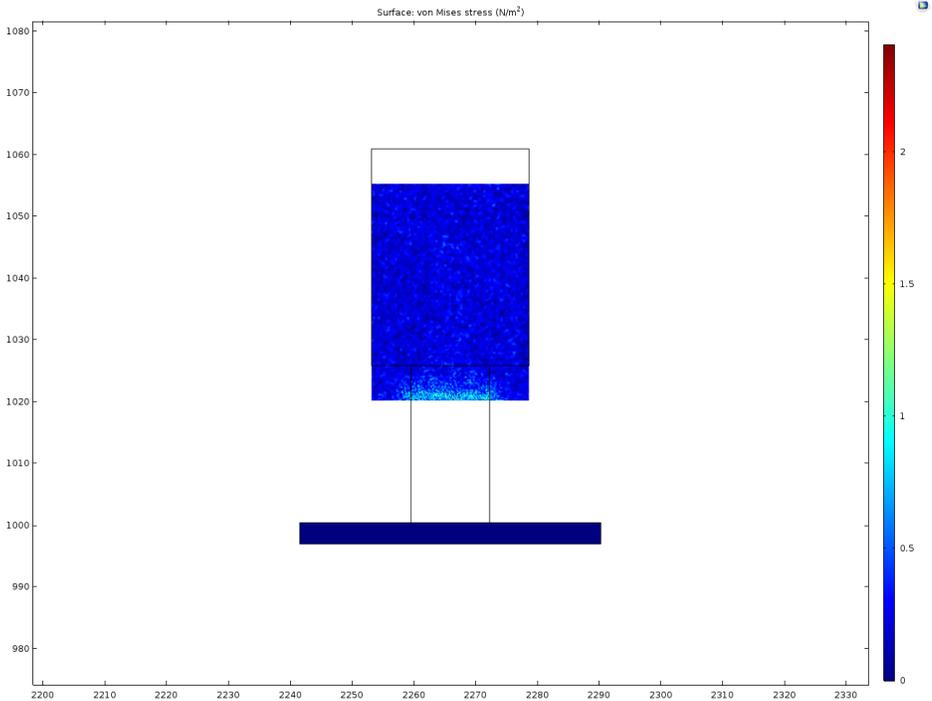


Ilustración 29.- superficie de deformación al fallo n/m2.

4.4 HACIA LA PRIMERA EXPERIMENTACIÓN

A continuación, se muestra el proceso inicial de la experimentación física, donde se intenta reproducir la probeta explicada en el capítulo 3.7 donde se tienen las medidas indicadas obtenidas de las especificaciones técnicas de las normas ASTM D638-02 (Tensión) y la norma ASTM D695-02^a.

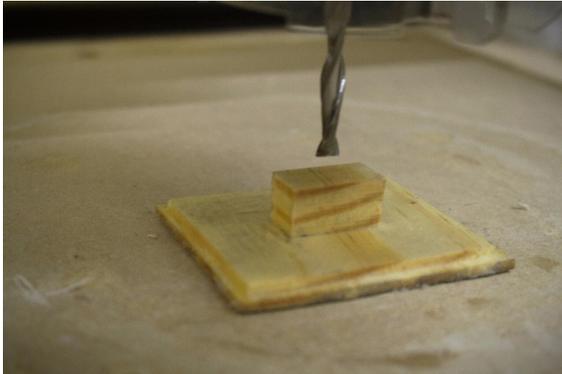


Ilustración 30.- Router en madera de pino positivo de molde a compresión

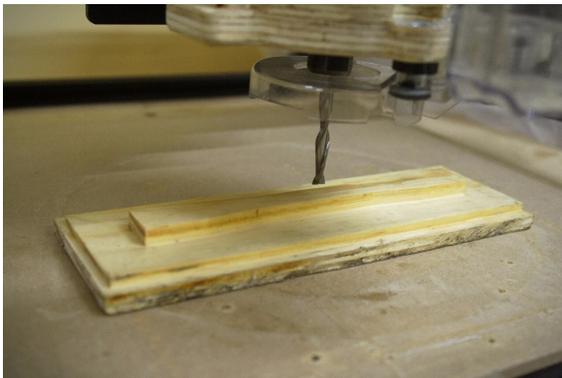


Ilustración 31.- Router en madera de pino positivo de molde a tensión



Ilustración 32.- Encofrado de positivos con poliestireno



Ilustración 33.- Vaciado de caucho de silicón P-48

Capitulo IV: Simulación



Ilustración 34.- Desmoldado de los negativos



Ilustración 36.- Aplicación de calor uniforme en los moldeas a 450°F

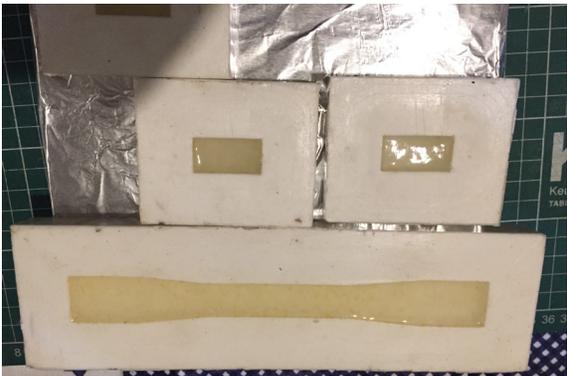


Ilustración 37.- Recuperación de los moldes tras 30min de aplicación de calor y proceso de enfriamiento a temperatura ambiente de 14°C



Ilustración 35.- Vaciado de PPc dentro de los moldes



Ilustración 38.- Desmoldado de las probetas y perfilación

Conclusiones

Capítulo IV: Simulación

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tesis fue bastante difícil ya que hubo retos que se tuvieron que manejar de diversas formas para poder continuar con el proceso de investigación y poder llegar a un resultado aceptable para todos aquellos que estuvieron involucrados en la creación de este documento.

Primero que nada, quisiera hacer inca pie en lo complejo que es generar un nuevo material partiendo desde cero, con poca o nula financiación para la creación de prototipos para someterlos a prueba. La creación de una pequeña muestra requiere de muchísimo estudio y equipo especializado que en el caso de esta tesis obligó a tomar medidas alternas para poder someter a prueba los resultados planteados en la hipótesis. Para el caso concreto de este compuesto que denominamos POLARM se necesitaba primero que nada de unas resinas especiales con adherencias y compatibilidad específica para polipropileno o copolímero de impacto y poliamidas aromáticas, las cuales solo se encontraban en el extranjero y requerían de una solicitud para poder obtener una muestra, proceso que puede o no ser aceptado por la compañía ya que involucra el papel de un producto en el

sometimiento de pruebas que pueden ser o no benéficas para la marca. Posterior a eso se requiere de moldes diseñados específicamente para que a la hora de hacer un vaciado de componentes plásticos no haya generación de burbujas al interior y permita un fraguado uniforme y lo más estable posible, permitiendo que haya válvulas de escape para los vapores, este proceso de diseño tiene que ser realizado por expertos en el tema de moldes para ingeniería de materiales que conozcan las necesidades concretas de cada material.

Teniendo en cuenta todo lo anterior habría que hacer una mezcla y alineación de las fibras dentro del proceso de fraguado del elemento plástico para poder crear un material compuesto, este proceso tiene que estar documentado y especificado a la perfección para que pueda ser replicado y pueda haber muestras de control. Una vez concluido con todo este proceso se necesita de maquinaria especializada para poder generar las pruebas a condiciones ambientales bastante específicas que requieren humedad y temperatura controlada, una vez más para poder tener un proceso hermético y que pueda someterse a replicas posteriores.

Con conocimiento de todo el proceso se intentó generar un compuesto de una manera más artesanal lo cual no resultó como se esperaba ya que el polipropileno tiene que calentarse a una temperatura uniforme ya que si no presenta degradación y eso impide la homogenización de la mezcla, otro factor que es importante es que el molde sea rígido y no permita contracción desigual a la hora del curado, ya que eso podría llevar como resultado una muestra torcida y sin las medidas necesarias para realizar las pruebas. Estos problemas que se describen fueron presentados en esta investigación al no contar con los aditamentos adecuados, lo cual impidió la realización de los procedimientos de pruebas físicos, más nunca impidió la posibilidad de ser probado mediante la simulación, por este motivo se hizo un reenfoque en los objetivos a alcanzar para poder convertir las carencias de la investigación en nuevas puertas que nos permitieran explorar otros campos en los que se podía crear de manera digital el mismo proceso y poder obtener resultados favorables.

La simulación tiene una ventaja bastante noble sobre las pruebas de laboratorio físicas, ya que permite realizar un sinfín de pruebas

y sin ningún costo de impacto a largo plazo, además reduce los tiempos de creación para las pruebas y las condicionantes ambientales no juegan un papel en contra ya que siempre se tienen un ambiente hermético y estéril. Entre otros beneficios que cuenta la simulación asistida por computadora es que permite a investigadores jóvenes seguir con un proceso de experimentación a un costo menor y de no contar con capital suficiente para el coste de la investigación poder recurrir a otras herramientas sin truncar las ilusiones y necesidades.

Las pruebas de simulación tienen como fundamento teórico los datos recabados a lo largo del desarrollo de la experimentación, por lo que podemos asegurar que los datos utilizados para generara la simulación fueron recabados de las cedulas de propiedades que el fabricante proporciona y los datos obtenidos de las investigaciones previas que han experimentado con materiales similares. Con las cedulas de datos se hizo un vaciado y se colocaron los valores hipotéticos de los materiales y se realizó la prueba según las especificaciones que marca la norma correspondiente (ASTM D695-02 para compresión).

Se concluye por lo tanto que la simulación no suple un proceso

Capítulo IV: Simulación

de experimentación físico ya que este último es necesario para la validación de un material antes de salir a mercado, pero se intuye y se presenta la posibilidad de cambiar los métodos tradicionales de experimentación para que el uso de recursos sea eficiente y enfocado a un desarrollo plausible para una cantidad mayor de investigadores. Planteando entonces un proceso que inicia con la investigación literaria, posteriormente someterse a una simulación asistida por computadora y concluir con la creación de prototipajes para su último visto bueno.

Con respecto al POLARM podemos deducir que con las condiciones adecuadas y las mezclas antes mencionadas podemos obtener resultados benéficos, los cuales son:

- Resistencias mayores a la compresión
- Un mejor comportamiento elástico dentro de las pruebas
- Capacidades mejoradas contra activos corrosivos como el fuego y algunas cetonas
- Estructuras más ligeras con elementos más esbeltos

Con la obtención de estos resultados el siguiente paso sería la generación del material

compuesto teniendo en cuenta las variables mencionadas en el capítulo III de la presente tesis y se abre la oportunidad de trabajar con futuras líneas de investigación que abarquen la simulación de materiales o de procesos de producción que pudieran abaratar los costos finales y ser más viables para futuros proyectos. También se tendría la posibilidad de extender el proceso para que, una vez generado el material, se puedan abrir nuevos caminos con lo que respecta a la geometría del producto o la forma de comercializarlo y utilizarlo dentro de la arquitectura ya que, como hemos visto a lo largo de la historia de la arquitectura, la geometría de los elementos llega a tener un gran impacto dentro de las estructuras, pudiendo otorgar beneficios o desventajas según sea el caso.

Con los datos obtenidos se piensa que POLARM podría también ser fundamental en la creación de estructuras modulares, ya que la forma de procesamiento de los plásticos a escalas industriales promueve la generación de moldes estandarizados y eso hace que el producto se vuelva:

- Más barato
- Accesible para un mayor mercado
- Reduzca los tiempos en las construcciones

Glosario de términos

Anexos

GLOSARIO DE TÉRMINOS

TERMINO	SIGNIFICADO
PPc	Copolímero de alto impacto
MPa	Mega Pascales
Psi	Libras por pulgada cuadrada
mPa	Mili Pascales
GPa	Giga Pascales
Kg/cm ²	Kilogramo/centímetro cuadrado
1W/mK	Vatios (metro x kelvin)/kilocaloría
MFI	Melt Flow index (índice de flujo de fusión)
MVR	Melt Flow Rate (índice de fluidez)
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
g/cm ³	Gramos sobre centímetro cúbico
T _c	Capacidad de almacenamiento térmico
T _m	Temperatura de fusión
X _c	Conductividad térmica
Vicat	Temperatura de reblandecimiento
HDT	Temperatura de flexión bajo carga
PBR	Phisically Based Rendering and Shading
N/m ²	Newton / metro cuadrado

Bibliografía

Anexos

BIBLIOGRAFÍA

- Cristina Paredes Benítez. La biblia de los materiales de arquitectura. Barcelona, España: Köneman, 2014.

-Daniel Borden, Jerzy Elzanowski, Cornelia Lawrenz, Daniel Miller, Adele Smith y Joni Taylor. Architecture a World History. Barcelona, España: Blume, 2009.

-Richard Rogers & Philip Gumuchdijan. Architecture the Whole Story. London, England: Quintessence Editions Ltd, 2014.

- Lecturas complementarias, materiales compuestos Poveda, Santiago. “Presentación normalizada de piezas de material compuesto.” Virtual Graphics Group,: 1-22. ,. Noviembre 2015 ,.

- Lees, Janet M. & Burgoyne Chris J.. “Experimental Study of Influence of Bond on Flexural Behavior of Concrete Beams Pretensioned with Aramid Fiber Reinforced Plastics.” ACI Structural JournalMay-June 1999: 377-385,.. Octubre 2015,

- Gonzales, Ivan & Ramos, Torres. “Preparación y Caracterización de Materiales Compuestos Termoplásticos Unidireccionales Reforzados con Fibras de Ingeniería.”

Revista Mexicana de Ingeniería Química15 Marzo 2007: 51-58. ,. Septiembre 2016 ,.

- Edil da Costa, Cesar, Velasco, Francisco & Torralba, Jose. “Materiales Compuestos de Matriz Metálica. I Parte. Tipos, Propiedades, Aplicaciones.” Revista Mexicana de Ingeniería Química2000: 179-192. Consejo Superior de Investigaciones Cientificas. Octubre 2016 <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>.

- Escudero, Domingo. “Materiales Compuestos Aplicaciones.” Informes de la ConstrucciónMarzo/Abril 2001: 45-152. ,. Noviembre 2016 ,. Method for reliable design of composites structures Dehmous, Hocine, Duco, Fabien, Karama, Moussa & Weleman, Hélène . “Multilevel Assessment Method for Reliable Design of Composite Structures.” Informes de la Construcción2016: 1-25. Taylor & Francis group. Noviembre 2016 <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2016.1142027>.

- Matos Mireya, Sánchez Johan, Jimenez María, “Propiedades mecánicas y comportamiento a fractura de un polipropileno homopolímero comparado con un copolímero de alto impacto grado comercial”, USB, UPC, 2006 www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html19.-

Materiales Compuesto UNI Malaga ,. “Materiales Compuestos.” Ciencia de los Materiales. Málaga, España: , , 2004/2005.

- Á g u i l a r , V i c t o r . “Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida”. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2010

- de Lange, Pieter, Akker Peter, Mäder, Edith, Gao Shanglin, Prasithphol W, Young R.. “Controlled interfacial adhesion of Twaron aramid fibres in composites by the finish formulation.” Elsevier2007: 2027-2035. Elsevier. Enero 2017 www.elsevier.com/locate/compscritch.

- Mileto, Camila & Vegas, Fernando. “El Análisis Estratigráfico Constructivo Como Estudio Previo al Proyecto de Restauración Arquitectónica: Metodología y Aplicación.” Arqueología de la Arquitectura 2003: 189-196.

- Vegas Noguera, F.. “La Biblioteca Municipal de Viipuri y la Restauración de la Arquitectura del Movimiento Moderno.” Loggia 1991: 30-31.

- Sola Morales, Ignasi. “Teorías de la Intervención Arquitectónica.” Quaderns

del Col.legi D’Arquitectes de Catalunya 1982: 30- 37.

- Milan Gaff, Miroslav Gasparik, Vlastimil Boruvka, Eva Haviarova. (2015). Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. Junio 2020, de Elsevier Sitio web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515303786>.

- Vicente Real J.J. (2016). Simulación y caracterización mediante Autodesk Inventor de un banco para aerogeneradores de baja potencia. España: -.

- Ramirez Alvaro Henry Mauricio. (2010). Simulación dinámica. En Diseño y simulación en Inventor de una máquina desbobinadora de flejes de acero(147-167). Quito, Ecuador: -.

- L.M Gómez-López, V. Miguel, A. MArtinez, J. Coello, A. Calatayud. (2013). Simulation and modeling of single point incremental forming processes whitin a Solidworks environment. Junio 2020, de Elsevier Sitio web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813014665>.

-McDermott Wes. (Febrero 2018). The PBR Guide Vol.1. Tercera Edición: Allegorithmic.

Anexos

- Autodesk Inc. (2020). Inventor. Junio 2020, de Autodesk Sitio web: <https://www.autodesk.mx/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>

- Autodesk Inc. (2020). Descripción general del análisis de estructura. Junio 2020, de Autodesk Sitio web: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2021/ESP/?guid=GUID-302B683F-8CAC-46A4-BD67-E39D4BAC0997>

- Honeywell International Inc. (2015). Spectra Fiber. Junio 2020, de Honeywell International Inc Sitio web: <https://www.packagingcomposites-honeywell.com/spectra/product-info/spectra-fiber/>

- Solidworks. (2020). Solidworks Simulation. Junio 2020, de Dessault systemes solidworks corporation Sitio web: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-simulation>

- Solidworks. (2020). Solidworks CAM. Junio 2020, de Dessault systemes solidworks corporation Sitio web: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-cam>

- Solidworks. (2020). Solidworks Plastics. Junio 2020, de Dessault systemes

solidworks corporation Sitio web: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-plastics>

- Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (1995-2015). Método de diseño. En Introducción a Solidworks(23). 175 Wyman Street, Waltham, Mass. 02451 EE. UU: https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf.

Anexos



Formosa Plastics®

Formolene® PP

Formolene® 2610A

Impact Copolymer for Compounding and Injection Molded Applications

Formolene® 2610A is a high impact copolymer polypropylene designed for such applications as Automotive Compounds and injection molding of Lawn & Garden products and Appliances. It is characterized by easy mold flow, excellent physical property balance of stiffness and impact at room temperature and sub ambient conditions as well as finished product dimensional stability.

Formolene® 2610A meets the requirements of the U.S. Food and Drug Administration as specified in 21 CFR 177.1520, covering safe use of polyolefin articles and components of articles intended for direct food contact. For additional information on approved conditions of use for food contact applications, please refer to the “Products” section on our website (<http://www.fpcusa.com/ourproducts.html>).

This material is free of animal-derived content.

Typical Properties of this Commercial Grade

Property	Test Method	Typical Values	
		English	SI
Melt Flow Rate, I ₂ @ 230°C	ASTM D1238	10 g/10 min	10 g/10 min
Density	ASTM D1505	0.9 g/cm ³	0.9 g/cm ³
Tensile Strength at Yield (50 mm/min)	ASTM D638	2,950 psi	20 MPa
Elongation at Yield (50 mm/min)	ASTM D638	6 %	6 %
Flexural Modulus (1.3 mm/min), 1% Secant	ASTM D790	140,000 psi	965 MPa
Notched Izod Impact Strength @ 73°F	ASTM D256A	11 ft-lb/in	587 J/m
Notched Izod Impact Strength @ 0°F	ASTM D256A	1.9 ft-lb/in	101 J/m
Notched Izod Impact Strength @ -22°F	ASTM D256A	1.7 ft-lb/in	91 J/m
Rockwell Hardness	ASTM D785	95 R Scale	95 R Scale
Heat Deflection Temperature @ 66 psi	ASTM D648	187 °F	86 °C
Heat Deflection Temperature @ 264 psi	ASTM D648	122 °F	50 °C

Notes: Specimens were injection molded according to the conditions specified in ASTM D4101.
Data for representative purposes only; not to be construed as product specification.
Published 3/99, Revised 4/13

Any inquiries regarding this data sheet should be addressed to: 9 Peach Tree Hill Road • Livingston, NJ 07039 • Phone: (888) FPCUSA3 • Fax: (973) 422-7772

The information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, reliable. Suggestions concerning uses or applications are only the opinion of FORMOSA PLASTICS CORPORATION, U.S.A. and users should perform their own tests to determine the suitability of these products for their own particular purposes. However, because of numerous factors affecting the results, FORMOSA PLASTICS CORPORATION, U.S.A. MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING THOSE OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, other than that the material conforms to the applicable current Standard Specifications Statements herein, therefore, should not be construed as representations or warranties. The responsibility of FORMOSA PLASTICS CORPORATION, U.S.A. for claims arising out of breach of warranty, negligence, strict liability or otherwise is limited to the purchase price of the material. Statements concerning the use of the products of formulations described herein are not to be construed as recommending the infringement of any patent and no liability for infringement arising out of any such use is assumed.

© Formosa Plastics Corporation, U.S.A.

Formolene® is a registered trademark of FPC USA

How does Twaron compare to other fibers?

Twaron's unique combination of properties makes it the fiber of choice in numerous applications.

		Twaron	Technora	UHMW PE	Carbon (PAN-based)	E-Glass	PBI	Oxidized PAN	Teijin-conex	PET	PA-6	PA-66
Density	(g/cm ³)	1.44-1.45	1.39	0.97-0.98	1.78	2.55	1.43	1.35-1.40	1.38	1.37-1.4	1.13	1.13
Tensile strength	(GPa)	2.4-3.6	3.4	2.2-3.9	3.5-7 ¹	1.5-3	0.32	0.2-0.3	0.62-0.69	1.1	0.9	0.9
Tenacity	(N/tex)	1.65-2.5	2.5	2.3-4.0	2.0-3.9 ¹	0.6-1.2	0.24	0.15-0.2	0.45-0.5	0.6-0.8	0.7-0.75	0.75
Modulus	(GPa)	60-120	74	52-132	230-540	72	5.1	7-11	-	-	-	-
Elongation at break	(%)	2.2-4.4	4.5	3-4	0.7-2.0 ¹	1.8-3.2	27	15-23	35-45	10-15	20-25	18-25
Moisture	(wt%)	3.2-5	1.9	<0.1	0	0.1	15	10	5-5.5	0.4	3.5-4.5	4-6
Glass transition	(°C)	-	-	-	-	1140	>400	-	280	82	50	50
	(°F)	-	-	-	-	2084	>752	-	536	180	122	122
Decomposition or Melting	(°C)	500	500	-	3700	-	450	-	400	-	-	-
	(°F)	932	932	-	6692	-	842	-	752	-	-	-
	(°C)	-	-	144-152	-	825	-	-	-	255	223	260
	(°F)	-	-	291-306	-	1517	-	-	-	491	433	500
LOI	(%)	29 ² -37 ³	25 ²	<20	-	-	>41	55	29-32	18-21	20-21	20-21

¹ in a matrix structure

² fabric measurement

³ filament yarn measurement

N.B. As these data originate from a variety of sources, they may be subject to deviations resulting from different test methods and/or conditions.

Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura
México 2020

