



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TESIS

**COMPONENTES LIGEROS: PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA DE
CARBÓN EN LA ARQUITECTURA.**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA

ARQ. JUAN MANUEL GARCÍA GARDUÑO

DIRECTOR DE TESIS

M. EN ING. PERLA R. SANTA ANA LOZADA

FACULTAD DE ARQUITECTURA

SÍNODO

**DR. EN ARQ. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ – CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ARQUITECTURA, URBANISMO Y PAISAJE**

DR. MIKHAIL ZOLOTUKHIN X. – INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

DR. EN ARQ. FIDEL SÁNCHEZ B. – FACULTAD DE ARQUITECTURA

MTRO. EN ARQ. LEONARDO ZEEVAERT A. – FACULTAD DE ARQUITECTURA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

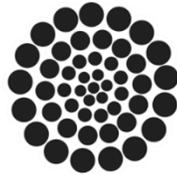
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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.

Agradecimientos:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Al CONACYT por el apoyo y patrocinio para la realización de mi tesis de Maestría.

Universidad Nacional Autónoma de México



A la UNAM por su constante apoyo durante mis estudios de Maestría a través de sus múltiples instancias.

Instituto de Investigaciones en Materiales



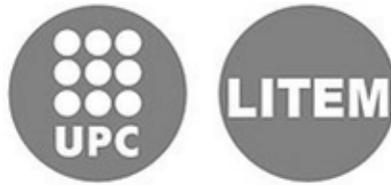
Al IIM por las facilidades para el uso de sus instalaciones, equipos y acervos.

Universidad Politécnica de Cataluña



A la UPC por recibirme y darme apoyo en mi investigación de Maestría.

Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials



Al LITEM por las facilidades para el uso de sus instalaciones, equipos y acervos, al Dr. Christian Escrig por su ayuda e interés en mi tesis. Y en particular al Dr. Eng. Lluís Gil Espert por su constante motivación y apoyo en la realización de esta investigación.

Módulo 3 Materiales + Sistemas

Al Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz, al Mtro. Jorge Rangel Dávalos y al Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez por mostrar interés constante en el desarrollo profesional de sus alumnos.

Sínodo

A mi comité tutor integrado por el Dr. en Arq. Alberto Muciño Vélez, el Ing. Juan Luis Cottier Caviedes, Dr. Mikhail Zolotukhin X, Dr. En Arq. Fidel Sánchez B. y al Mtro. en Arq. Leonardo Zeevaert A. por su atención, apoyo y disposición para trabajar con ellos.

Laboratorio para la Enseñanza de la Edificación Sustentable

Al fondo sectorial CONACYT – SECRETARÍA DE ENERGÍA – SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA con número proyecto 260155 con título “Laboratorio para la Enseñanza de la Edificación Sustentable”.

Director de Tesis

A mi tutora la M. en I. Perla Santa Ana Lozada por su apoyo incondicional, motivación, dirección y supervisión; sin los cuales no sería posible este documento.

Amigos y Familia

A mis amistades por nunca dejarme solo.

A mis padres por nunca dejar de aconsejarme.

I Primera parte

1.0 MATERIALES EN ARQUITECTURA	1
2.0 COMPOSITES EN LA CONSTRUCCIÓN	14
2.1 FIBRA DE VIDRIO	15
2.2 FIBRA DE CARBÓN	16
2.3 FIBRA DE ARAMIDA	19
2.4 COMPOSITES EN LA ARQUITECTURA	20
2.5 MATERIALES EXTRAORDINARIOS	21
3.0 CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES	23
3.1 MATERIALES METÁLICOS	24
3.2 MATERIALES CERÁMICOS	25
3.3 MATERIALES POLIMÉRICOS	26
3.4 ESTRUCTURAS POLIMÉRICAS	29
3.5 CRISTALINIDAD POLIMÉRICA	32
3.6 COMPORTAMIENTO MECÁNICO	33
3.7 PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS	38
3.8 POLÍMEROS REFORZADOS	41
4.0 MATERIALES COMPUESTOS	42
4.1 PARTÍCULAS DE REFUERZO	44
4.2 FIBRAS DE REFUERZO	45
4.3 TEORÍA DE LAS FIBRAS DE REFUERZO	49
4.4 COMPUESTOS ESTRUCTURALES	50
4.5 TERMOPLÁSTICO REFORZADO	53
5.0 PLÁSTICOS DE INGENIERÍA	55
5.1 ABS	56
5.2 PLÁSTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	58

II Segunda parte

6.0 TEJIDOS DE REFUERZO	60
6.1 SECCIONES COMPUESTAS	62
6.2 MATERIALES PROPUESTOS	65
6.3 MANUFACTURA	67
6.4 ABS +FIBRA DE CARBÓN	71
6.5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	84

III Tercera parte

7.0 EVALUACIÓN DEL COMPUESTO	85
7.1 ENSAYO DE TENSIÓN	90
7.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN	104
7.3 ENSAYO DE FLEXIÓN	119
7.4 TASA DE ARDOR Y/O EXTENSIÓN Y TIEMPO DE QUEMADO	133
7.5 ENSAYO DE ADHERENCIA	146
7.6 ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE	160

VI Cuarta parte

8.0 CONCLUSIONES	174
8.1 TRAYECTORIA DE LA INVESTIGACIÓN	175
8.2 CONTRASTE DE PROPIEDADES	181
8.3 ARQUITECTURA Y ESTRUCTURA	188
8.4 TECNOLOGÍA DE MATERIALES	191
REFERENCIAS	193
GLOSARIO	199
UNIDADES DE MEDIDA	200
APÉNDICE A	201
APÉNDICE B	205
APÉNDICE C	209
ANEXO 1	215

Introducción

El uso de materiales compuestos en la Arquitectura contemporánea sólo ha sido considerado para elementos no estructurales o el diseño de geometrías complejas de cubiertas, dejando de lado su potencial para crear nuevos elementos y/o sistemas estructurales. Los materiales compuestos representan lo más avanzado en la ingeniería de materiales hasta nuestros días para distintas industrias, sin embargo el interés de esta investigación recae en los sectores que los utilizan con fines estructurales: la industria aeroespacial y principalmente la de transportes.

De forma general un material compuesto es la combinación de dos o más materiales para obtener propiedades específicas en una aplicación concreta. Se puede estimar que al menos el 90% de los materiales existentes son compuestos en su estructura microscópica, pero la investigación se centra en aquellos en los cuales se pueden distinguir las fases (cada parte que lo compone) y en específico a los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras.

La industria automotriz y la construcción tienen en común el uso de un mismo material compuesto de alto rendimiento: las resinas epóxicas reforzadas con fibras de carbón. En la construcción se utilizan para extender la vida de elementos estructurales; en la manufactura de autos se diseñan partes ligeras para reducir el peso del vehículo. Las fibras de carbón se caracterizan por su elevada resistencia a tensión mientras que las resinas epóxicas por su estabilidad. En la industria automotriz se fabrican componentes utilizando un sistema de laminación con relleno: se coloca una placa de un material ligero no estructural entre dos capas de fibra de carbón y posteriormente se suministra la resina epóxica.

El objetivo de esta investigación es el estudio y la propuesta de un compuesto basado en fibra de carbón con resina epóxica basado en el mismo principio de la industria automotriz, utilizar un material ligero de relleno y reforzarlo con fibra de carbón para obtener un componente estructural ligero y resistente capaz de competir con el acero y el concreto armado en la construcción.

1.0

MATERIALES EN ARQUITECTURA

En arquitectura, se entiende por material de construcción a todos los elementos que integran una edificación; estos materiales son manufacturados a partir de materias primas como carbón, hierro, arcilla, arena (minerales industriales)¹, o a través del moldeo mecánico de rocas y post-cocción a altas temperaturas en el caso de cerámicos² [1]. La industria de la construcción es la principal impulsora para la extracción de estos recursos ya que consume estos insumos en grandes cantidades para la producción de casi todos los materiales para construir: concretos, morteros, pastas, aleaciones metálicas, porcelanatos, granitos, pinturas, plásticos [2]. Y dichos materiales son seleccionados por los diseñadores en función del conocimiento y/o experiencia que tengan de los mismos; y del potencial que representan sus propiedades y características particulares (rigidez, durabilidad, resistencia, conductividad, etc.,) para satisfacer las exigencias de confort, estabilidad, forma, función y normatividad que engloba a un proyecto arquitectónico.

¹ Definición tomada de "Rocas y minerales industriales de Iberoamérica" de Ábrego, Pedro, pág. 20

² Ver capítulo "Materiales pétreos" pág. 17 y capítulo "Materiales cerámicos" pág. 49. Libro: Materiales de construcción para edificación y obra civil datos de Santiago Crespo Escobar.

La industria de la construcción también genera empleo para al menos 190,887 personas en México [3]³ y absorbe la mayor parte de la población no especializada, por lo que se puede definir a la industria de la construcción como un motor de la economía que refleja el nivel tecnológico que ha logrado nuestra nación. Y este motor se encuentra en desarrollo y cambio constante que demanda nuevos materiales y requiere de gran cantidad de energía para mantenerse en funcionamiento [4]. Bajo esta consideración el éxito de una construcción en un lugar y tiempo específico depende en mayor medida de la capacidad de planeación y control de los proyectistas y constructores para hacer el mejor uso de los materiales a su disposición. Sin embargo no se puede considerar a la construcción como un hecho estático, un cambio en la estructura social y económica de un lugar puede determinar la conclusión exitosa o no de un proyecto:

“El cambio es una característica esencial de la vida, la cual, naturalmente, afecta también al proyecto de los edificios para que satisfagan los requisitos concretos de la vida en cada momento que se considere [5]⁴.

Los cambios en los procesos constructivos son constantes y requieren de materiales capaces de soportar demandas mayores de resistencia estructural, química, de temperatura, etc.; que sean fáciles de instalar y de transportar. Ésta evolución constructiva da lugar al surgimiento de **materiales compuestos** que satisfacen dichas demandas de diseño. Un compuesto es la combinación de dos o más materiales y su objetivo es lograr una combinación de propiedades que no presenta ningún material por sí solo e incorporar las mejores características de cada uno de los componentes seleccionados (principio de acción combinada)⁵. Estos elementos representan una nueva generación de materiales excepcionales cuya manufactura se concentra en mejorar propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a altas temperaturas [6]. Un material compuesto común que se utiliza en arquitectura para resolver cuestiones estructurales es el concreto armado el cual considera las propiedades mecánicas de cada material: la resistencia a compresión del concreto, $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, para obras pequeñas [7], y la resistencia a tensión del acero, $f_y =$

³ Tomado de “Resultados de la encuesta nacional de ocupación y empleo. Cifras durante el cuarto trimestre 2015”

⁴ Tomado de “Fundamento” pág. 2, libro “Materiales para la construcción, Volumen 1” de Addleson, Lyall.

⁵ Ver capítulo 16 “Composites” pág. 578, inciso 16.1, libro “Materials Science and Engineering”, Callister, W. D.

2,530kg/cm² (IMCA, 2014); para aplicarlo en cimientos, castillos, columnas, trabes y losas. En un estricto sentido técnico, se puede considerar que al menos del 95% de los materiales que utilizamos en construcción son compuestos ya sea en su estructura microscópica o por mezclas químicas y uniones mecánicas de macrocomponentes. Considerando el desarrollo histórico de la humanidad, cada era se caracteriza por el máximo desarrollo en ingeniería de materiales que tuvo y reflejan el estado del arte en que se situaban, la era de piedra, la era del bronce...

Para el caso de los materiales compuestos o **composites** (refiriéndose a los compuestos en los cuales es posible distinguir las fases que los conforman) representan la ingeniería de materiales más avanzada y adaptable que conoce la humanidad en los últimos cincuenta años. [8], ver figura 1 “evolución de la ingeniería de materiales”⁶.

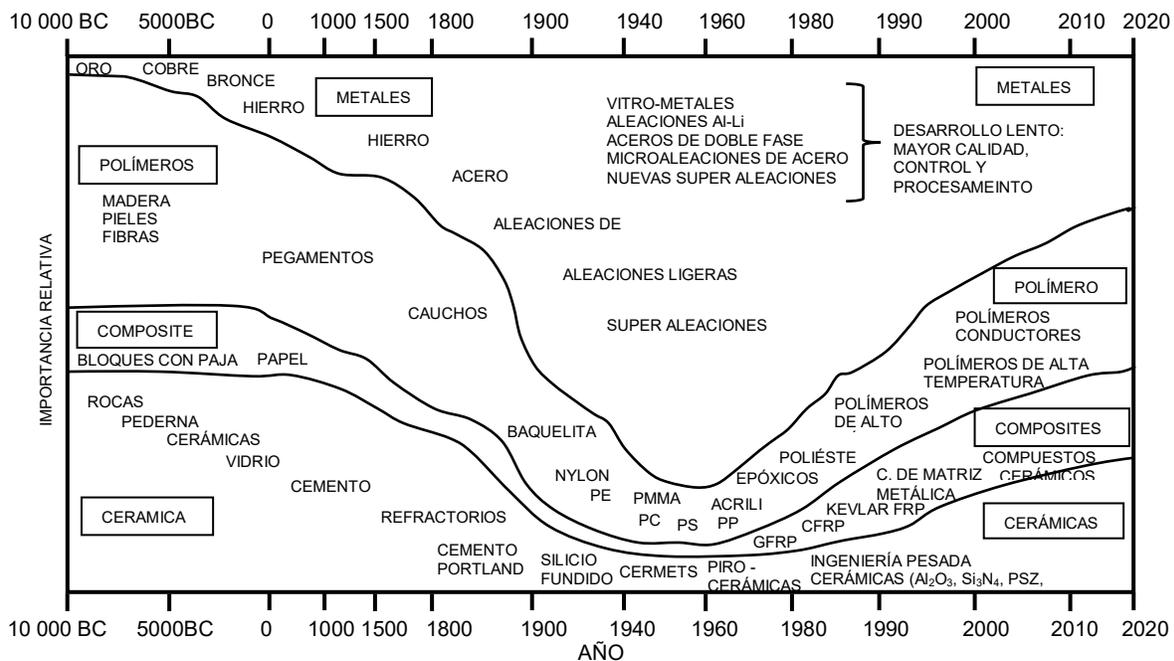
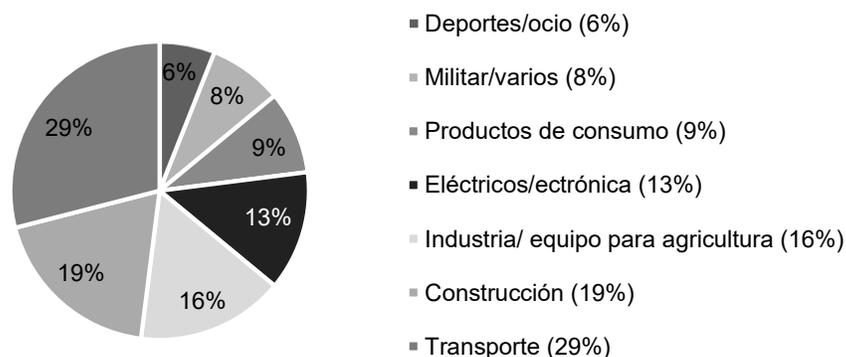


FIGURA 1 – EVOLUCIÓN DE LA INGENIERÍA DE MATERIAES. Figura basada en *Microstructural Design of Fiber Composites*, Capítulo 1.2 [9].

⁶ En la figura 1 se puede observar que los materiales compuestos se originan desde el año 10000 AC, como ejemplo el bloque de arcilla reforzados con paja; aunque falta mencionar el uso de alquitrán con papiro (planta) para la elaboración de botes en Egipto.

Popularmente se considera como un *composite* a los elementos conformados por la combinación de **polímeros de ingeniería y fibras de refuerzo**, en donde los polímeros exhiben características físicas y mecánicas que les permiten desempeñar algunas funciones estructurales y las fibras las amplifican hasta superar a los materiales convencionales. Dichos compuestos fueron hacia la década de los 70's de gran interés para los sectores militar y aeroespacial⁷, y desde entonces ha tenido un elevado crecimiento en la destinación de recursos monetarios para la investigación y desarrollo de **compuestos avanzados** [10] Paralelamente al desarrollo de estos compuestos de alto rendimiento se desarrollaban compuestos de "baja tecnología"⁸ aplicados para la industria eléctrica en la búsqueda de nano-conductores y en la construcción de botes para reducir costos de producción y mantenimiento. Estos compuestos de baja tecnología se convirtieron en materiales comunes en distintas áreas de consumo, para los casos de Estados Unidos y Europa⁹ hacia 1996 los sectores de mayor aplicación fueron el de transportes y el constructor, ver gráficas 1 y 2 [8].

Mercado de composites, Europa 1996



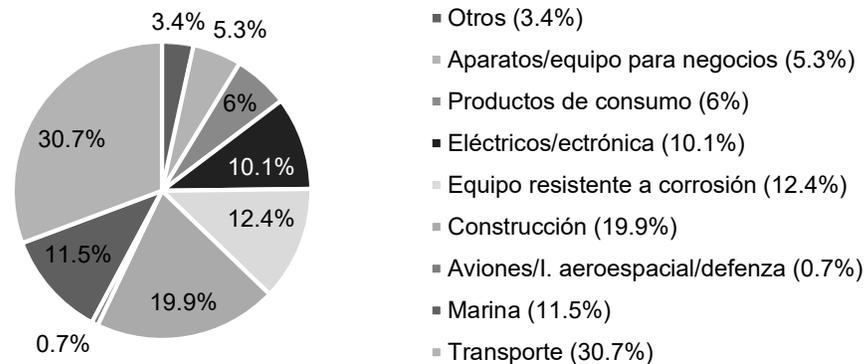
GRÁFICA 1 - MERCADO DE COMPOSITES EN EUROPA 1996. Gráfica basada en el libro *Manufacturing of Polymer Composites*, Åström, B. Tomas, pág 8, "figure 1-4".

⁷ Industrias de Estados Unidos, alusiones que se mencionadas en "*Marine composites*", *Eric Greene Associates*; elaborado con los reportes SSC-360 y SSC-403 del *Ship Structure Committee (SSC)* de la Armada Estadounidense

⁸ Se consideran de baja tecnología porque su manufactura se basa en la reducción de costos respecto de los sectores aeroespacial y militar en los que el costo es irrelevante; ver capítulo 1.4 "*Market*" pág. 7 del libro "*Manufacturing of Polymer Composites*" de Åström, B. Tomas

⁹ Considerando los países miembros de la Unión Europea, nota al pie pág. 8 del libro "*Manufacturing of Polymer Composites*" de Åström, B. Tomas

Mercado de composites EU 1996



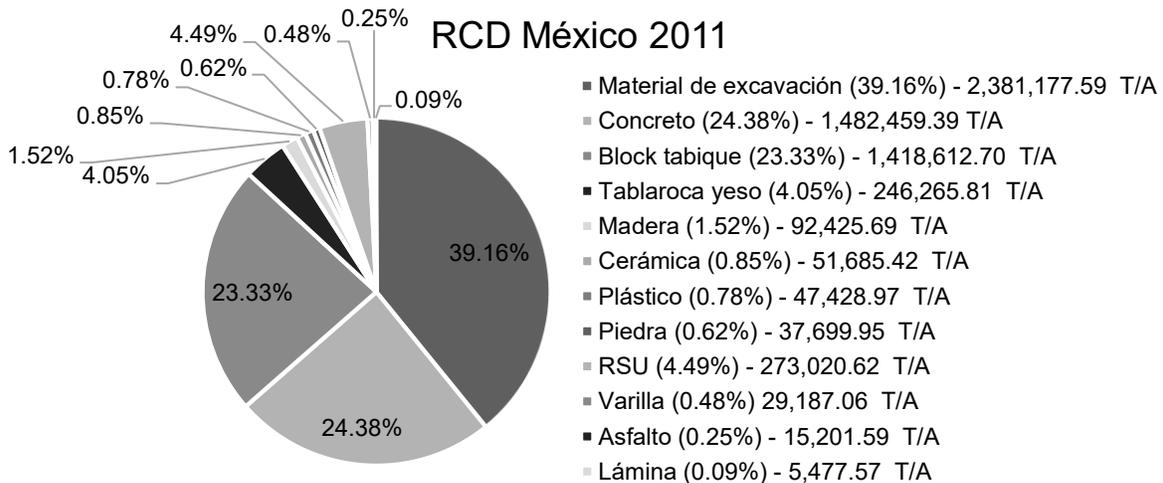
GRÁFICA 2 - MERCADO DE COMPOSITES EN EU 1996. Ídem, pág 9, "figure 1-5".

Los datos de las gráficas 1 y 2 constatan la importancia de los materiales compuestos en los mercados y refiere al sector constructor como uno de los más demandantes de dichos productos a mediados de la década de los 90's, esto debido al ahorro de energía y de materia prima en los procesos de manufactura¹⁰, los cuales se llevan a cabo mediante producción modulada en serie y con maquinaria cuyo desarrollo tecnológico le permite a la industria consumir únicamente los insumos y el material necesario [11]. Estos modelos de producción, transporte e instalación son el resultado del fenómeno irreversible de globalización [12], el cual requiere un nuevo esquema de eficiencia energética y optimización de recursos que aproxime a las ciudades a la sustentabilidad. El "desarrollo sustentable" en México, definido por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) como:

"Proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas." [13]

¹⁰ Como ejemplo de producción de *composites*: Grupo SENER ha llevado a cabo proyectos de alta tecnología en Ingeniería y Construcción en los sectores Aeroespacial, de Infraestructuras y Transporte, Aeronáutica y en Energía y Medio Ambiente.

Dicho proceso se puede beneficiar de estos materiales para alcanzar sus objetivos ya que esta tecnología comprende una serie de ventajas técnicas y procesos que incrementan la vida de elementos estructurales con ahorro significativo de material, provocando la disminución en la generación de los residuos de construcción y demolición (RCD), por lo tanto su utilización podría propiciar un impacto ambiental positivo. Bajo el mismo enfoque se han desarrollado distintas investigaciones para procurar el reciclaje de materiales como los RCD y se ha postulado su aprovechamiento como rellenos de caminos y agregados en nuevas mezclas de cemento [14]. Sin embargo estos planteamientos se encuentran ante dos situaciones que frenan su aplicación total: el primero es la dificultad para obtener una mezcla homogénea entre materiales reciclados y materiales nuevos, condición que produce por lo general una mezcla de baja resistencia (con poca cohesión entre materiales) y susceptible a los cambios climáticos, y la segunda es la cantidad de materiales RCD que se producen la cual supera las expectativas de reciclaje. Tan sólo en 2011 la generación de RCD por obras oficiales y no oficiales¹¹ ascendió a 6'080,637.37 toneladas al año. De este total los residuos más representativos son los pétreos: por excavación 39.16%, de concreto el 24.38% y tabique y/o block 23.33% [15], ver gráfica 3.



GRÁFICA 3 - RCD MÉXICO 2011. Gráfica tomada del Plan nacional de manejo de residuos de la construcción y la demolición 2013 emitido por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

¹¹ Datos extraídos del Plan nacional de manejo de residuos de la construcción y la demolición 2013 emitido por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

Este tipo de residuos está clasificado por la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013¹² [16] como materiales que pueden ser reutilizados como rellenos, niveladores, terraplenes, relleno de cepas, etc. Pero, normalmente estos residuos presentan algún tipo de contaminante químico (aceites, aditivos, pinturas en base plomo) o se encuentran mezclados con plásticos y metales, y requieren manejos especiales antes de concederles un segundo uso [17]; esta condición eleva el costo del reciclaje y los contaminantes no pueden ser separados por completo, razón por la cual perjudican las mezclas con materiales nuevos. No obstante, existen Sitios de Disposición Final en los que se recolecta y da tratamiento a los RDC, sin embargo estos son insuficientes y su infraestructura pobre; y en otros casos son ilícitos (banquetas o terrenos baldíos). Estas acumulaciones quedan a la intemperie generando partículas contaminantes a causa de la erosión del material, filtraciones de lixiviados¹³ al subsuelo y terminan por convertirse en vertederos de basura clandestinos donde prolifera la fauna nociva¹⁴ [18].

Bajo estas observaciones se puede considerar que el reciclaje es una forma de mitigar los trastornos ambientales bajo un enfoque de preservación de recursos naturales: ¿por qué tomar acciones correctivas, si pueden ser preventivas? Si se concentran los esfuerzos en reducir los RDC y considerar la **reutilización** de materiales, en lugar sólo plantear el reciclaje de ellos, sería posible reducir el impacto ambiental negativo de la construcción: para alcanzar esta meta los *composites* son una propuesta alentadora. Aunque está claro que los materiales por si solos no pueden determinar la calidad y cantidad de insumos consumidos durante la ejecución de un proyecto arquitectónico, el problema de raíz se remite a factores inherentes al ejercicio constructivo como el nivel de especialización de los trabajadores o el nivel de control operativo y administrativo de recursos [19].

¹² Tabla incluida en la norma NADF-007-RNAT-2013, página 13: "Cuadro 2. Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reuso."

¹³ Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias tóxicas, definición tomada de la NOM-083-SEMARNAT-003.

¹⁴ Considerando los temas de discusión en conferencia de prensa de la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, en febrero de 2012.

Para la Ciudad de México estos factores son trascendentales y su solución compleja, motivo por el cual esta investigación se concentra en las ventajas técnico-constructivas, estructurales y de **bajo impacto** que ofertan los *composites* a la industria de la construcción; y plantea el ejercicio de la arquitectura mediante la utilización de la tecnología de materiales desde la planeación y el diseño de proyectos [4]. Por ejemplo, el ahorro de energía se refleja desde la capacidad para transportar un volumen mayor de materiales en un solo camión, hasta la obra en dónde sólo se consumen secciones específicamente diseñadas [20], lo que implica un menor uso de herramientas y maquinas, y por lo tanto reduce el consumo de energía eléctrica y combustibles.

Respecto de la calidad de instalación de los compuestos en contraste con la obra civil tradicional, la simplificación en la aplicación de sistemas *composite* les permite a los obreros no requerir capacitación exhaustiva ni equipos complejos de instalación; la mayoría de las estructuras *composite* son utilizadas en obras de ingeniería civil (puentes) y su instalación se basa en un sistema de montaje en el que la mayoría de las fallas se puede detectar y corregir en el instante [21], en las figuras 2 - 5 se presenta un puente de 52 metros de longitud para la autopista M6 en Lancashire, Reino Unido, construido en 2006 con tableros de polímeros reforzados con fibra de vidrio (*GRP*)¹⁵ realizado por la empresa *Fiberline Composites A/S*¹⁶.

Este puente reemplazó a uno cuyo tiempo de vida había expirado a los 40 años y se diseñó para soportar el tráfico de vehículos de 40 toneladas; pese a que los compuestos de **fibra de vidrio** son más costosos que los materiales convencionales, para la Agencia de Autopistas de Reino Unido resultó en un ahorro del tiempo de ejecución, energía y mano de obra. Cabe mencionar que la Agencia de Autopistas instaló equipos de monitoreo electrónicos para la supervisión del comportamiento y desempeño de los *GRP composites*.

¹⁵ *Glass Reinforced Polymers*

¹⁶ Empresa danesa especialista en la manufactura de *composites*.



FIGURA 2 - AUTOPISTA M6 EN LANCASHIRE, REINO UNIDO. Imagen tomada con fines de investigación de Filerline.com; <https://filerline.com/new-grp-bridge-across-uk-motorway>



FIGURA 3 - AUTOPISTA M6 EN LANCASHIRE, REINO UNIDO. Ídem.



FIGURA 4 - AUTOPISTA M6 EN LANCASHIRE, REINO UNIDO. Ídem.



FIGURA 5 - AUTOPISTA M6 EN LANCASHIRE, REINO UNIDO. Ídem.

En Arquitectura, estructuralmente los polímeros no pueden competir con el acero o el concreto en condiciones críticas, pero al igual que en las otras industrias, a través de la combinación con otros polímeros y/o fibras de refuerzo adquieren propiedades que superan incluso a los materiales metálicos y pétreos para la construcción de envolventes con geometrías complejas [22], en la figura 6 y 7 se muestra el Centro Cultural *Heydar Aliyev* terminado de construir en 2012 en Baku, República de Azerbaiyán, por *Zaha Hadid Architects* cuyo revestimiento está realizado por una combinación de concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRC)¹⁷ y paneles de fibra de vidrio reforzando poliéster (GFRP)¹⁸; estos materiales fueron seleccionados por la alta plasticidad del diseño y por responder a las demandas de servicio variadas que ocurren en la zona de transición dónde se localiza el edificio.



FIGURA 6 - CENTRO CULTURAL HEYDAR ALIYEV, REPÚBLICA DE AZERBAIYÁN, ZAHA HADID ARCHITECTS. Imagen tomada con fines de investigación de: <http://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>

¹⁷ Glass Fiber Reinforced Concrete

¹⁸ Glass Fiber Reinforced Polyester



FIGURA 7 - CENTRO CULTURAL HEYDAR ALIYEV, REPÚBLICA DE AZERBAIYÁN, ZAHA HADID ARCHITECS.
Ídem.

En la industria aeroespacial se consideran los polímeros por tres razones esenciales: bajo costo relativo, versatilidad y su ligereza [23]. Los mismos criterios son utilizados por el sector automotriz para el diseño de piezas hasta el punto que ha logrado disminuir el precio de manufactura de *composites* sin poder explotar aun su máximo potencial, a modo de insertarlos dentro de un mercado competitivo que se encuentra al nivel del poder adquisitivo de los habitantes de una ciudad promedio [24]. En arquitectura, por el contrario, se conoce el potencial de los compuestos para proyectos cuya magnitud o complejidad es proporcional al costo de producción de los materiales, sin embargo para proyectos con demandas estructurales menores no es posible integrar *composites* a menos que no exista otra alternativa estructural o de diseño; y para el caso de la autoconstrucción, por una parte son prácticamente inalcanzables y por la otra la falta de conocimiento y confianza en estos materiales provoca rezago de lotes y por ende falta de interés en desarrollar investigaciones para mejorarlos y reducir su costo de producción y adquisición.

Considerando el logro de la industria automotriz, para reducir los insumos y el costo de la manufactura de compuestos, y la experiencia de materiales de este tipo utilizados en Arquitectura e Ingeniería Civil, la presente investigación propone la combinación de uno de los plásticos más utilizados en la industria electrónica y automotriz: **Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)**; con una de las fibras de mejor desempeño en la construcción: **fibras de carbón (FC)**; a través de un **adhesivo epóxico**¹⁹. A lo largo del documento se justifica la selección de materiales y se describen los procesos para lograr el objetivo principal: evaluar las aplicaciones estructurales de un material compuesto (ABS+FC) a través de los resultados de pruebas mecánicas que comprobaran las posibilidades de diseño y refuerzo estructural en el ejercicio de la arquitectura.

Esta investigación se basa en la hipótesis de que si se refuerza una estructura de ABS con capas de fibras de carbón orientadas paralelas al eje y capas orientadas de forma perpendicular, el compuesto superará el umbral de servicio del concreto armado y podrá competir estructuralmente con él; dicho planteamiento considera la **teoría de fibras** y la **teoría laminar**²⁰ de refuerzo para sentar las bases teóricas que describen las capacidades estructurales de los polímeros reforzados que son objeto de estudio.

¹⁹ Polímeros termofijos que endurecen al mezclarse con un agente catalizador y que son utilizados como adhesivos, con buen nivel de trabajo mecánico. Ver capítulo 14 "*Polymer Structures*" pág. 507, inciso 14.9, libro "*Materials Science and Engineering*", Callister, W. D.

²⁰ Teorías que describen el uso de fibras y la unión de paneles o capas de materiales que tienen una alta resistencia orientada para aumentar la resistencia o la rigidez sobre una base de peso (ligereza). Ver capítulo 16 "*Composites*", libro "*Materials Science and Engineering*", Callister, W. D.

2.0

COMPOSITES EN LA CONSTRUCCIÓN

En el primer capítulo describió a un material compuesto como una combinación de propiedades de dos o más componentes para resolver variables específicas de un proyecto. Para el sector constructor los *composites* ofrecen la reducción de cargas de diseño, rigidez específica, resistencia a la corrosión, adaptabilidad y simplificadas técnicas de instalación. En éste capítulo se describen los tipos de *composites* utilizados en la construcción, los cuales se basan en los **tejidos de refuerzo** con una **matriz epóxica** en los casos de armados a modo de barras de refuerzo (fibras de carbón o de aramida), en tiras o mallas (fibras de carbón o de vidrio) y en forma de perfiles, placas o paneles (fibra de vidrio); y como **fibras largas** a modo de agregados en las mezclas de concreto (fibras de vidrio, aramida o polipropileno).

2.1 FIBRA DE VIDRIO

Los compuestos basados en fibras de vidrio y resinas epóxicas son aplicados en sistemas estructurales en la construcción de puentes, como los tableros “DuraSpan”, estos se constituyen por dos capas de mezcla asfáltica en paralelo, unidas mediante perfiles trapezoidales pultrusionados²¹ de fibra de vidrio y resina [25], como se describe en la figura 8.

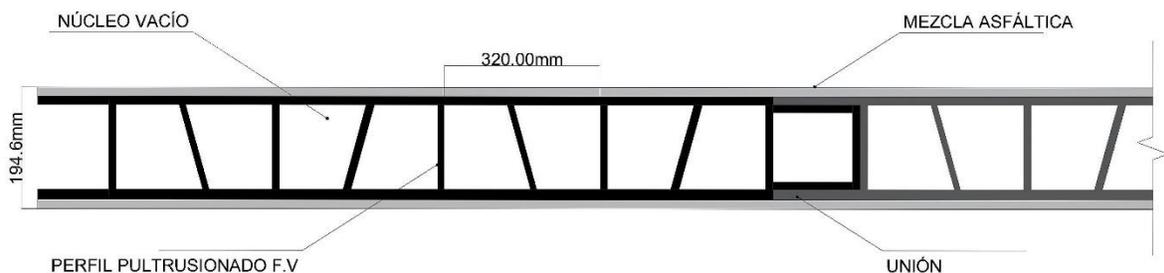


FIGURA 8 - TABLERO DURASPAN. Figura basada en Showcase on Virginia FRP Composites.

Otro tablero utilizado es el sistema “Superdeck” el cual consiste en perfiles pultrusionados de fibra de vidrio con resinas dispuestos en forma de hexágonos y dobles trapecios. Formando una estructura que se monta sobre vigas de acero y posteriormente se coloca la mezcla asfáltica sobre el tablero [26], como se muestra en la figura 9.

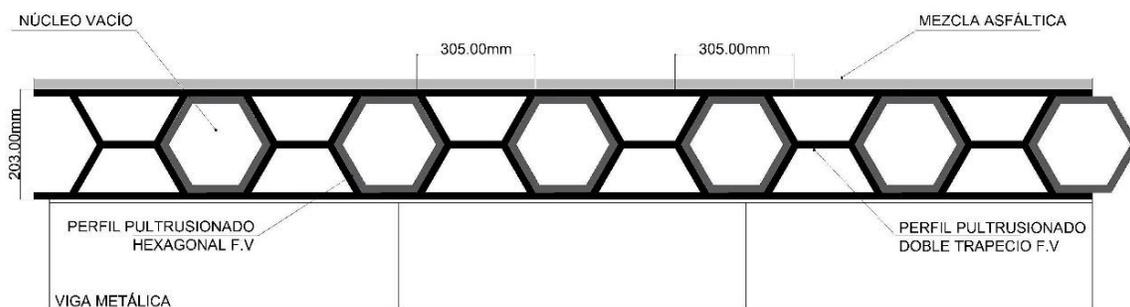


FIGURA 9 - TABLERO SUPERDECK. Figura basada en fichas técnicas de Creative Pultrusions.

²¹ Proceso de conformación de perfiles plásticos termofijos, en el cual la matriz y la fase dispersa son sometidas a un arrastre paralelo continuo [58].

La fibra de vidrio que se utiliza comúnmente se denomina vidrio E, y se utiliza también como agregado en las mezclas de concretos, en longitudes de 12 - 50 mm con el cual se logra un “concreto ligero” y resistente. El producto resultante es el concreto GRC. Sin embargo las propiedades de resistencia de esta mezcla se desvanecen con el tiempo debido a las reacciones expansivas álcali-sílice o álcali-carbonato²². Estas expansiones propician el deterioro de la estructura y la hacen vulnerable a cargas externas. Para minimizar los efectos de éste fenómeno se logró desarrollar una fibra de vidrio con base de circonio, elemento metálico muy resistente a la corrosión y al a temperatura, denominada fibra de vidrio AR (*Alkali Resistant*) [27] la cual mantiene virtualmente las propiedades del vidrio E, con mínimas variaciones. Con esta fibra se logra un *composite* de concreto resistente a las reacciones de expansión, con alta resistencia al impacto, que logra constituir paneles para fachadas de 10-12mm de espesor [28]. Sin embargo no es posible remplazar al acero en una estructura de concreto, puesto que éste material no resiste satisfactoriamente cargas de compresión sin el refuerzo metálico.

2.2 FIBRA DE CARBÓN

En la construcción se utilizan fibras de carbón para la rehabilitación: reparación, reforzamiento y adaptación sísmica de elementos constructivos con deficiencias debidas a su edad, calidad del material o cambio en la distribución de cargas. La fibra de carbón es aplicada en forma de hoja o tiras y adherida mediante resina epóxica la cual transmite los esfuerzos de cortante y/o flexión entre el concreto y el refuerzo [29]. Las formas de refuerzo más comunes son:

²² Lentas reacciones químicas que provocan la expansión del concreto por los componentes del cemento Portland al entrar en contacto con la humedad, y que producen fisuras en la estructura del concreto por el aumento del volumen del mismo. Ver Materiales de Construcción. Vol. 42, n.º 226

- Refuerzo a la flexión: proceso que consiste en pegar láminas de fibra de carbón paralelas a los ejes de vigas y traveses a manera de generar una armadura externa, figura 10.a
- Refuerzo por confinamiento: se utiliza en columnas por su trabajo a compresión. El proceso consiste en utilizar la fibra de carbono en forma de hoja y envolver en su totalidad el elemento para controlar la dilatación transversal de las columnas ante la carga de compresión, figura 10.b
- Refuerzo al cortante: se colocan en el exterior de la estructura a modo de imitar estribos para absorber el esfuerzo cortante, figura 10.c

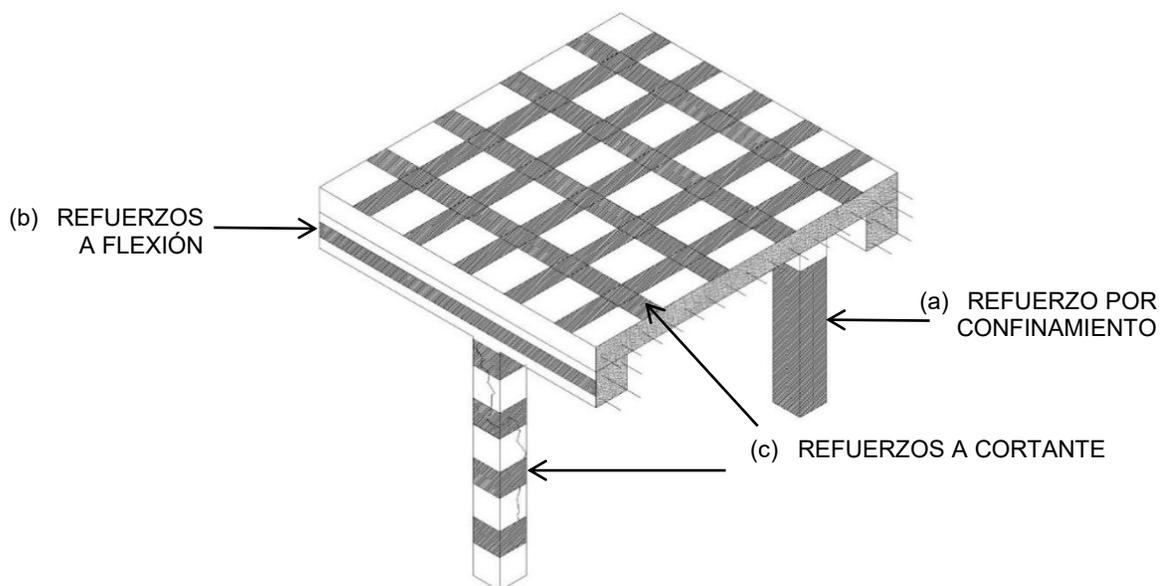


FIGURA 10 - REHABILITACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON FIBRAS DE CARBÓN.

Para la construcción de puentes se utilizan tubos conformados por fibras de carbón con resinas epóxicas los cuales se rellenan de concreto y una vez que éste se endurece son utilizados horizontalmente para apoyar por encima de ellos los tableros que conforman los puentes. Éste sistema se denomina *Composite Shell System (CSS)* [30]. Se ilustra un esquema del sistema CSS y su disposición en la construcción de puentes en la figura 11.

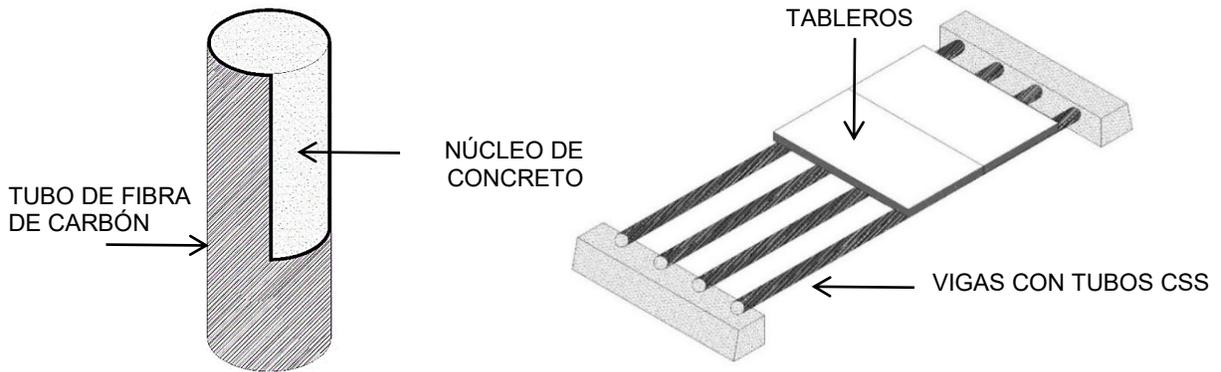


FIGURA 11 - SISTEMA CSS, Figura basada en esquemas de CSS.

Otra presentación utilizada de la fibra de carbón es en forma de barras, las cuales se disponen en red para remplazan a los refuerzos de acero en la producción de paneles prefabricados de concreto para muros y vigas doble T [31]. En la figura 12 se muestran ejemplos de prefabricados reforzados con fibra de carbón.

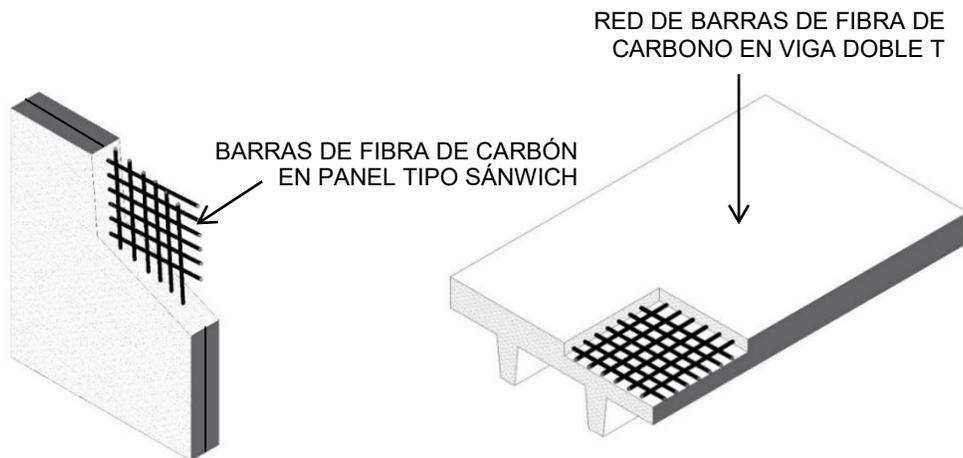


FIGURA12 - SISTEMAS CON BARRAS DE FC. Figura basada en fichas técnicas de Altusprecast.

2.3 FIBRA DE ARAMIDA

Las fibras de aramida son conocidas por su nombre comercial *Kevlar* [32] y su aplicación de refuerzo en la construcción es similar al de la fibra de vidrio y carbón; como agregado en mezclas de concretos, en forma de barras [33] o en forma de tira [34]. La forma de incrementar la resistencia de un concreto con aramida es a través del aumento del porcentaje de fibras, lo cual sólo se puede hacer mediante la modificación de la longitud de las fibras. En lo general, el concreto reforzado con fibras de aramida presenta características muy similares a las del concreto armado, aunque ante pruebas de impacto en una proporción de grosor, las fibras de aramida se vuelven poco eficientes respecto al acero si el volumen de concreto aumenta, por lo tanto su aplicación sería más viable si se requieren estructuras esbeltas [35]. No obstante esta fibra es de uso recurrente para el sector constructor de forma indirecta, ya que con ella se realizan cables, cuerdas, calzado y ropa de protección para trabajadores [32]. En la figura 13 se muestran esquemáticamente elementos de concreto reforzados con fibras de aramida y su comportamiento ante ensayos de impacto.

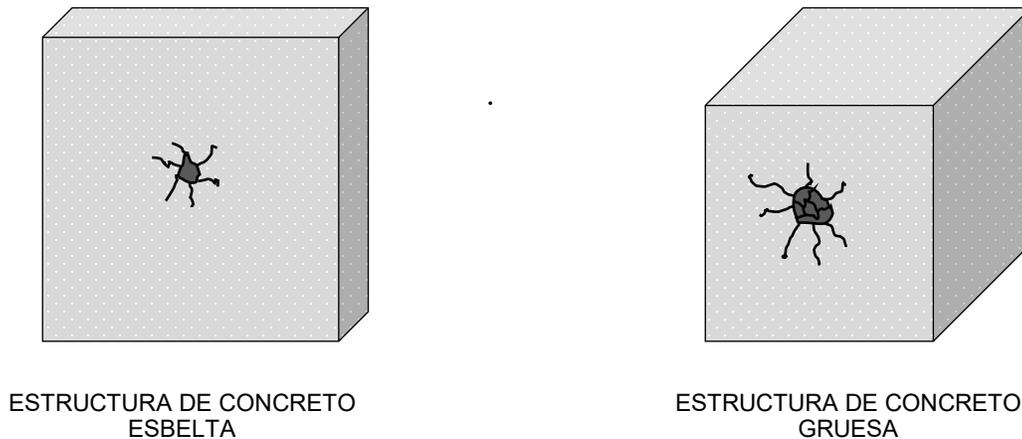


FIGURA13 – RELACIÓN DE GROSOR DE ELEMENTOS DE CONCRETO CON AGREGADO DE FIBRA DE ARAMIDA.

2.4 COMPOSITES EN LA ARQUITECTURA

Como se mencionó en el capítulo uno, los *composites* son materiales extraordinarios cuya manufactura requiere procesos de conformación que representan el uso de maquinaria compleja operada por empleados especializados [36] tanto en la realización de tejidos así como secciones pultrusionadas, por lo cual su adquisición también representa un gasto elevado y de ahí que su uso se concentre en la construcción de puentes. En la tabla 1 se muestran los precios promedio de los materiales para la manufactura de compuestos en el mercado.

Material	Unidad	Densidad	Costo
Tejido plano de fibra de vidrio	m ²	210gr/m ²	\$ 166.44
Tejido unidireccional de fibra de carbón	m ²	200gr/m ²	\$ 875.52
Tejido biaxial 3k de aramida	m ²	320gr/m ²	\$ 993.16
Resina poliéster insaturada	kg	-	\$ 158.68
Resina epoxi + endurecedor	kg	-	\$ 1,059.37

TABLA 1 PRECIO PROMEDIO DE LA FIBRA DE VIDRIO, CARBÓN Y ARAMIDA Tabla elaborada con datos de Resineco.com y Clipcarbono.com considerando el IVA aplicado en España (21%) y utilizando el cambio de divisas al 25 de noviembre de 2016 de BBVA: 1€ = \$22.80.

No obstante, esta investigación es un planteamiento analítico/experimental para un material cuyo procedimiento de conformación reduce la cantidad de insumos en la manufactura de un *composite* para disminuir su costo de adquisición; y paralelamente fomentar el empleo de plásticos reforzados como sistemas estructurales aplicados en la arquitectura, y se basa en el planteamiento de que si se refuerza una sección de plástico ABS con capas de fibras de carbón orientadas de forma paralela y perpendicular al eje, inmersa en una matriz epóxica, entonces el compuesto resultante superará el umbral de servicio del concreto armado y podrá competir estructuralmente con él. Esta hipótesis sugiere que la implementación de este tipo de materiales de bajo impacto en los procesos constructivos, de cualquier proyecto arquitectónico, es una práctica que los dirige hacia el desarrollo sustentable y la eficiencia energética.

2.5 MATERIALES EXTRAORDINARIOS

En correspondencia con los compuestos utilizados en la construcción de puentes y el costo de los materiales, para esta investigación la fibra de carbón y a la resina epóxica son una alternativa positiva si se considera que en la escala de materiales de alto rendimiento, esta combinación se localiza en un punto medio en sus alcances (resistencia y costo). Para la selección del plástico ABS se consideraron tres puntos de clave tomados de la experiencia del sector automotriz y electrónico: abundante uso y bajo costo relativo, eficiencia de trabajo por su resistencia mecánica aceptable y la presencia de un componente común con la fibra de carbón; el bloque acrilonitrilo.

Hasta este punto de la investigación, el concepto de material compuesto o *composite* debe entenderse en un sentido general de sus características y ventajas. Para dar sustento a la propuesta, en los siguientes capítulos se introduce en el diseño y caracterización de materiales (principalmente los polímeros) y materiales compuestos haciendo referencia a su funcionamiento y composición microscópica y su comportamiento mecánico; se explican además las formas de conformación y propiedades de las fibras de refuerzo.

3.0

CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES:

Para emprender la investigación de materiales compuestos se deben abordar los campos de la **Ciencia de Materiales** y de la **Ingeniería de Materiales**. El primer campo es la investigación de las relaciones que existen entre las estructuras y las propiedades de los materiales; el científico de materiales se encarga de desarrollar o sintetizar materiales nuevos. Y el segundo campo se encarga del diseño de la estructura de un material para producir un conjunto predeterminado de propiedades. La combinación de estos dos términos es la pauta para la realización de nuevos componentes de alta tecnología: la **Ciencia e Ingeniería de Materiales** es la disciplina que relaciona conocimientos nuevos con conocimientos aplicados para elaboración de materiales avanzados, los clasifica en función de su estructura y los define en cuatro grupos principales: materiales metálicos, materiales cerámicos, materiales poliméricos y materiales compuestos.

En la figura 14 se muestra el espectro de la Ciencia e Ingeniería de Materiales [37], es decir la combinación de las disciplinas Ciencia de Materiales y de Ingeniería de Materiales para el desarrollo de nuevos componentes avanzados.



FIGURA 14 ESPECTRO DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES. Figura basada en Callister.

Se entiende como estructura de un material a la disposición de sus componentes internos y se puede estudiar como:

- Estructura subatómica: interacción de electrones con sus núcleos.
- Estructura atómica: organización de átomos o moléculas entre sí.
- Estructura microscópica: grupos grandes de átomos.
- Estructura macroscópica: elementos que se pueden ver a simple vista.

Las propiedades de un material son sus características particulares en términos de clase y magnitud de respuesta a un estímulo específico impuesto, que dependen de la forma y tamaño del material. Por lo tanto, los materiales se clasifican según su estructura y propiedades en: metálicos, cerámicos, poliméricos, compuestos y avanzados [6]. Otra subcategoría de clasificación de los materiales se hace a través de su estructura atómica:

- Estructura cristalina: los átomos del material se disponen en un ordenamiento repetitivo en tres dimensiones formando patrones.
- Estructura no cristalina (amorfa): los átomos del material no presentan un ordenamiento sistemático, su estructura es similar a un líquido.
- Estructura semicristalina: esta condición se aplica en los polímeros y en algunas cerámicas ya que sus moléculas son parcialmente cristalinas.

Cada repetición de un patrón se considera una celdilla de unidad. En la figura 15 se muestran las representaciones esquemáticas de estructuras cristalinas, no cristalina y semicristalina.

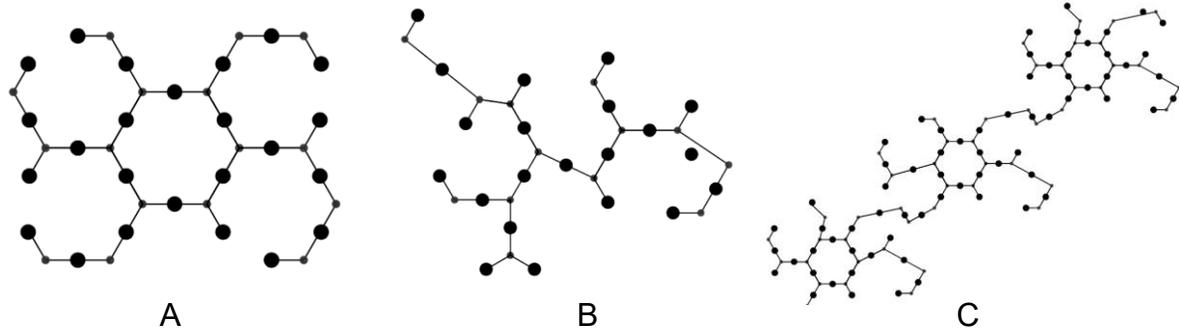


FIGURA 15 - ESTRUCTURA CRISTALINA (A), ESTRUCTURA NO CRISTALINA (B) Y ESTRUCTURA SEMICRISTALINA (C). Ídem.

3.1 MATERIALES METÁLICOS

Son sustancias inorgánicas formadas por uno o varios elementos químicos, cuya disposición de estructura atómica es cristalina. Son en general buenos conductores térmicos y eléctricos, son relativamente densos y rígidos aunque tienen capacidad para experimentar deformaciones sin fracturarse²³. Debido a su versatilidad de diseño y a su maleabilidad²⁴ para trabajarse, los materiales metálicos son utilizados en numerosas industrias; aeronáutica, automotriz, biomédica, electrónica, por nombrar algunas. Los metales y las aleaciones²⁵ se dividen dos grupos [37]:

- aleaciones y metales ferrosos: alto contenido de hierro, como el acero y el hierro fundido.
- aleaciones y metales no ferrosos: porcentaje bajo de hierro o carecen de él, como el aluminio, el cobre o el zinc.

²³ Ésta propiedad se conoce como ductilidad.

²⁴ Propiedad de un material para cambiar su forma permanentemente sin romperse.

²⁵ Una aleación metálica es la unión de dos o más metales o de un metal con un no metal.

3.2 MATERIALES CERÁMICOS

Las cerámicas son compuestos que combinan elementos metálicos entrelazados químicamente con elementos no metálicos como óxidos, nitruros y carburos²⁶. Su estructura atómica puede ser cristalina, no cristalina o semicristalina, presentan alta dureza y buena resistencia a las altas temperaturas, sin embargo dadas estas características tienden a ser frágiles.²⁷; por lo tanto son aislantes eficientes con alta resistencia a la fricción. Según su aplicación en la ingeniería los materiales cerámicos se dividen en dos grupos [37]:

- cerámicos tradicionales; composición básica de arcilla, sílice y feldespato²⁸, como vidrios, ladrillos y azulejos.
- cerámicos de ingeniería: compuestos puros o casi puros como óxido de aluminio, carburo de silicio y nitruro de silicio, empleados en la industria automotriz y electrónica.

3.3 MATERIALES POLIMÉRICOS

Los polímeros son moléculas de gran tamaño que se forman mediante el proceso de polimerización²⁹ de monómeros³⁰, en el cual se forman largas cadenas moleculares químicamente basadas en carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos (en la mayoría de polímeros). Estrictamente su estructura molecular no es cristalina, pero en algunos polímeros se organiza por secciones cristalinas y no cristalinas (estructura semicristalina). La mayoría de los materiales poliméricos poseen bajas densidades y temperaturas de ablandamiento o descomposición relativamente bajas. No son conductores eléctricos pero si buenos aislantes. [37].

²⁶ Compuestos de oxígeno, nitrógeno y carbono, respectivamente, con otros elementos.

²⁷ Que presenta baja o ninguna deformación antes de fracturarse.

²⁸ Minerales primarios abundantes en la corteza terrestre que son componentes de las arenas y los limos.

²⁹ Proceso químico en el que mediante calor, luz o catalizadores; se entrelazan los monómeros para formar cadenas.

³⁰ Moléculas simples

En la industria los polímeros son adaptados para satisfacer requerimientos particulares, en función de sus propiedades y costos de producción; los polímeros se pueden clasificar por las industrias en tres grupos [38]: comerciales, de ingeniería y de alto rendimiento (en la tabla 2 se enlistan los principales polímeros según la clasificación anterior):

- Los polímeros comerciales son ligeros y resistentes a la corrosión, rígidos y con problemas de servicio en altas temperaturas. Sin embargo son económicos de producir y conformables en formas variadas [38].
- Los polímeros de ingeniería están diseñados para tener temperaturas de servicio y resistencia química/mecánica más altas, son producidos en cantidades relativamente pequeñas y su producción es con fines específicos.
- Los polímeros de alto rendimiento, tienen propiedades mecánicas superiores a los otros dos grupos (en algunos casos sus propiedades son superiores a las de materiales metálicos), su costo es muy elevado y se producen para aplicaciones específicas, principalmente para aplicaciones aeroespaciales, deportivas y militares.

Polímeros comerciales	Polímeros de ingeniería	Polímeros de alto rendimiento
Polipropileno (PP)	Policarbonato (PC),	Polieterimida (PEI)
Poliestireno (PS)	Polioximetileno (POM)	Poliimida (PI)
Cloruro de Polivinilo (PVC)	Acilonitrilo Estireno Acrilato (ASA)	Polieteretercetona (PEEK).
Polietileno Tereftalato (PET)		
Botellas, bolsas, tubos	Engranajes, componentes de electrónica	Cuerdas, cascos, blindajes

TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS. Tabla basada en Callister y Askeland.

En la ciencia e ingeniería de materiales los polímeros se clasifican de acuerdo a sus propiedades (mecánicas, estructura molecular, etc.) en dos categorías generales: plásticos y elastómeros. Los **plásticos** son los materiales poliméricos que presentan una estructura física sólida y rígida, capaces de mantener su forma. Los polímeros **elastómeros** son capaces de sufrir grandes deformaciones y recuperar elásticamente su forma original. Los entrecruzamientos que se dan en sus cadenas poliméricas le proporcionan fuerza suficiente para restaurar su forma después de aplicarle una fuerza, los cauchos naturales y sintéticos son ejemplos de estos polímeros. La respuesta de un polímero a las fuerzas mecánicas a temperaturas elevadas se relaciona con su estructura molecular dominante y de acuerdo a su comportamiento en el aumento de temperatura los plásticos se subdividen en dos categorías [6]: termoplásticos y termofijos. En la figura 16 se puede observar la clasificación de polímeros según la Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Los polímeros **termoplásticos** son aquellos que al calentarse se ablandan hasta que finalmente se licuan y posteriormente, al enfriarse se endurecen. Ambos procesos completamente reversibles y repetibles; entre los termoplásticos se encuentran el polietileno tereftalato (PET)³¹. y el poliestireno (PS). Los polímeros **termofijos** son aquellos que se endurecen de forma permanente después de su formación y no se ablandan con el calentamiento. Son más duros que los termoplásticos y presentan una mejor estabilidad dimensional: un ejemplo de plásticos termofijos es la bakelita³². Si un polímero sobrepasa su punto de fusión³³ o su punto de transición vítrea ³⁴ causa el rompimiento de los enlaces de sus cadenas y pasa inmediatamente al proceso de descomposición; en la tabla 3 se muestran algunos de los usos de los tipos de plásticos.

³¹ Polímero utilizado en la fabricación de botellas y envases.

³² Resina sintética utilizada en componentes de electrónicos.

³³ Cambio físico de un estado sólido a uno líquido.

³⁴ Temperatura en la que un polímero adquiere una estructura ahilada o blanda.

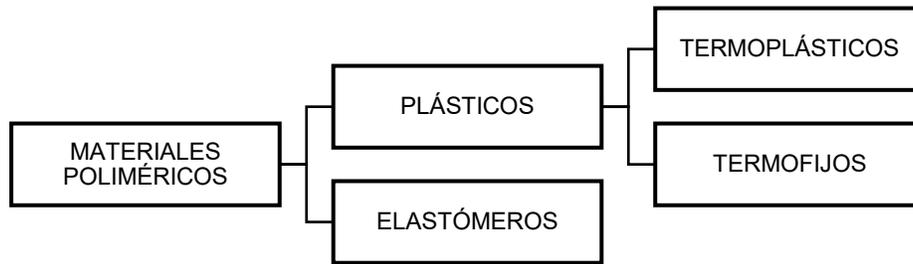


FIGURA 16 - CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS SEGÚN LA CIENCIA E INGENIERÍA. DE MATERIALES. Figura basada en Callister y Askeland.

Termoplásticos	Termofijos
Juguetes	Baquelita
Engranés	Adhesivos epóxicos
Recipientes	Silicones
Mobiliario	Caucho sintético
Tuberías	

TABLA 3 APLICACIONES DE LOS TIPOS DE PLÁSTICOS.

3.4 ESTRUCTURAS POLIMÉRICAS

MOLÉCULAS POLIMÉRICAS

Las moléculas de los polímeros son de gran magnitud, por lo que se les puede denominar macromoléculas; y estas se componen por entidades estructurales denominadas *unidades monoméricas*³⁵, que se repiten sucesivamente a lo largo de la cadena. En la figura 17 se puede ver la representación esquemática del Polietileno (PE) en forma de cadena y su formación por la adhesión secuencial de unidades monoméricas; y en la figura 18 se muestran otras forma de representación con el mismo caso, en las que la literal “*n*” indica el número de veces que se repite la unidad monomérica [6].

³⁵ Conjunto o unidad de moléculas.

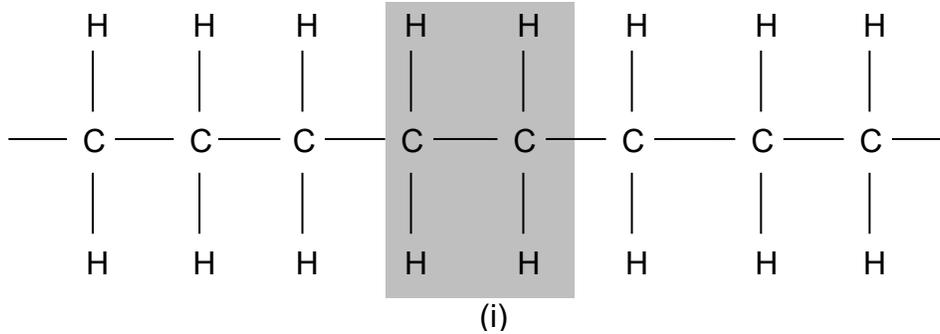


FIGURA 17 – UNIDAD MONOMÉRICA (i) FORMANDO UNA CADENA DE POLIETILENO. Figura basada en Callister.

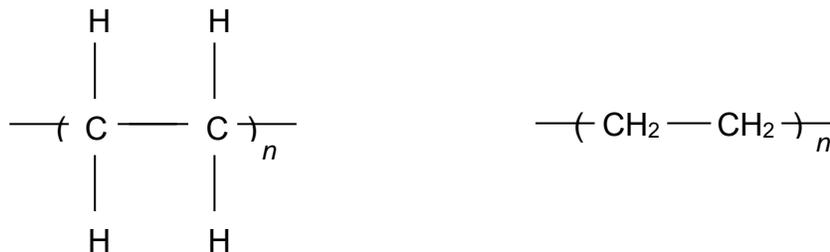


FIGURA 18 – TIPO DE REPRESENTACIÓN DE UNA CADENA POLIMÉRICA. Ídem.

PESO MOLECULAR

Si el polímero tiene cadenas muy largas se puede considerar que tiene un elevado peso molecular y por lo tanto un cierto grado de cristalinidad que influye en la temperatura de fusión, elasticidad³⁶ y resistencia³⁷ del mismo. Sin embargo, las propiedades físicas de los polímeros también dependen de la estructura que forman sus cadenas, de las cuales actualmente es posible tener un mayor control; aunque no es posible clasificar los polímeros en un grupo específico, se dan ramificaciones o entrecruzamientos predominantes que permiten ordenarlos en los grupos [6]:

³⁶ Propiedad de un material para experimentar deformaciones reversibles ante esfuerzos exteriores.

³⁷ Propiedad de un material para soportar esfuerzos sin fracturarse.

- Polímeros lineales: las unidades monoméricas forman largas cadenas sencillas flexibles (figura 19.a)
- Polímeros ramificados: la cadena principal se enlaza lateralmente con otras cadenas, propiciando una disminución en la eficiencia de empaquetamiento³⁸ de las cadenas, lo que conduce a una menor densidad del polímero (figura 19.b),
- Polímeros entrecruzados: hay cadenas lineales unidas entre sí mediante enlaces covalentes³⁹. este proceso se lleva a cabo por síntesis o procesos químicos irreversibles (figura 19.c).
- Polímeros reticulados: se forman cuando los monómeros dan lugar a dos o tres enlaces activos, formando redes tridimensionales. Éste tipo de materiales tienen propiedades mecánicas y térmicas específicas (figura 19.d).

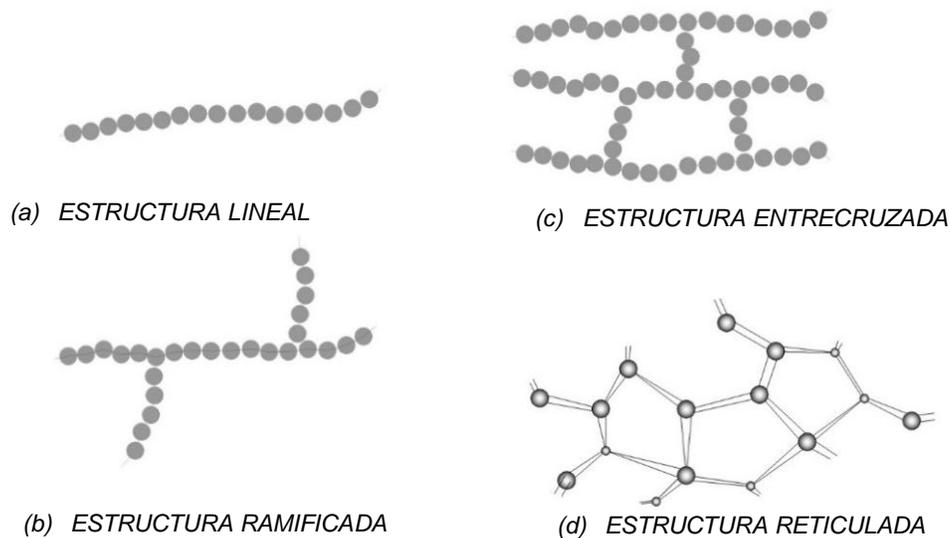


FIGURA 19 - ESTRUCTURAS DE LAS CADENAS POLIMÉRICAS. Ídem.

³⁸ Las cadenas se reordenan y empaquetan durante un proceso de cristalización.

³⁹ Enlace primario resultado de compartir electrones, implica el traslape de orbitales llenos de átomos.

CO-POLÍMEROS

La clasificación anterior solo considera polímeros de una misma unidad monomérica (*homo-polímero*), pero también se pueden realizar mezclas entre distintos polímeros, aunque el termino comúnmente utilizado para estas mezclas no es composito sino co-polímero. Estas aleaciones se realizan con la misma finalidad de los *composites*: incorporar las propiedades de un material a otro. Considerando “A” y “B” como unidades monoméricas, se identifican cuatro tipos de co-polímeros [37]:

- Aleatorio: si las unidades monoméricas están dispuestas aleatoriamente en las cadenas del polímero:

A-A-B-A-B-A-A-B-B-A-B-A-B-A-A-A-B-A-B-A-A-B-A-B...

- Alternante: si las unidades monoméricas muestran definido alterno:

AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB-AB...

- De bloque: si las unidades monoméricas diferentes están dispuestas en bloques relativamente largos:

AAAAAA-BBBBBB-AAAAAA-BBBBBB-AAAAAA-BBBBBB...

- Injertados: si a una cadena larga se le injertan apéndices de otro tipo de unidad monomérica:

AA

B B B B
B B B B
B B B B

En la producción industrial los co-polímeros suelen ser los materiales predominantes debido a que un gran número de productos de uso común (teléfonos celulares, computadoras, electrodomésticos, productos de higiene personal, etc.) encabezan la demanda de plásticos y sólo es posible satisfacerla mediante el diseño de aleaciones de plástico con distintos umbrales de servicio.

3.5 CRISTALINIDAD POLIMÉRICA

La cristalinidad polimérica [37] es el empaquetamiento⁴⁰ de cadenas moleculares en un arreglo estereorregular⁴¹ con un alto grado de solidez, es decir que hace referencia a la dureza que puede alcanzar un plástico. La cristalinidad en materiales poliméricos nunca es de 100%, varía desde el estado completamente amorfo hasta el estado completamente cristalino (hasta ~95%). El grado de cristalinidad que un polímero puede alcanzar depende de la velocidad con la que se enfría durante su solidificación, de la configuración de sus cadenas en la polimerización y de su peso molecular. El estado cristalino se favorece en materiales poliméricos cuyas cadenas de polímero son simétricas.

3.6 COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Debido a la similitud de algunas características en los polímeros y con los metales, las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican siguiendo algunos de los parámetros que se utilizan para los materiales metálicos [6]: módulo de elasticidad⁴², fluencia, ductilidad y resistencia a la tensión. En los materiales poliméricos se observan tres tipos de comportamiento esfuerzo-deformación:

- material frágil, que se rompe mientras se deforma, figura 20.a,
- material plástico, con un comportamiento parecido al de los metales; muestra deformación elástica, límite proporcional⁴³ y deformación plástica, figura 20.b
- material elástico, deformación totalmente elástica, figura 20.c

⁴⁰ Las cadenas se reordenan y empaquetan durante el proceso de cristalización.

⁴¹ En un solo eje de un plano tridimensional

⁴² Relación del cambio de esfuerzo al cambio correspondiente de la deformación: Módulo de Young.

⁴³ Punto de la curva esfuerzo – deformación en donde empieza a desviarse de la linealidad.

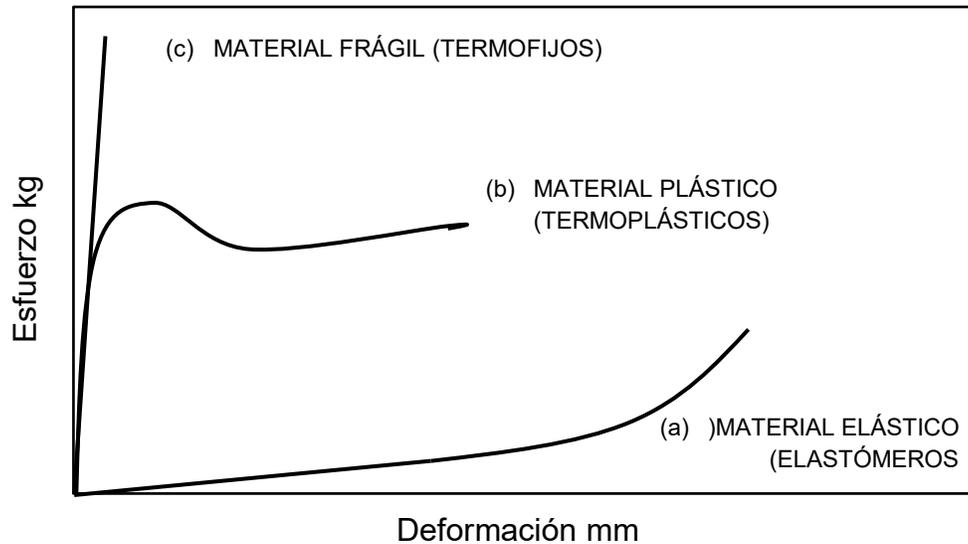


FIGURA 20 - COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE POLÍMEROS. Ídem.

El módulo de elasticidad y la ductilidad de un polímero se determinan de la misma forma que en los metales [6]; en las ecuaciones 1 y 2 se muestran las expresiones matemáticas respectivamente. La ductilidad depende del *porcentaje de elongación*: un material se considera dúctil si este porcentaje es mayor a 5.0%, si es menor a dicho valor se considera un material frágil [39].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad [1]$$

E= MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/m²)
 σ = ESFUERZO UNITARIO (N/m²)
 ϵ = DEFORMACIÓN UNITARIA (m/m)

ECUACIÓN 1 EXPRESIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DEL MÓDULO DE YOUNG. Ecuación tomada de Hibbeler.

$$\% \text{ de elongación} = \frac{L_f - L_0}{L_0} (100\%) \quad [2]$$

L_f = LONGITUD DE FRACTURA (mm)
 L_0 = LONGITUD CALIBRADA ORIGINAL (mm)

ECUACIÓN 2 EXPRESIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ELONGACIÓN. Ídem.

En los polímeros plásticos, al igual que en los metales, se considera como punto de fluencia al punto máximo de la curva esfuerzo-deformación: el esfuerzo en este punto es el límite elástico⁴⁴ [40], en la figura 21 se muestra una comparación de graficas esfuerzo-deformación entre polietileno de alta densidad (HDPE) [41] y acero A-36 [6] y en la tabla 4 se muestran sus propiedades mecánicas.

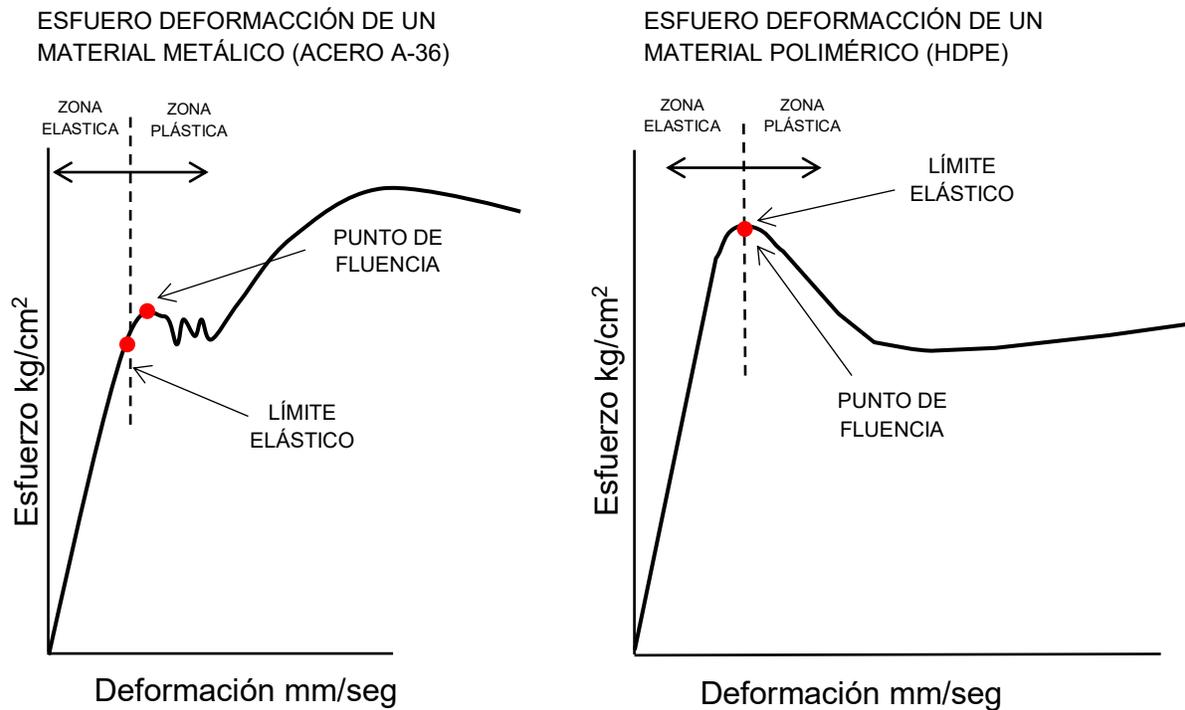


FIGURA 21 - COMPARACIÓN DEFORMACIONES EN MATERIALES. Figura basada en Callister y UPV.es.

Material	Módulo de elasticidad	Límite elástico	Resistencia a la tensión	Alargamiento plástico
HDPE	1.08GPa	(26.2-33.1MPa)	(22.1-31.0MPa)	10-1,200%
	1,102kg/cm ²	297kg/cm ²	266kg/cm ²	
Acero A-36	207GPa	(220-250MPa)	(400-500MPa)	23%
	211,224kg/cm ²	2,398kg/cm ²	4,592kg/cm ²	

TABLA 4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO A-36 Y EL HDPE. Tabla realizada con datos de Callister y UPV.es.

⁴⁴ Esfuerzo correspondiente al punto de fluencia, determinado de la intersección de una línea recta, paralela a la región elástica, con la curva esfuerzo – deformación a medida que se inclina hacia la región plástica.

En la figura 21 se observa el comportamiento mecánico a tensión de dos materiales: el acero A-36 (izquierda) presenta un comportamiento dúctil menor en contraste con el del HDPE (derecha). Mecánicamente ambos son distintos, como se puede constatar con los datos de la tabla 4, por lo que el contraste entre gráficas es sólo para exponer la alta ductilidad que poseen los polímeros. Esta propiedad en particular se ve favorecida con los aumentos de temperatura, mientras que el módulo de elasticidad y la resistencia a tensión se perjudican si la temperatura se eleva [6]. En la figura 22 se muestra la influencia de la temperatura en la deformación de un polímero durante la aplicación de una carga.

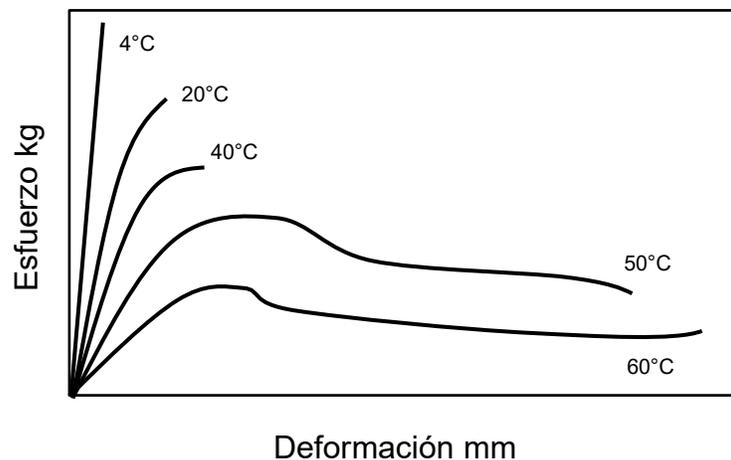


FIGURA 22 - EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA DEFORMACIÓN DE UN POLÍMERO. Figura basada en Callister.

DEFORMACIÓN MACROSCÓPICA

Cuando una probeta de material polimérico alcanza el límite elástico se forma una estricción⁴⁵ o un punto en el que las cadenas del polímero se alinean de forma paralela a la dirección del alargamiento, lo que conduce al aumento local de la resistencia a la deformación y produce un alargamiento por la propagación de la estricción a lo largo de la longitud del espécimen [6] [38].

⁴⁵ Adelgazamiento limitado a un área de una barra metálica sometida a esfuerzos de tensión, en la que se produce la rotura.

En la figura 23 se muestra la comparación en la macro-deformación entre un material polimérico y uno metálico, y en la figura 24 se ilustra la orientación que sufren las cadenas poliméricas en el punto de estricción durante la aplicación de una carga a tensión.

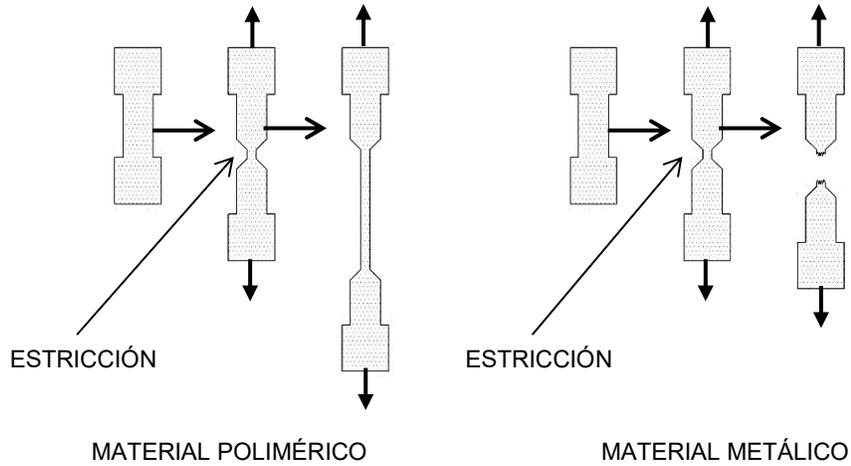


FIGURA 23 - PROBETA DE MATERIAL POLIMÉRICO BAJO ESFUERZO DE TENSIÓN. Figura basa en Callister y Askeland.

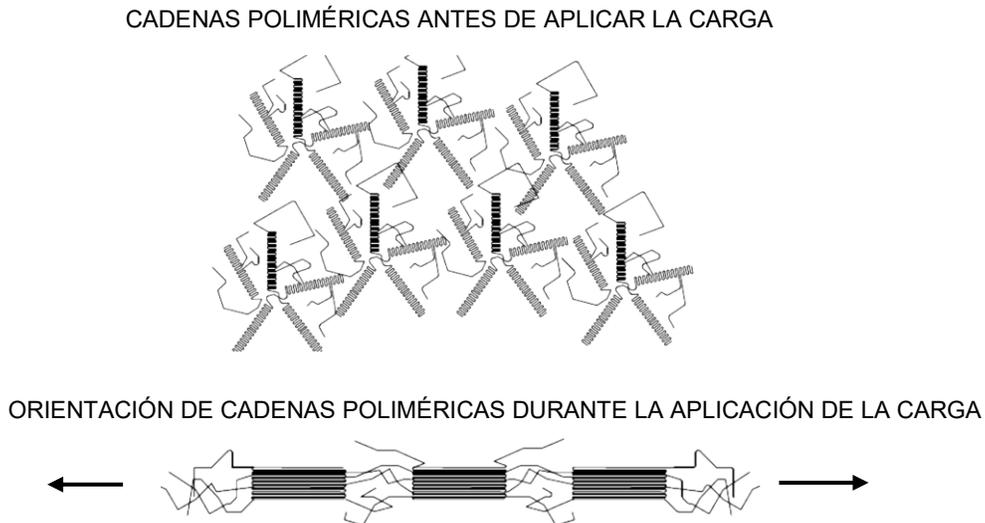


FIGURA 24 - ORIENTACIÓN DE CADENAS POLIMÉRICAS DURANTE UN ESFUERZO DE TENSIÓN. Ídem.

FRACTURA DE POLÍMEROS POR ESFUERZO

Los polímeros termofijos se fracturan principalmente de forma frágil: las grietas se forman en donde existe una concentración localizada de esfuerzos (estrías, fisuras y muescas; el esfuerzo se amplifica en la punta de la grieta y propaga las fisuras hasta la rotura. Los polímeros termoplásticos, por otra parte, pueden presentar fractura frágil o dúctil: si la fractura se da por debajo de su temperatura de transición vítrea, es frágil; pero si se da por arriba de su temperatura de transición vítrea entonces es dúctil [37] [6].

FATIGA

La fatiga⁴⁶ ocurre a niveles de esfuerzo bajos en contraste con el límite elástico. Someter materiales poliméricos a regímenes cíclicos a altas frecuencias o a esfuerzos grandes, podría conducir al calentamiento localizado, es decir una falla por reblandecimiento de material más que aun proceso de fatiga [6].

3.7 PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS

El moldeo es el proceso más común de conformación de materiales poliméricos, principalmente termoplásticos. Este proceso se puede llevar a cabo mediante tres técnicas principales: **extrusión**, **inyección** y **soplado**. En dichos procesos se requiere de calentar el material hasta lograr que se funda y después, mediante la aplicación de presión forjarlos dentro de un molde [38]. El proceso de conformación depende del tipo de material, de su temperatura de fusión (T_m) o temperatura de transición vítrea (T_g), la estabilidad atmosférica, geometría y estabilidad del producto terminado [6]. Posterior a la preparación del producto y antes de procesarlo, se le pueden agregar aditivos contra rayos UV, plastificantes o ignífugos. Después, se debe ajustar el tamaño del material para procesarse, la forma más común es en pellets⁴⁷, cuyo tamaño oscila entre las 3 – 5mm; este tamaño permite fundir el material en menor tiempo [42].

⁴⁶ Fractura progresiva, producida cuando un elemento está sometido a un esfuerzo cíclico.

⁴⁷ Pequeñas porciones comprimidas o aglomeradas de un material.

MOLDEO POR EXTRUSIÓN

Es la técnica que se utiliza para procesos continuos, como la producción de tuberías y perfiles. El polímero se coloca en un extrusor que lo empuja a lo largo de un cilindro mediante un tornillo que propulsa el material a través de regiones que van aumentando la presión y la temperatura hasta que logran fundirlo. El material es expulsado del cilindro y se le fuerza a pasar a través de un “dado”, en la boquilla del cilindro, con un orificio que tiene la forma final del material [42] [43]. El material es enfriado mientras es expulsado, en la figura 25 se ilustra la técnica de moldeo por extrusión.

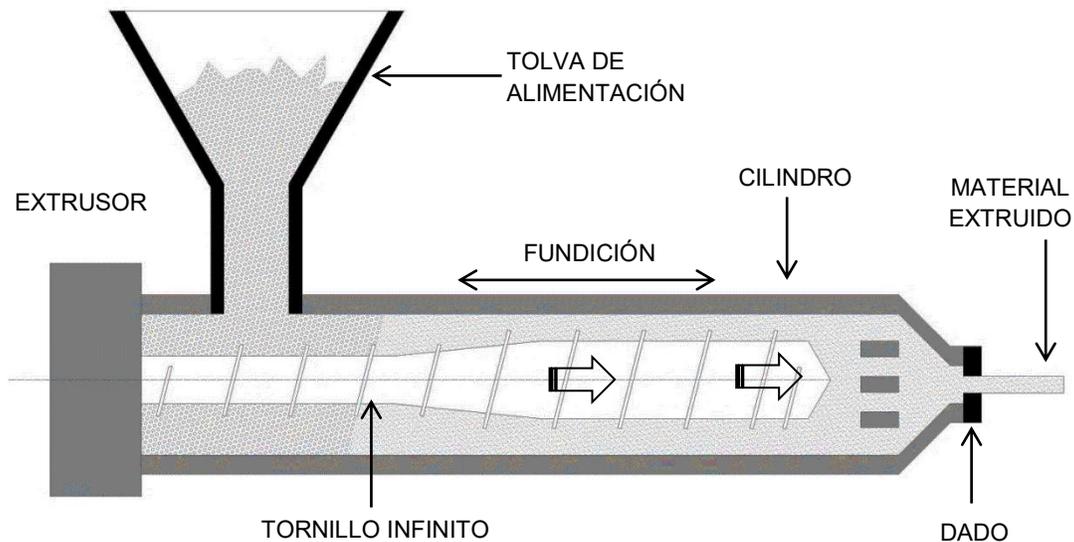


FIGURA 25 - MOLDEO POR EXTRUSIÓN. Figura basada en Morton y Virgil.

MOLDEO POR INYECCIÓN

La técnica de moldeo por inyección se utiliza para procesos periódicos; es precedida por la de extrusión y el desarrollo del procedimiento es virtualmente el mismo hasta expulsión del material. En esta sección se coloca un molde después del dado, en el cual se inyecta el material fundido y se le aplica presión, se enfría por medios mecánicos, se retira el molde y se retira la pieza conformada [42] [43]. En la figura 26 se ilustra la técnica de moldeo por inyección.

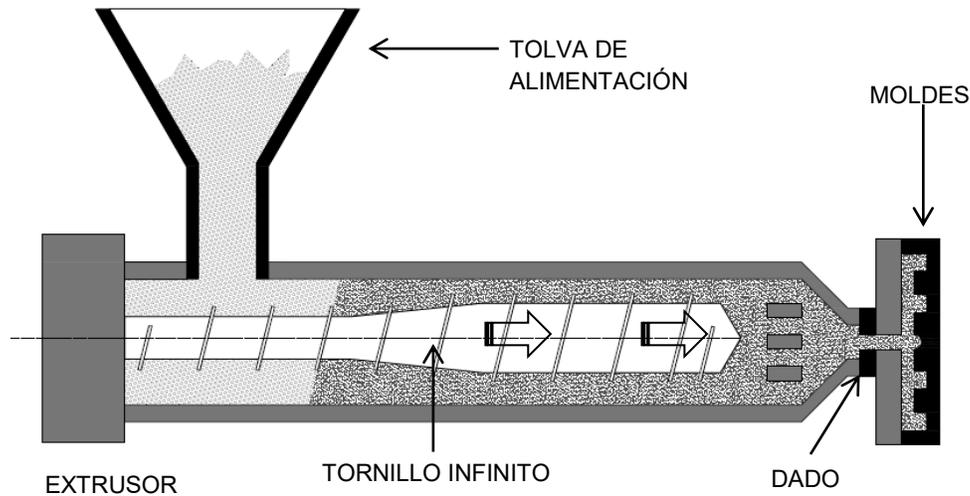


FIGURA 26 - MOLDEO POR INYECCIÓN. Ídem.

MOLDEO POR SOPLADO

La técnica de moldeo por soplado requiere de una preforma⁴⁸ de material plástico, la cual se coloca en el cabezal de soplado y queda pendiendo hacia abajo; posteriormente se coloca el molde de la forma final de modo que este lo selle por debajo. A continuación el cabezal inyecta aire, mientras la preforma aún se encuentra a temperatura de moldeo. El aire genera presión que empuja al polímero hasta que este choca contra las paredes del molde y configura la apariencia según el molde; inmediatamente después adaptar la preforma al molde, se hace circular aire para enfriar la forma final, sin retirar la presión del aire. Una vez que la pieza se ha enfriado se retira el cabezal, se abre el molde y se retira la pieza [42] [43]. En la figura 27 se ilustra la técnica de moldeo por soplado.

⁴⁸ Pieza previamente conformada por un proceso de inyección y tiene una forma tubular.

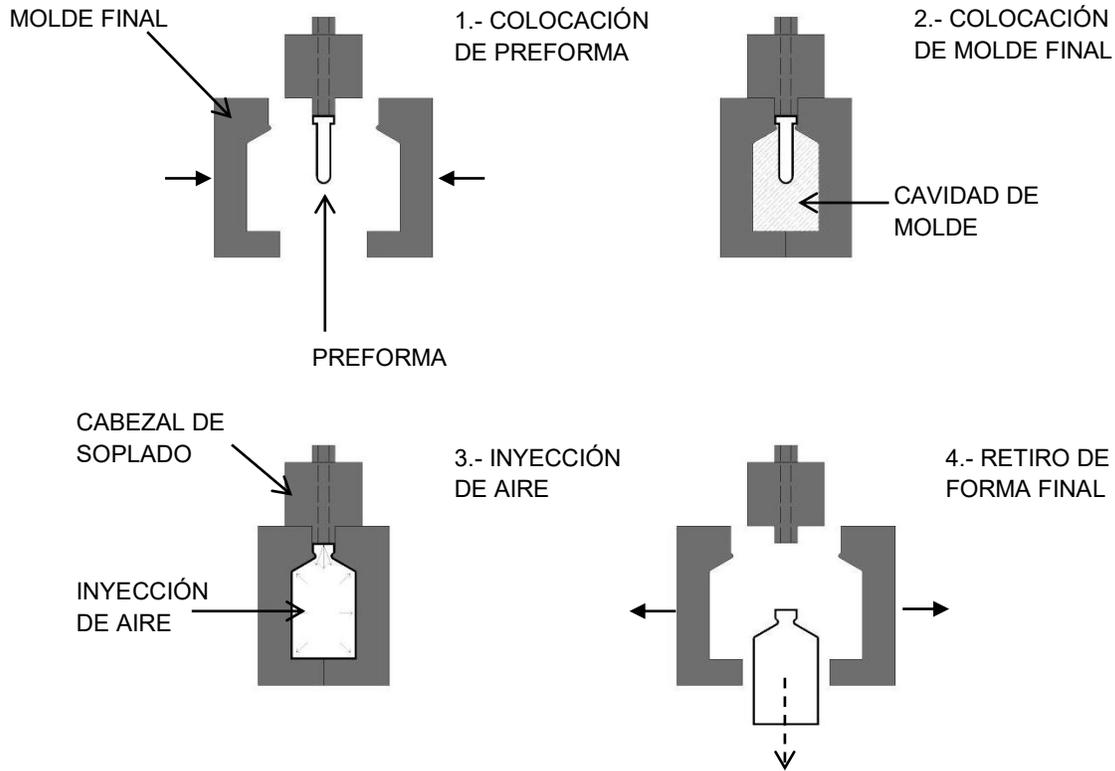


FIGURA 27 - MOLDEO POR SOPLADO. Ídem.

3.8 POLÍMEROS REFORZADOS

Con base en los apartados anteriores, se puede puntualizar que las propiedades sobresalientes de los materiales poliméricos son su maleabilidad, ductilidad y bajo peso, además de utilizarse de forma masiva en prácticamente todas las industrias para la manufactura de productos de uso diario. Para que estos materiales puedan ser utilizados en Arquitectura a modo de estructuras, es necesario dotarlos con propiedades como tenacidad o mejorar las que son inherentes a su composición (resistencia, elasticidad). En el siguiente capítulo se describen los tipos y formas de configurar y producir materiales compuestos con fibras de refuerzo.

4.0

MATERIALES COMPUESTOS

Con frecuencia los materiales compuestos están formados por dos fases, la **matriz** y de la **fase dispersa**. Las propiedades particulares de cada material, la cantidad, la geometría o la compatibilidad de la fase dispersa determina y condiciona el comportamiento estructural y mecánico de un *composite*; [6]. La matriz, o fase continua, es aquella en la que el refuerzo, o fase dispersa, queda incrustada y cuyas principales funciones son transmitir los esfuerzos hasta la fase dispersa y brindar protección y cohesión al refuerzo. La matriz mantiene las fibras de refuerzo unidas, ordenadas y alineadas, y también se encarga de darle el acabado superficial al compuesto [44]. La fase dispersa es aquella que se agrega a la matriz para adjudicarle propiedades que esta no posee. En general se agregan los refuerzos para incrementar la resistencia a tensión o compresión; o mejorar el comportamiento de la matriz ante altas temperaturas y/o corrosión.

La fase dispersa puede agregarse en forma de partículas o fibras [45], en la figura 28 se muestra un esquema de conformación de *composites* y las variables que los condicionan; en la figura 29 se muestra el esquema de clasificación de los materiales compuestos [6].

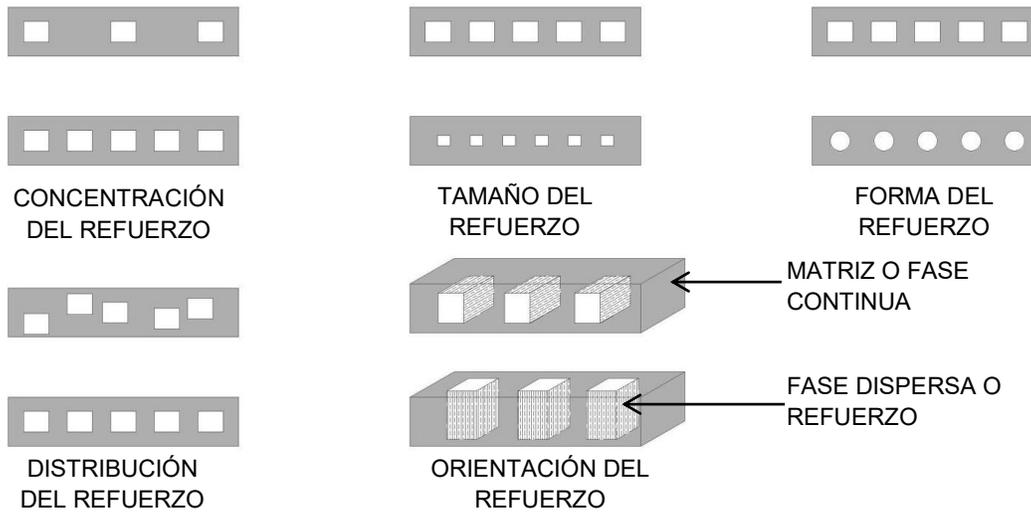


FIGURA 28 CONFORMACIÓN DE COMPOSITES Y SUS VARIABLES. Figura basada en Callister y Askeland.

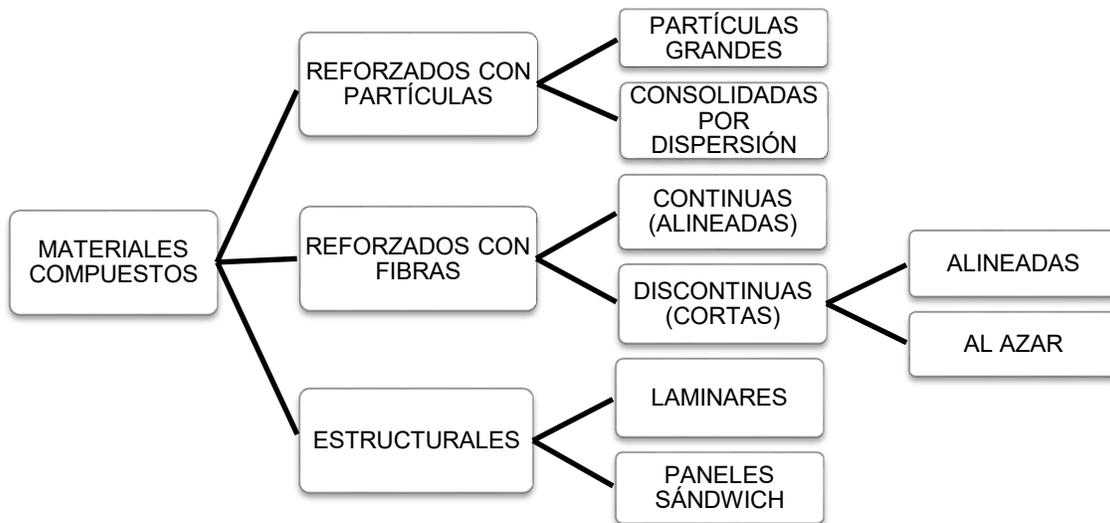


FIGURA 29 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS. Figura basada en Callister.

4.1 PARTÍCULAS DE REFUERZO

En materiales reforzados con partículas, estas presentan una buena distribución en la matriz, son equiaxiales⁴⁹; en la mayoría de los casos de refuerzo con partículas grandes⁵⁰, los refuerzos son mucho más duros y rígidos que la matriz y restringen el movimiento de esta en las proximidades de cada partícula. Para el caso de los refuerzos por dispersión, las interacciones que dan lugar a la consolidación entre matriz y fase dispersa se llevan a cabo a nivel atómico; en esta relación la matriz es la que soporta la mayor parte del esfuerzo aplicado y las partículas dispersas restringen la deformación plástica. El grado de refuerzo depende de la fuerza del enlace entre fases [6], en la figura 30 se muestra el esquema del refuerzo de una matriz con partículas.

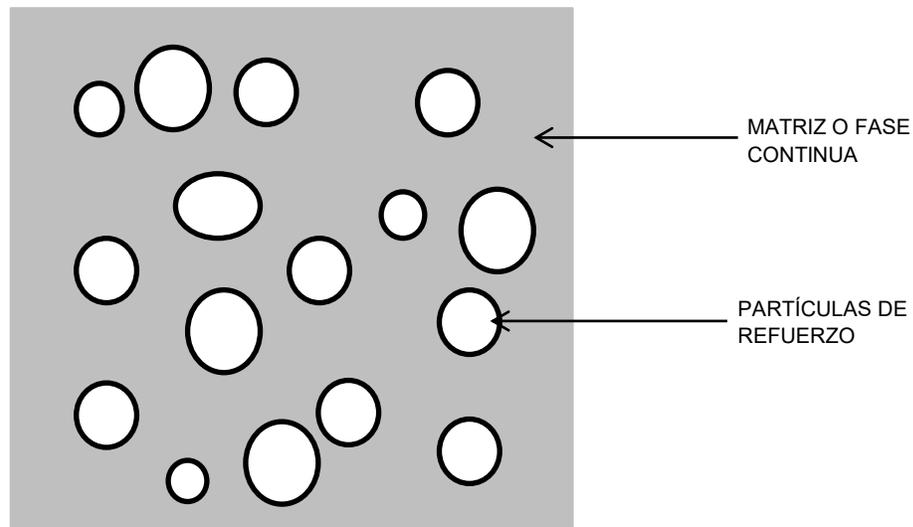


FIGURA 30 - ESQUEMA DE REFUERZO CON PARTÍCULAS. Ídem.

⁴⁹ Las dimensiones de las partículas son aproximadamente las mismas en todas direcciones.

⁵⁰ El adjetivo "grande" hace referencia a las dimensiones del agregado respecto de la matriz, ya que usualmente se trabajan a un grado macroscópico

4.2 FIBRAS DE REFUERZO

FIBRA DE VIDRIO

Las fibras de vidrio están conformadas por silicatos⁵¹ (SiO_2) no cristalinos que contienen otros óxidos (Na_2O , CaO , Al_2O_3 , B_2O_3 , 4MgO); son trefiladas⁵² en filamentos de entre $3\text{-}20\mu\text{m}$ entrelazados que forman una malla [6] [46], comercialmente conocidas como vidrio E, S, C, M, A, D, por citar algunos, de los cuales el vidrio E es el más común para la manufactura de *composites* estructurales [47] (pultrusionados) y el vidrio AR para mezclas de concretos⁵³. El proceso de conformación se lleva a cabo calentando los silicatos en combinación con los óxidos hasta alcanzar el punto de fusión, la mezcla resultante se enfría inmediatamente para evitar cristalización y las fibras se forman por el proceso conocido como *fiberization*.⁵⁴ Casi todas las fibras de vidrio continuas son conformadas por extrusión [47]. En la figura 31 se ilustra la estructura química típica de la fibra de vidrio y en la tabla 5 muestra la comparación de propiedades mecánicas entre Vidrio E y Vidrio AR.

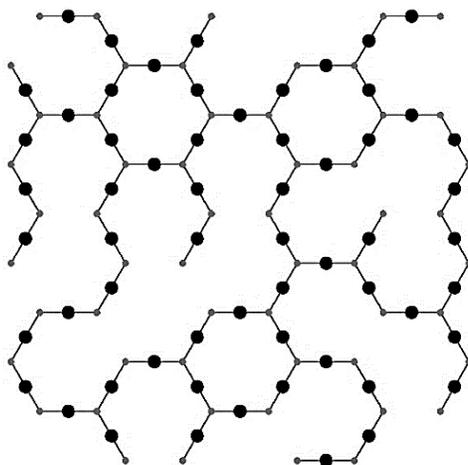


FIGURA 31 - ESTRUCTURA DE TÍPICA DE UNA FIBRA DE VIDRIO. Figura basada en Hull.

⁵¹ Minerales que forman las rocas, compuestos por silicio y oxígeno.

⁵² Reducción progresiva de la sección de un material

⁵³ Ver página 16, capítulo "2.1 Fibra de Vidrio", de este documento.

⁵⁴ En español literalmente: "formación de fibras"

Fibra	Módulo de elasticidad	Resistencia a la tensión	Esfuerzo resistente a la rotura	Densidad
Vidrio E	(75GPa) 765,306kg/cm ²	(3,600MPa) 36,734kg/cm ²	4.5%	2.60g/cm ³
Vidrio AR	(70GPa) 714,285kg/cm ²	(3,600MPa) 36,734kg/cm ²	4.3%	2.68g/cm ³

TABLA 5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS DE VIDRIO. Tabla basada en datos de Águila Higuero y Manoochehr [48]

FIBRA DE CARBÓN

Son fibras de alto rendimiento con diámetros que van de los 4µm a los 10µm, fabricadas a partir de tres materiales base mediante un proceso de a en donde se le agrega un catalizador, los precursores utilizados son Rayón⁵⁵, Poliacrilonitrilo⁵⁶ (PAN) y alquitrán⁵⁷ [6]. Posterior a la carbonización las hebras de carbón son entrelazadas hasta formar una malla, dispuestos de forma similar a la fibra de vidrio. Las propiedades de las fibras de carbón dependen de la técnica de procesamiento y estas a su vez del precursor, en la tabla 6 se muestran las características según su componente. El PAN es la base más apropiada para la manufactura, debido a la relación costo/beneficio del producto final; su composición química es próxima al 55% de contenido de carbón [49]. Las fibras de carbón comerciales se identifican por códigos: HS (*High Strength*), HM (*High Modulus*) y UHM (*Ultra High Modulus*) [29].

Fibra a base de	Módulo de elasticidad	Resistencia a la tensión	Densidad
Rayón	(38GPa) 38,775.5kg/cm ²	(740MPa) 7,551kg/cm ²	1,400 kg/m ³
PAN	(314GPa) 320,408.16kg/cm ²	(3,600MPa) 36,734.7kg/cm ²	1,810 kg/m ³
Alquitrán	(571GPa) 571,428.57kg/cm ²	(2,700MPa) 27,551kg/cm ²	2,050 kg/m ³

TABLA 6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBÓN SEGÚN EL PRECURSOR. Tabla basada en datos de DuratiNet.

La estructura atómica de la fibra de carbón consiste en láminas de átomos de carbón dispuestos conforme un patrón hexagonal regular, como se muestra en la figura

⁵⁵ Fibras artificiales producidas a partir de celulosa.

⁵⁶ Polímero vinílico.

⁵⁷ Sustancia líquida conformada por mezcla de sustancias orgánicas que se obtiene de la destilación de otras materias como el petróleo.

32. Dependiendo del precursor, la fibra puede tener un orden turbostrático⁵⁸ (PAN) o un orden grafitico⁵⁹ (alquitrán) [50], ambas disposiciones se muestran en la figura 33.

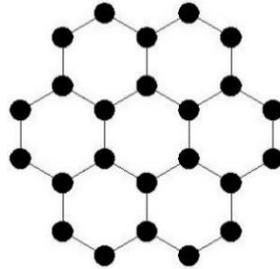
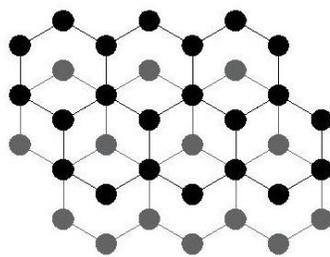
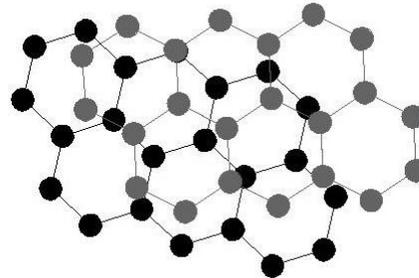


FIGURA32 - LÁMINAS DE ÁTOMOS DE CARBÓN. Figura basada en Hull.



ORDEN TURBOSTRÁTICO



ORDEN GRAFÍTICO

FIGURA 33 - ORDENAMIENTOS DE LAS FIBRAS DE CARBÓN. Ídem.

El módulo de elasticidad de las fibras depende del grado de orientación de su estructura molecular, tipo de precursor y proceso. Existen tres procedimientos para lograr fibras con láminas paralelas predominantes a su eje. Orientación por estiramiento: la fibra de PAN se somete a estiramiento antes del proceso de carbonización; orientación por hilado: se moldean hilos de alquitrán fundido previo a la carbonización; y orientación durante la grafitización: se somete a temperaturas muy altas las fibras carbonizadas de rayón, PAN o alquitrán y se les estira [50].

FIBRA DE ARAMIDA

⁵⁸ Las láminas de átomos de carbono se apilan al azar o en forma irregular

⁵⁹ Las láminas se apilan paralelas entre sí de manera regular

Las aramidas están constituidas por grupos amida⁶⁰ y anillos aromáticos⁶¹, lo que les confiere estabilidad térmica. La repetición del grupo aromático en su estructura molecular les otorga alta rigidez a las cadenas poliméricas. Las fibras actúan en conjunto y exhiben elevada resistencia a cargas de tensión en dirección paralela al eje longitudinal [44]. En la figura 34 se muestra la estructura química de las fibras de aramida.

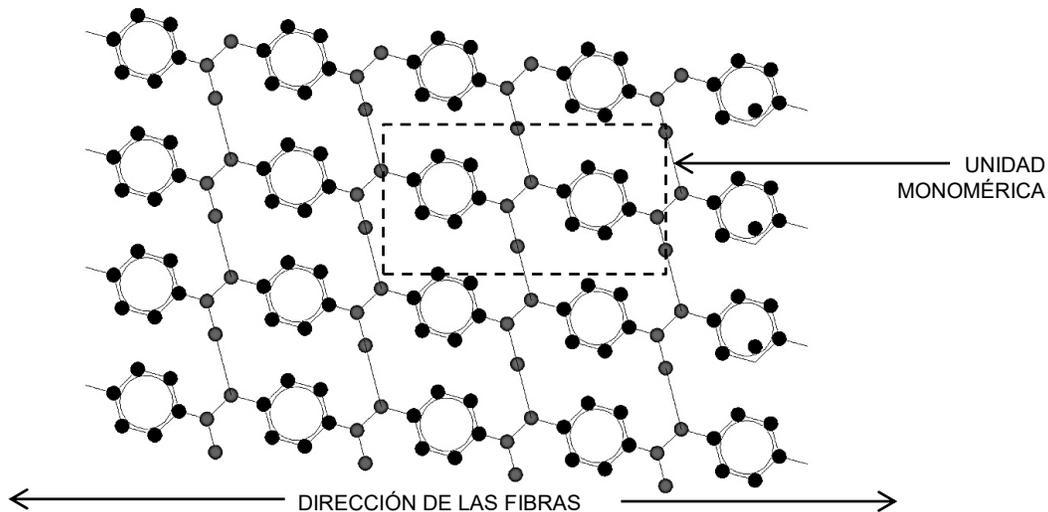


FIGURA 34 - ESTRUCTURA QUÍMICA DE LAS FIBRAS DE ARAMIDA. Figura basada en Callister.

Las fibras de aramida son producidas por la extrusión de una solución de poliamida con los nombres comerciales de kevlar (DuPont), HM50 y Twaron (Teijin). Las cadenas poliméricas de las aramidas están alineadas de forma que las dotan de resistencia y rigidez significativa en dirección longitudinal de su estructura química (Fig.34). Para mejorar su orientación molecular en dicha dirección las fibras se estiran posproducción [44], los tejidos resultantes son duros y resistentes a tensión con una elevada resistencia a impacto. Sin embargo, estos tejidos son fibrilares en su microestructura lo que les da propiedades de flexión y de compresión débiles [50]; también son sensibles a los rayos ultravioleta [32].

⁶⁰ Los grupos amidas son compuestos orgánicos unidos con ácidos caboxílico.

⁶¹ Se considera polímero aromático al compuesto que cumple la Ley de Hückel: $4n + 2$

En la tabla 7 se comparan las características de distintas fibras de aramida.

Fibra	Módulo de elasticidad	Resistencia a la tensión	Porcentaje de elongación
Kevlar 29	(80GPa) 81,633Kg/cm ²	(3,600MPa) 36,735Kg/cm ²	3.6%
Kevlar 49	(127.5GPa) 130,102Kg/cm ²	(2,640MPa) 26,939Kg/cm ²	2.4%
HM50	(75.5GPa) 77,041Kg/cm ²	(3,040MPa) 31,020Kg/cm ²	4.2%
Twaron	(125GPa) 127,551Kg/cm ²	(2,800MPa) 28,571Kg/cm ²	2.0%

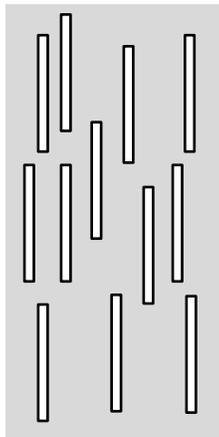
TABLA 7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE DISTINTAS FIBRAS DE ARAMIDA. Basada en datos de DuPont y Teijin.

4.3 TEORÍA DE LAS FIBRAS DE REFUERZO

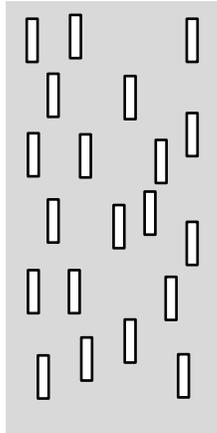
Para los materiales reforzados con fibras o compuestos cargados, la fase dispersa mantiene una relación muy estrecha entre longitud y diámetro: la matriz transmite la mayor parte del esfuerzo a la fase dispersa. Las matrices reforzadas con fibras mejoran su resistencia a la fatiga, obtienen mayor rigidez y mejor resistencia a esfuerzos de tensión [38] a través de la longitud de fibra crítica⁶² [6]. Las propiedades mecánicas de los *composites* cargados dependen de la magnitud de la carga aplicada y de cómo la transmite la matriz hacia las fibras. Las fibras con una longitud mayor que la longitud crítica se denominan **fibras continuas** y las de menor longitud se denominan **fibras discontinuas** o cortas. En el caso de las fibras cortas, la matriz se deforma alrededor de la fibra, así que la transferencia de esfuerzos hacia las fibras es pobre, por lo tanto un compuesto resistente utilizar fibras continuas [6]. La orientación se puede dar paralela a los ejes de las fibras en una sola dirección o de forma aleatoria, de manera recurrente las fibras discontinuas se alinean de forma aleatoria y las continuas de forma alineada. Las propiedades de resistencia de los *composites* aumentan si la distribución de fibras es uniforme [38].

⁶² Resistencia mínima que pueden aportar las fibras y que está subordinada a su longitud, diámetro y propiedades mecánicas.

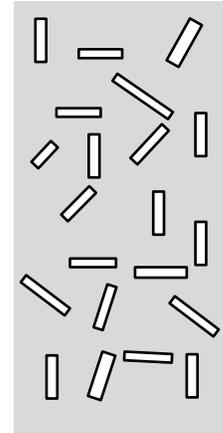
Uno de los factores de mayor complejidad que determina el comportamiento mecánico de un compuesto es la proporción de la matriz y de las fibras, aunque esta condición se aplica en general para los *composites* cargados en los cuales las fibras se agregan (con las consideraciones anteriores) al polímero fundido. En la figura 35 se ilustra esquemáticamente el refuerzo de una matriz con fibras continuas y discontinuas.



a) FIBRAS CONTINUAS ALINEADAS.



b) FIBRAS DISCONTINUAS ALINEADAS.



c) FIBRAS DISCONTINUAS ALEATORIAS.

FIGURA 35 - ORDENES DE LAS FIBRAS EN UNA MATRIZ. Ídem.

4.4 COMPUESTOS ESTRUCTURALES

Compuestos laminares

También conocidos como estructuras multicapa, están conformados por paneles unidireccionales⁶³ reforzados con fibras continuas alineadas. Cada lámina se agrupa de forma que la orientación de sus fibras varíe para que tenga una relativa resistencia en cualquier dirección [6]. A este proceso se le denomina **esquema de laminación** o **secuencia de apilamiento**, las capas usualmente están unidas entre sí con el mismo material matriz del que están conformadas.

⁶³ Con una sola dirección.

Cada lámina del compuesto manifiesta alta resistencia estructural en el sentido de la orientación de la fibra y es débil en el sentido transversal, de ahí el criterio de agruparlas con distintas orientaciones. Si algunas de las láminas tienen fibras orientadas a 30° o 45° pueden resistir esfuerzos cortantes [51]. Sin embargo estos paneles presentan desventajas estructurales cuando las cargas aplicadas causan desajustes en las capas, es decir cuando el esfuerzo cortante causa la delaminaciones⁶⁴. Este tipo de fallas también pueden estar relacionadas a la manufactura del compuesto: imperfecciones en las capas o la aplicación incorrecta de las fibras [51]. La figura 36 muestra el agrupamiento sucesivo de capas orientados en distintas direcciones.

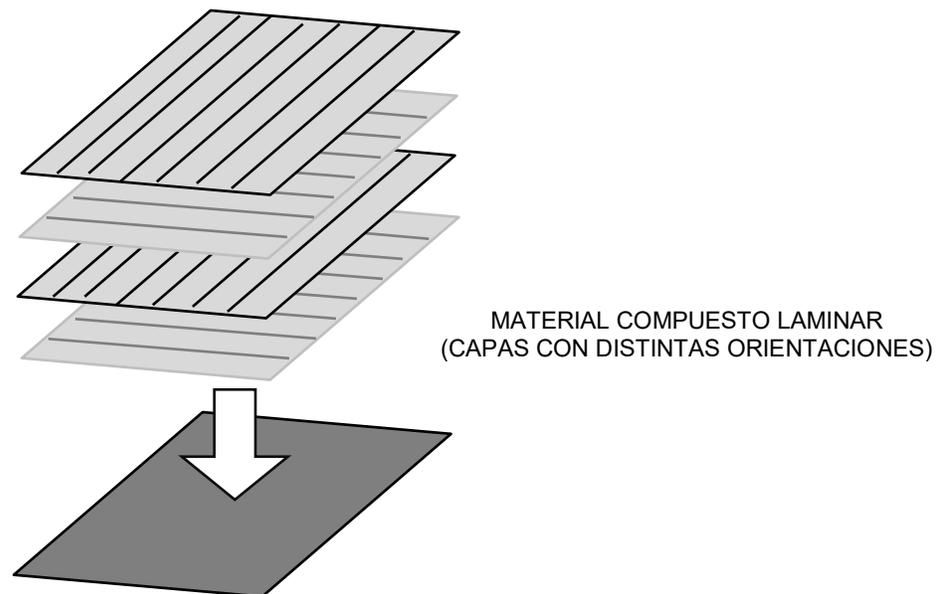


FIGURA 36 - AGRUPAMIENTO DE PANELES UNIDIRECCIONALES CON DISTINTA ORIENTACIÓN. Figura basada en Askeland.

PANELES SÁNDWICH

Los paneles sándwich se consideran materiales estructurales que constan de dos láminas delgadas de un material resistente adheridas a un núcleo ligero y grueso de un material de baja densidad [6]. El núcleo del panel proporciona soporte continuo a las dos

⁶⁴ Separación de las capas individuales de un material compuesto.

láminas de sus caras y debe ser resistente ante esfuerzos de cizalladura⁶⁵ transversal. Los núcleos pueden ser sólidos⁶⁶ o estar dispuestos en celdas hexagonales, denominadas panel, con los ejes perpendiculares a las caras del panel. En el caso de un panel con un núcleo de panel, la resistencia depende del tamaño de la celda, del espesor de las paredes de la celda y del material con el que está hecho el núcleo. La causa de falla más común para este tipo de compuestos se da en el núcleo cuando este colapsa debido a una sobrecarga crítica [52]. Esta sobrecarga se manifiesta de forma concentrada en un solo punto del panel, ya sea por peso o por impacto [53]. En la figura 37 se representa un panel sándwich con un núcleo sólido y uno de panel.

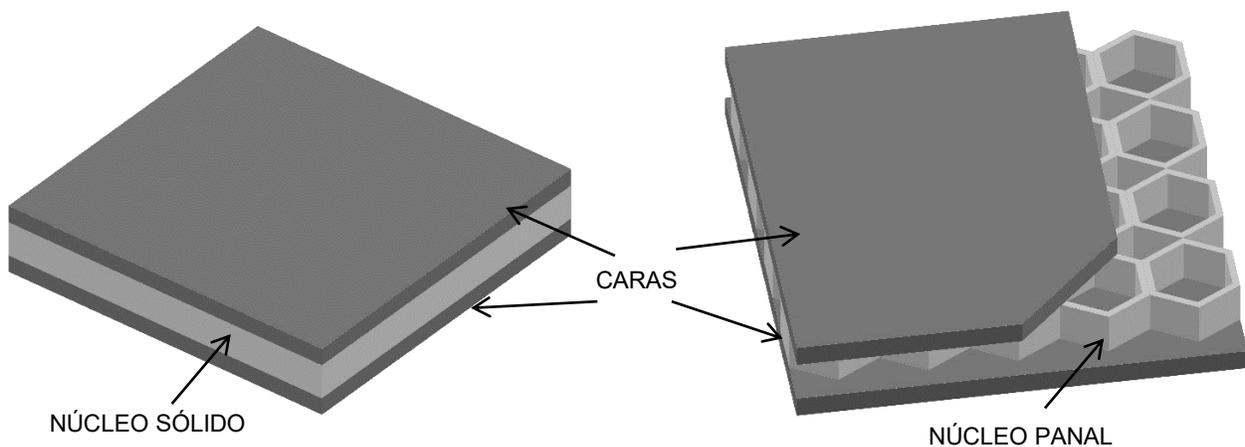


FIGURA 37 - PANEL SÁNDWICH. Ídem.

4.5 TERMOPLÁSTICO REFORZADO

En el capítulo 3 se hizo una breve descripción de la clasificación, composición química, comportamiento mecánico y procesamiento de polímeros y a lo largo del capítulo 4 se han descrito las características, tipos y funcionamiento de los materiales

⁶⁵ Deformación o corte producido en un sólido por la acción de fuerzas opuestas, iguales y paralelas.

⁶⁶ Presentan solidez relativa, puesto que en lo general son materiales porosos.

compuestos. Con base en el conocimiento adquirido en dichos apartados en este punto de la investigación se deben comprender las diferencias esenciales de los polímeros y los materiales compuestos de modo tal que la propuesta experimental del compuesto se puede establecer de forma técnica como un termoplástico o plástico de ingeniería reforzado a través de una matriz termofija con tejidos de fibra de carbón con sustento en las teorías del refuerzo con fibras largas y la combinación de orientaciones.

En conclusión, se han dado los datos para que el lector adquiriera de forma gradual el conocimiento de ciencia e ingeniería de materiales suficiente para comprender de forma general la estructura microscópica y el comportamiento mecánico de los materiales, principalmente los polímeros y los compuestos; y este sea capaz de entender las hipótesis y diseño experimental desarrollados en la investigación, cuyo objetivo es comprobar la compatibilidad, adherencia y resistencia ante la aplicación de una carga, de la combinación de los materiales seleccionados.

En el siguiente capítulo se presenta la descripción del termoplástico seleccionado, sus características particulares y los criterios para su uso en la propuesta de un nuevo material compuesto.

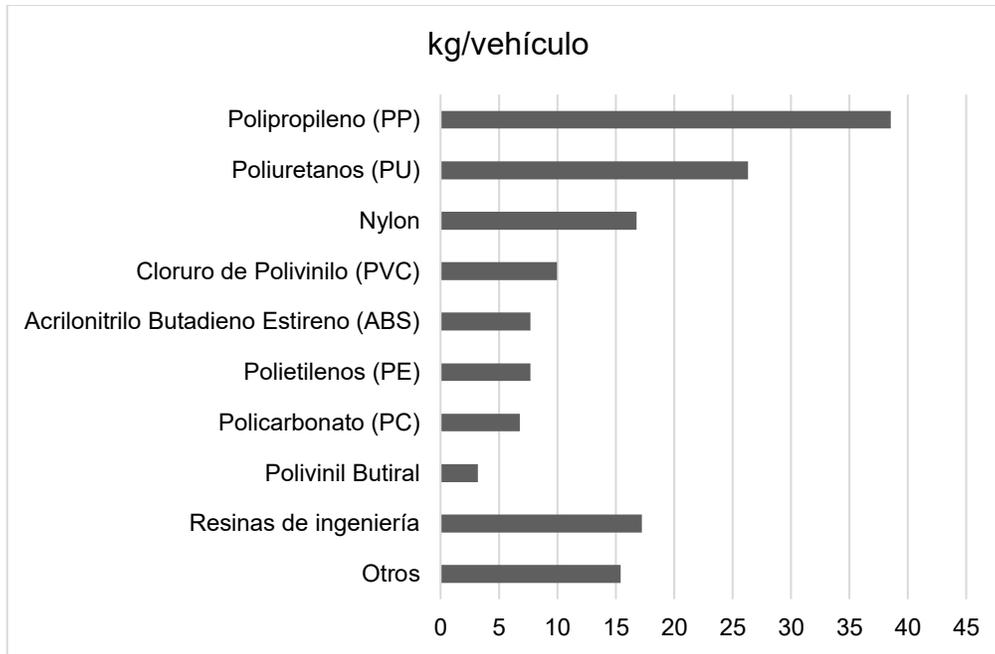
5.0

PLÁSTICOS DE INGENIERÍA

Se mencionó que el desarrollo de *composites* es impulsado principalmente por el sector aeroespacial, submarino y de transporte, sin embargo, de los tres sectores citados se centrará la atención en el sector automotriz, puesto que éste representa el desarrollo constante de sistemas de producción que disminuyan los costos de fabricación de compuestos con la finalidad del diseño de partes más ligeras para los autos para reducir el peso de los vehículos y aumentar la velocidad de desplazamiento con menor consumo de combustibles. En 2013 el peso aproximado de materiales plásticos y *composites* era de 150kg por automóvil, es decir 8.7% del peso total del auto [54], un valor superior al alcanzado en décadas anteriores⁶⁷.

Al interior y exterior de los automóviles, la sustitución de piezas y partes metálicas por componentes plásticos aumenta la seguridad de los pasajeros. El chasis de un auto esta reforzado a través de *composites* cuyo peso es menor y por lo tanto absorbe mejor la fuerza de impacto sobre el pasajero en una colisión. En la gráfica 4 se presenta la relación entre la cantidad, en peso, de *composites* y plásticos utilizada para la fabricación de autos ligeros en 2014 [54]

⁶⁷ 130kg en el año 2000, 88kg en 1990 y apenas 9kg en 1960. Acorde con el *American Chemistry Council*, actualmente el automóvil regular contiene cerca de 1,000 componentes plásticos.



GRÁFICA 4 COMPONENTES PLÁSTICOS POR AUTO 2014. Gráfica basada en datos del American Chemistry Council.

Los componentes de la gráfica 4 son utilizados como aleaciones o en combinación, mediante adhesión mecánica, según su resistencia al ataque químico, resistencia a los rayos UV o rigidez; para fabricar parachoques (PS, ABS, PC/PBT), asientos (PP, PVC, ABS, PA), tableros (PP, ABS, PC), depósitos de agua (PP, PE, PA) o molduras interiores (PP, ABS, PET, POM, PVC).

5.1 ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), es uno de los más exitosos polímeros de ingeniería utilizados en la industria automotriz. Su producción se caracteriza por ofrecer un alto rango de propiedades que se adecuan según las necesidades de diseño y esfuerzo [55]: se produce en distintos grados de resistencia a impacto, con superficie brillante o mate, con retardante y no retardante a la flama. En la fabricación de automóviles predomina el ABS en el interior de los vehículos y al exterior se localiza en las tapas de las llantas, espejos, luces traseras y faros; además se utiliza en la

manufactura de aparatos electrodomésticos, juguetes y electrónicos. En la tabla 8 se muestran las propiedades generales del ABS [56].

Estructura	$H_2C = CHC \equiv N$ $H_2C = CHCH = CH_2$
Porcentajes	Acronitrilo: 15 - 50%; Butadieno: 5 - 30%; Estireno: 40 - 60%
Marcas comerciales	Lustran, Terluran; Cevian; Novodur; Tairilac; Cycolac
Densidad	1.03 - 1.09 g/cm ³
Temperatura de fusión	220 - 260 °C
Fuerza de tensión	255 - 633 kg/cm ²
Módulo de tensión	19,388 - 27,551 kg/cm ²
Elongación	8 - 20%
Fuerza de flexión	561 - 1,276kg/cm ²
Módulo de flexión	21,939 - 23,469 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	12,080 - 19,786 kg/cm ²
Módulo de Young	23,469 kg/cm ²
Fuerza de compresión	663 - 878 kg/cm ²
Absorción de agua	0.7 - 1.03 % (considerando una temperatura de 23 °C)
Resistencia química	
Ácidos	Sin resistencia con concentrados; buena resistencia con diluidos
Alcoholes	Resistencia limitada; insoluble
Álcalis	Buena resistencia para diluir
Hidrocarburos alifáticos	Resistencia limitada; insoluble

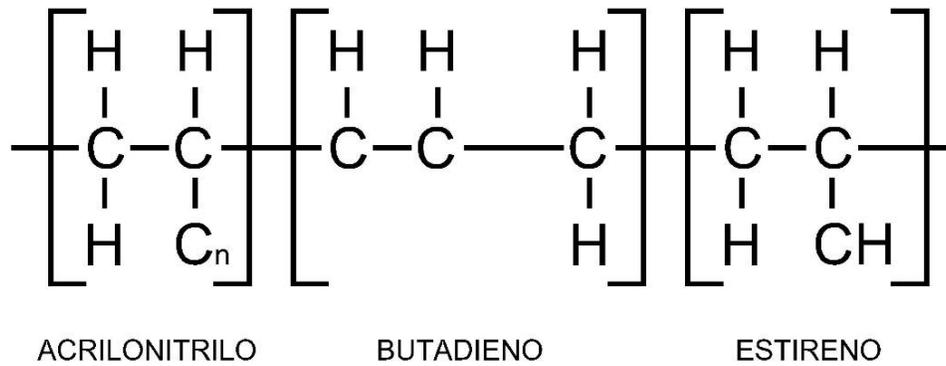
TABLA 8 PROPIEDADES DEL ABS. Tabla basada en datos de Wypych.

El ABS se produce por medio de la polimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de polibutadieno⁶⁸, quedando como producto una estructura de polibutadieno, conteniendo cadenas de SAN⁶⁹ injertados [57], dado que está constituido por tres monómeros diferentes se le denomina terpolímero⁷⁰, en la figura 38 se muestran y se describen los componentes del ABS.

⁶⁸ Elastómero o caucho sintético que se obtiene mediante la polimerización de 1,3-Butadieno.

⁶⁹ *Styrene / Acrylonitrile* (Estireno / Acrilonitrilo)

⁷⁰ Copolímero compuesto de tres bloques.



- Bloque de acrilonitrilo (6C3H3N): proporcionan rigidez, dureza, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura.
- Bloque de butadieno: elastómero que proporciona tenacidad a cualquier temperatura.
- Bloque de estireno: aporta resistencia mecánica y rigidez.

FIGURA 38 - COMPONENTES DEL ABS. Figura y descripción basada en Schweitzer.

5.2 PLÁSTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

El desarrollo de los *composites* para automóviles expone la capacidad del sector automotriz para disminuir el costo en la producción de los mismos a través de la investigación permanente enfocada a un objetivo específico. El campo de la electrónica también ha desarrollado materiales compuestos de bajo costo, no obstante debido a su escala y propósito no es posible considerar sus logros para las metas de esta investigación. Respecto a la selección del plástico ABS sobre los otros polímeros de ingeniería, si se observa la gráfica 4 se podrá notar que este material representa sólo el 20% del peso de los componentes plásticos en un auto a pesar de su amplia presencia al interior y exterior; con esta información se puede inferir su ligereza en contraste con los otros plásticos. Y, considerando además su versatilidad para la configuración de propiedades es una selección apropiada para la propuesta de la investigación.

Resumiendo, el ABS presenta un menor peso aunque sus propiedades mecánicas son inferiores a los otros polímeros de ingeniería como el Polipropileno; sin embargo sus características son apropiadas para medir y constatar los aportes de tenacidad y resistencia de la fibra de carbón con la resina epóxica. Se considera también la probabilidad positiva de compatibilidad al fusionar ABS con fibra de carbón debido a que ambos presentan el bloque acrilonitrilo en su composición química. Y la última consideración se debe a su extenso uso tanto en la industria automotriz como en la electrónica por su bajo costo relativo.

6.0

TEJIDOS DE REFUERZO

La resistencia ideal en un compuesto es aquella en que todas las fibras se orientan en la misma dirección, como es el caso de las secciones compuestas. La manufactura de estas, a excepción de la industria aeroespacial, se realiza a través de medios de baja tecnología tal como el modelo de pultrusión; proceso continuo que consiste en conducir las fibras de refuerzo hacia un compartimiento donde se agrega la matriz, posteriormente son dirigidas a otro compartimiento en donde se localiza el molde con la forma final [58]. Durante la manufactura de un perfil pultrusionado se deben tomar en cuenta esfuerzos posproducción perpendiculares al eje, como la flexión y cargas transversales generadas por procedimientos de instalación y/o sujeción.

En *Fiberline Composites* resuelven esta condición prospectiva de trabajo, empalmando capas de fibras de refuerzo con orientaciones de 60° hasta 90° respecto del eje de diseño sobre la fibra de refuerzo principal, la cual se encuentra orientada paralela al eje durante la conformación de secciones; la proporción del refuerzo que utilizan es usualmente 60%, en relación al peso total del perfil.

Cada *composite* es único en propósito, por lo que su diseño debe considerar los estados de servicio a los que estará sometido y de acuerdo a esta condición se debe seleccionar el tipo de tejido con la orientación más eficiente para dotar a la matriz de las propiedades del refuerzo. Las fibras se comercializan hiladas en distintos tipos de entretejido con hebras compuestas por filamentos que no superan el 0.1mm y que en algunos casos también consideran la acción combinada en los filamentos disponiéndolos con diferente orientación [59].

Aunque es posible la manufactura de perfiles pultrusionados tanto de FV o FC, es común que su producción disponga en mayor medida de la fibra de vidrio particularmente por su costo menor. Estos perfiles tienen mayor presencia constructiva en proyectos químico/industriales que requieren una resistencia estructural excepcional en caso de contingencia puesto que resguardan tanques con productos tóxicos o inflamables que son susceptibles de derrames o explosiones. Entre las aplicaciones de estos perfiles en dichos escenarios se encuentra la conformación de pasos de gato, barandales, rejillas y estructuras portantes [60] [61]. En la figura 39 se ilustra el proceso de pultrusión y en la figura 40 se ilustran algunos tipos de tejidos de fibras para perfiles.

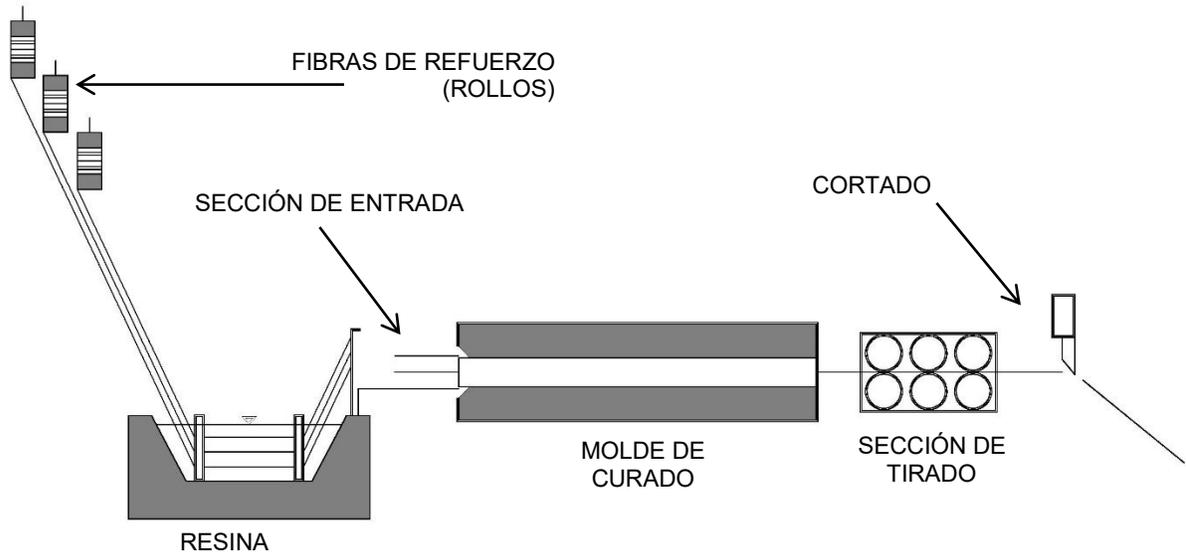


FIGURA 39- PROCESO DE PULTRUSIÓN. Figura basada en el manual de Fiberline Composites.

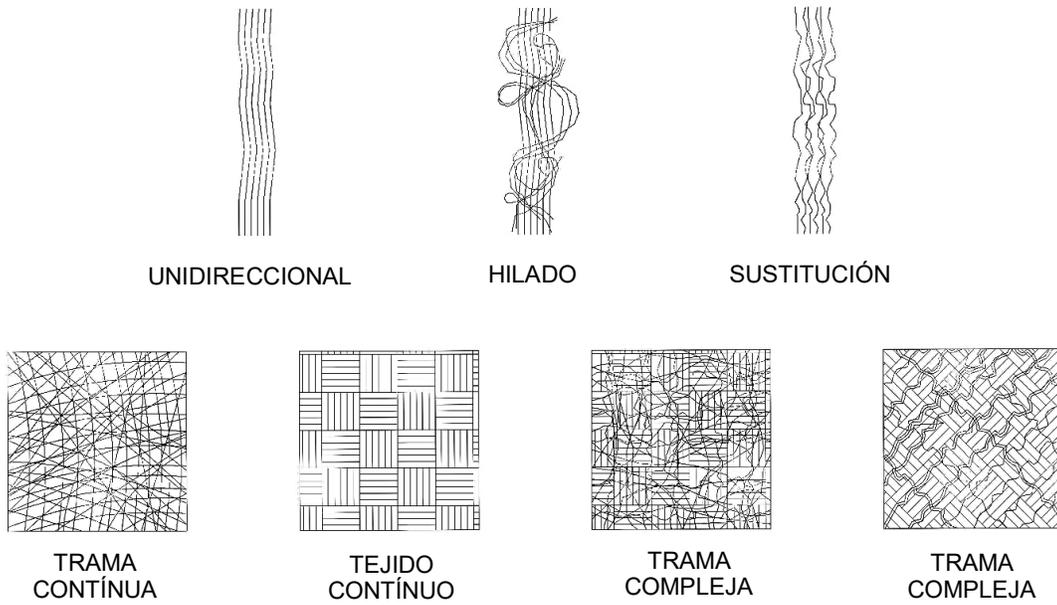


FIGURA 40 - TEJIDOS Y TRAMAS DE LAS FIBRAS DE REFUERZO. Ídem.

6.1 SECCIONES COMPUESTAS

Una estructura se define como un conjunto de elementos apropiadamente vinculados entre sí que accionan y reaccionan bajo cargas de servicio, cuya finalidad es la de recibir y transmitir dichas cargas sin sufrir deformaciones permanentes en relación con el material del que están constituidos, el estado de servicio en el que se encuentran y el uso de la construcción en el que se aplican [62].

En correspondencia con la selección de materiales propuesta y basado en la experiencia de *Fiberline composites*, la combinación de distintas orientaciones de capas de fibra para inducir al plástico ABS la capacidad de recibir y transmitir cargas, es decir dotarlo a modo de que cumpla con la definición de estructura, se requiere de incorporarle la acción combinada de tejidos de fibra de carbón a través una matriz epóxica. La orientación combinada de tejidos de FC se puede adquirir en versiones comerciales, sin embargo esta clase de tejido suele tener un costo más elevado. Para reducir el costo de adquisición del material se propone la utilización de un solo tipo de tejido y realizar el cambio de dirección a través de la manipulación manual del mismo.

En las figuras 41 y 42 se muestra un esquema de los materiales seleccionados con el orden propuesto para su constitución.

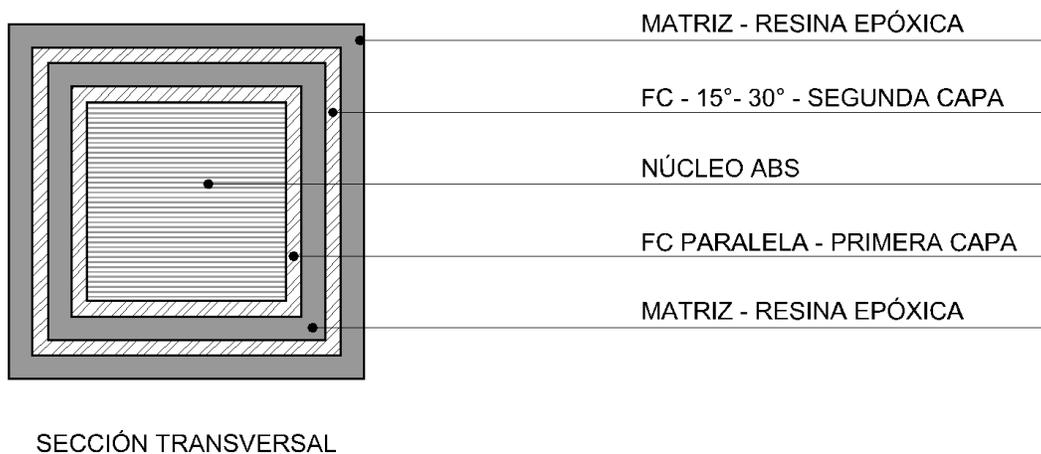


FIGURA 41. ESQUEMA PROPUESTA COMPOSITE, SECCIÓN TRANSVERSAL.

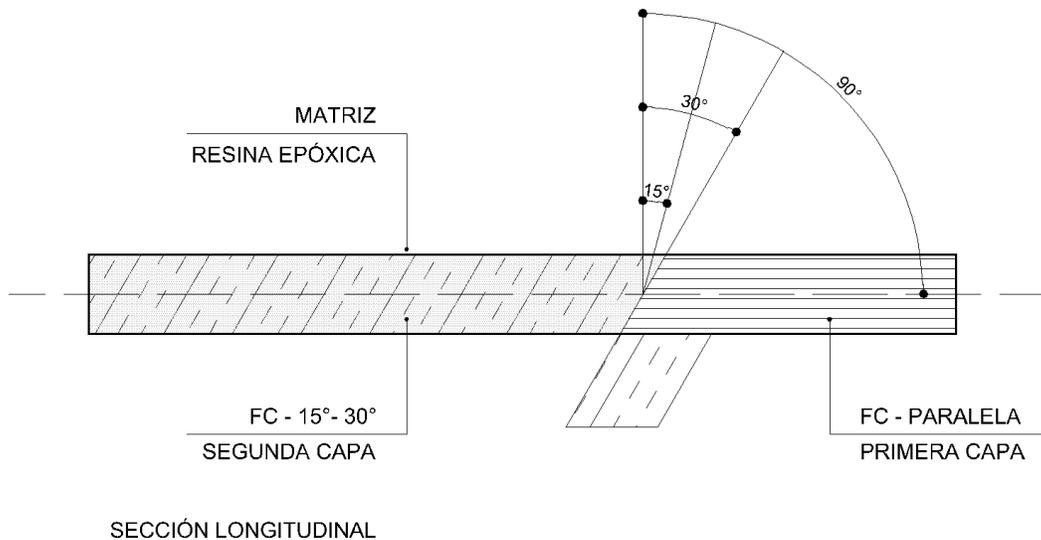


FIGURA 42 ESQUEMA PROPUESTA COMPOSITE, SECCIÓN LONGITUDINAL.

NORMATIVIDAD

Considerando como autoridad en la regulación de procedimientos para materiales a la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales o *American Society for Testing and Materials* (ASTM) se tomarán las normas para ensayos de materiales afines emitidas por dicha institución, para establecer las dimensiones de las probetas así como su respectivo método de ensayo:

- **ASTM D 638** –Propiedades de tensión en plásticos.
- **ASTM D 695** –Propiedades de compresión en plásticos rígidos.
- **ASTM D 790** –Propiedades de flexión en plásticos reforzados y no reforzados y materiales eléctricos aislantes.
- **ASTM D 635** – Método de prueba estándar para Tasa de ardor y / o extensión y tiempo de quemado de plásticos en posición horizontal.
- **ASTM D 3163** –Determinación de la fuerza adherencia de plásticos rígidos en una articulación por cizalladura bajo esfuerzo de tensión.
- **ASTM D 1435** – Envejecimiento de plásticos a la intemperie.

6.2 MATERIALES PROPUESTOS

NÚCLEO

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) de alto impacto en su presentación comercial Terluran ® HI-10NR, en la tabla 9 se muestran sus propiedades mecánicas [64].

Material	Terluran ® HI-10NR
Módulo de tensión	20,408 Kg/cm ²
Tensión de rotura	337 Kg/cm ²
Módulo de flexión	20,918 Kg/cm ²
Fuerza a la flexión	673 Kg/cm ²

TABLA 9 PROPIEDADES MEÁNICAS TERLURAN HI-10. Información tomada de la ficha técnica en la página web de la empresa proveedora: <http://www.promaplast.com/uploads/Terluran%20HI-10.pdf>

FIBRA DE REFUERZO

Fibra de carbón e alto módulo con de tejido unidireccional 12k de 0.25mm de espesor y densidad de 1.86 g/cm³, en su presentación comercial QuintumWrap-600®, en la tabla 10 se muestran sus propiedades mecánicas [65].

Material	Quintum Wrap-600®
Fuerza de tensión (0°)	30,102 Kg/cm ²
Módulo de tensión (0°)	1,448,980 Kg/cm ²
Fuerza de tensión (90°)	806 Kg/cm ²
Módulo de tensión (90°)	91,837 Kg/cm ²
Fuerza de compresión (0°)	16,327 Kg/cm ²
Módulo de compresión (0°)	1,326,531 Kg/cm ²
Fuerza de flexión (0°)	30,612 Kg/cm ²
Módulo de flexión (0°)	1,326,531 Kg/cm ²
Fuerza de flexión (90°)	1,429 Kg/cm ²
Módulo de flexión (90°)	91,837 Kg/cm ²

TABLA 10 PROPIEDADES MEÁNICAS QUINTUM WRAP-600. Información tomada de la ficha técnica de Quintum.

MATRIZ

Resina epóxica líquida tipo bisfenol A⁷¹ con un aducto Amónico como endurecedor, en su presentación comercial Quintum Q1, de baja viscosidad con catalizador al 35% y tiempo de curado de 24 horas, en la tabla 11 se muestran sus propiedades mecánicas [65].

Material	Resina epóxica Q1			
	Resina	Catalizador	Mezcla	
Densidad	1.14	0.98	1.09	Gr/cm
Viscosidad	700	650	680	cP
Punto de inflamabilidad	140	115	120	°C
Resistencia a la compresión			700-900	Kg/cm ²
Dureza shore D			>80	

TABLA 11 PROPIEDADES MEÁNICAS QUINTUM RESINA EPÓXICA Q1. Información tomada de la ficha técnica de Quintum.

PROBETAS

La geometría de las probetas se tomará de las normas ASTM D 638 y D695, debido a que los ensayos correspondientes con estas normas permiten realizar las pruebas restantes sin que la geometría comprometa los ensayos. En la figura 43 se muestran las dimensiones de una probeta a tensión y de una probeta a compresión.

⁷¹ Resina epóxica con mayor aplicación en el campo de los adhesivos cuyos productos derivados consisten en un líquido o un sólido (resina) y un agente de curado. [96]

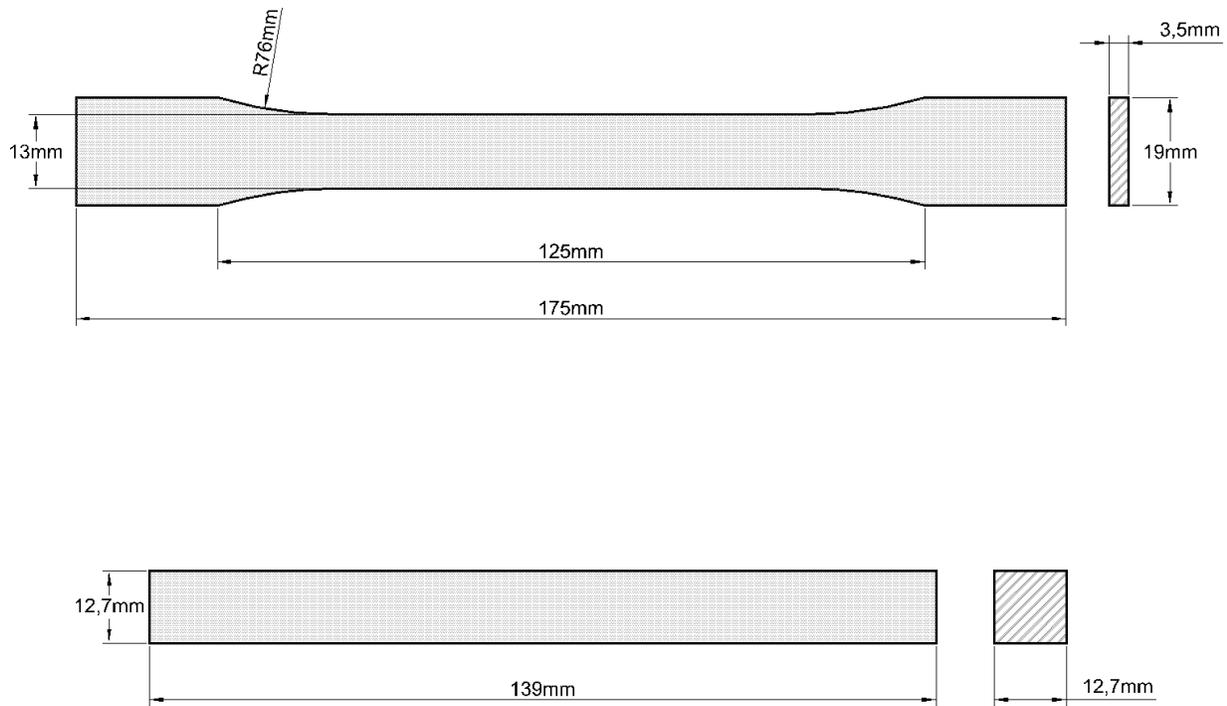


FIGURA 43 GEOMETRÍA PROBETAS PARA ENSAYO DE TENSIÓN Y COMPRESIÓN. Medidas tomadas del ASTM.

6.3 MANUFACTURA

ABS

Para la conformación de las probetas se utilizó una inyectora de polímeros DEMAG modelo ergotech 50 – 200 compact, propiedad del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM), a la cual se le montó un molde de acero diseñado para producir dos piezas de la norma D 638 y uno de la norma D 695.

Para iniciar el proceso de inyección de las piezas, primero se aplicó cera desmoldante sobre la superficie de los moldes, después se vertieron cerca de 3kg de plástico ABS en la tolva de la inyectora. Una vez colocado el polímero se monitoreó la temperatura del tornillo extrusor hasta que el plástico alcanzó su punto de fusión (220°C). Posteriormente se inyectó el polímero fundido en el molde a una presión de 864. 49

kg/cm² (12, 296 Psi). Esta primera inyección tiene la finalidad de limpiar la máquina de residuos de otros materiales anteriores. Una vez constatado que la inyectora ha sido purgada se prosiguió a verter 3kg más de polímero para obtener piezas homogéneas. Las piezas resultantes se deben enfriar antes de manipularse y debido al desgaste de los moldes, los especímenes mostraban irregularidades en su geometría, no obstante los defectos se retiraron con una navaja.

En la figura 44 se muestra la inyectora, en la figura 45 los moldes, en las figuras 46 y 47 se muestran el material vertido y la limpieza del a través del moldeo de una pieza y en la figura 48 las probetas.

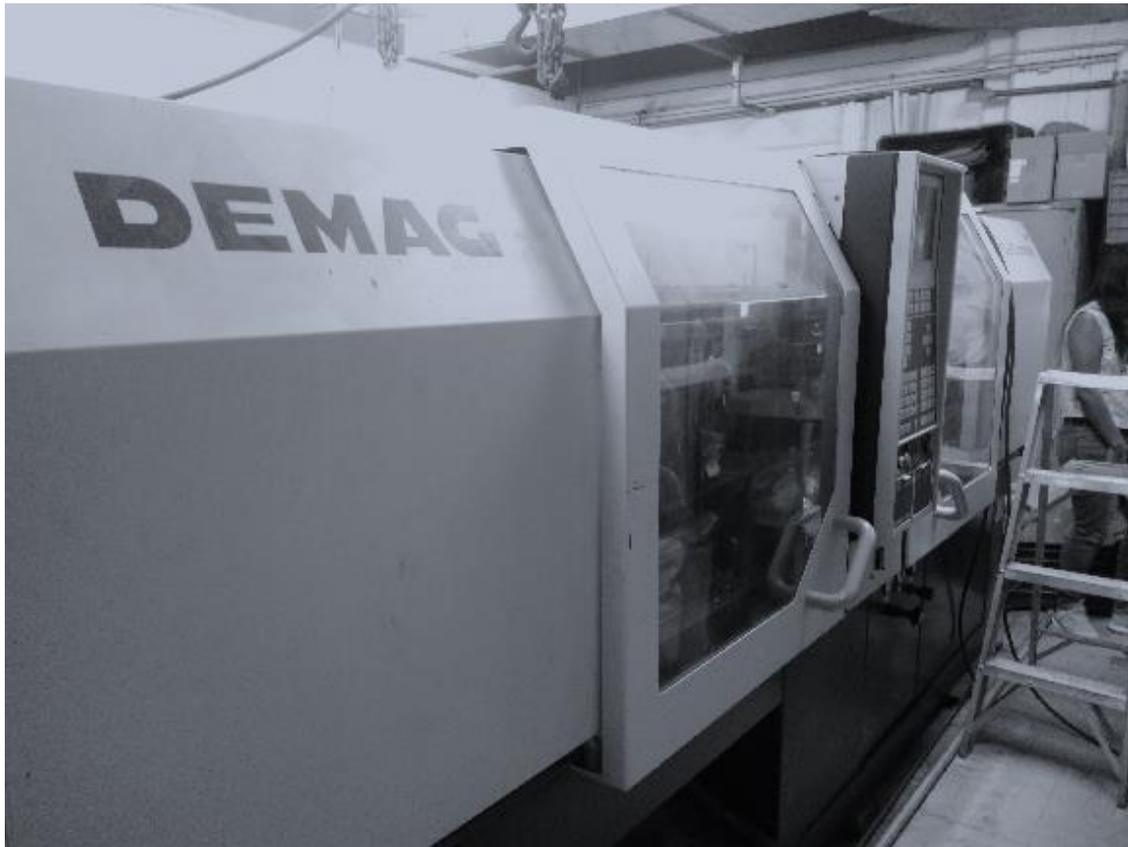


FIGURA 44 INYECTORA DE PLÁSTICOS DEMAG. Fotografía tomada con autorización del Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, con propósito de investigación.

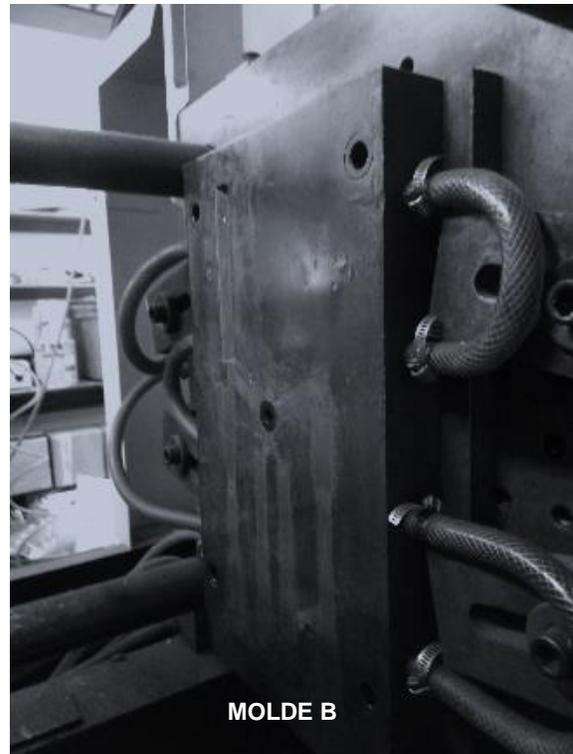


FIGURA 45 MOLDES METÁLICOS PARA MÓDULOS BAJO LAS NORMAS D 638 Y D695. Ídem.



FIGURA 46 ABS VERTIDO EN LA TOLVA DE LA INYECTORA. Ídem

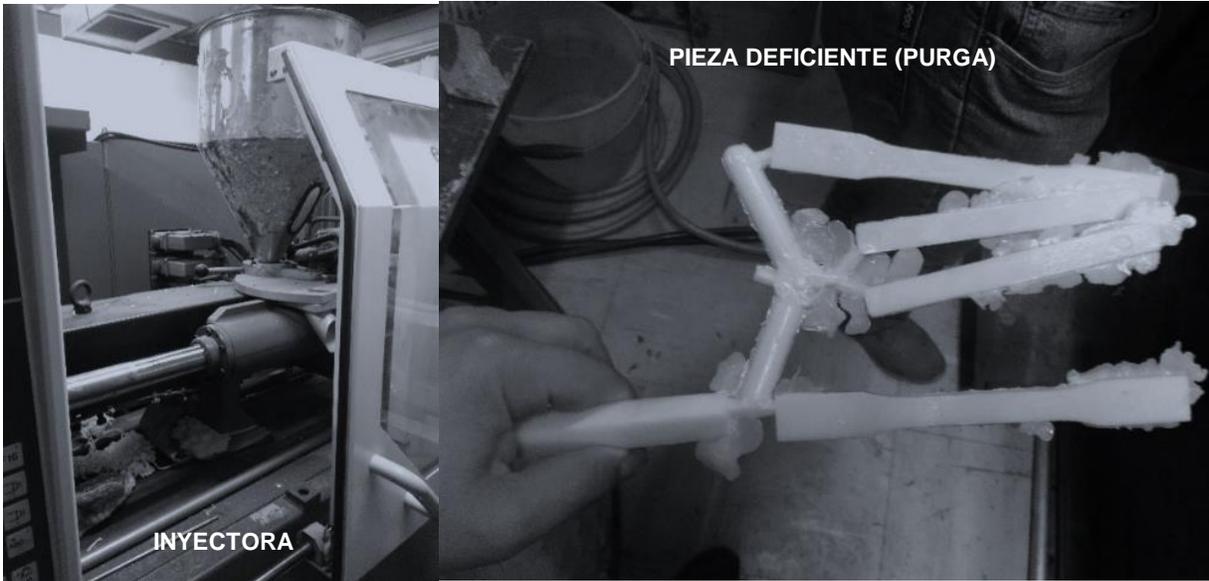


FIGURA 47 PURGADO DE INYECTORA Y PIEZA RESULTANTE DE LA LIMPIEZA DE LA MÁQUINA. Ídem.



FIGURA 48 PROBETAS MOLDEADAS POR INYECCIÓN EN BASE A NORMAS ASTM.

6.4 ABS +FIBRA DE CARBÓN

La preparación para la primera capa de refuerzo de las piezas, consiste en pulir las superficies de la probeta a modo de incrementar la rugosidad y mejorar la adherencia entre adhesivo epóxico, fibra de carbón y plástico ABS.

PROBETAS D638

Para estos especímenes se requiere de dos piezas de ABS; posterior al pulido se cortan tres tiras de FC en el sentido longitudinal del tejido de 1.3cm de ancho por 16.5cm de largo (21.45cm^2 , después se prepara el adhesivo epóxico en una proporción de 30gr de catalizador por cada 100gr de resina. Para obtener el volumen de resina se toma la medida longitudinal y transversal total de la pieza con un estándar de 2 mm grosor⁷². La mezcla se bate por 5 minutos y con una brocha se cubre uniformemente la superficie de la pieza a modo de formar un laminado tipo sándwich: se coloca una capa de resina sobre una pieza de ABS, una tira de FC, otra capa de resina y finalmente la otra pieza de ABS y se deja reposar 4 – 6 horas.

Una vez seca la pieza, se prepara otra mezcla epóxica con las mismas proporciones y se coloca una en ambas caras del sándwich seguidas por una tira de FC, y enseguida se coloca el compuesto en un molde metálico el cual le aplica presión uniforme durante el curado. En la tabla 12 se muestra proporción de mezcla epóxica para la primera fase de refuerzo en piezas D638; en las figuras 49 y 50 se muestran los esquemas del orden y aplicación de los materiales, y en las figuras 51 – 57 se muestran las fotografías durante la aplicación de resina epóxica sobre las piezas de ABS y enseguida la colocación de los refuerzos de fibra de carbón para la realización de la probeta tipo sándwich y su montaje en el molde metálico.

⁷² Ancho mínimo de una capa de recubrimiento epóxico.

Probeta	Largo	Ancho	Espesor	Volumen
D 638	16.5cm	1.9cm	0.2cm	6.27cm ³
Dosificación		Mezcla requerida	Catalizador	Resina
30 -100		8.08gr	2.4gr	5.68gr

TABLA 12 DOSIFICACIÓN DE RESINA EPÓXICA EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN REQUERIDO – PRIMERA ETAPA DE REFUERZO.

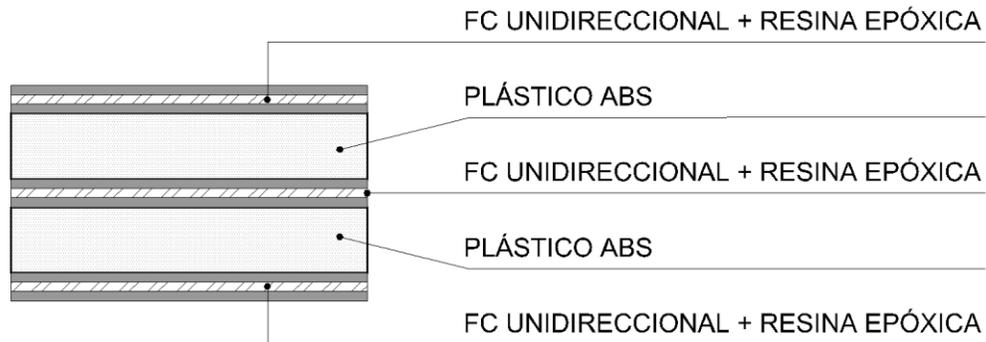


FIGURA 49 ESQUEMA DEL ORDEN Y APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA, FIBRA DE CARBÓN Y PLÁSTICO ABS.

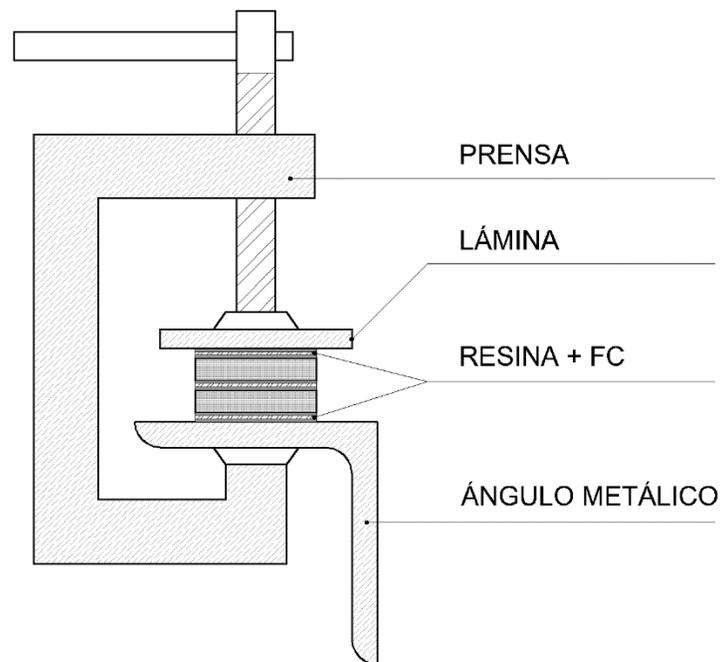


FIGURA 50 COLOCACIÓN DE COMPUESTO TIPO SÁNDWICH EN MOLDE METÁLICO.



FIGURA 51 APLICACIÓN DE RESINA Y TIRA DE FC.



FIGURA 52 APLICACIÓN DE RESINA SOBRE FC.



FIGURA 53 COLOCACIÓN DE SEGUNDA PIEZA ABS.



FIGURA 54 COMPUESTO LAMINADO TIPO SÁNDWICH.



FIGURA 55 APLICACIÓN DE RESINA SOBRE COMPUESTO TIPO SÁNDWICH.



FIGURA 56 APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBÓN SOBRE COMPUESTO TIPO SÁNDWICH.



FIGURA 57 COLOCACIÓN DE LAMINADOS TIPO SÁNDWICH EN MOLDES METÁLICOS.

El segundo revestimiento de FC se realizó considerando un eje perpendicular al de la pieza tipo sándwich, envolviendo a la pieza con una inclinación de 20°. En este recubrimiento se utiliza una tira de fibra de carbón de 1.3cm de ancho por 80cm de largo (104cm²), la cual se pega en una de sus puntas a un extremo de la probeta. El revestimiento se aplica una vez que está aplicada una capa de resina sobre toda la pieza, tensando el tejido a fin de eliminar huecos y tejidos flojos, hasta envolverla por completo. La dosificación de la resina se realiza considerando las dimensiones de la probeta tipo sándwich, mediante el volumen frontal y trasero de 1.9cm de ancho, 16.5cm de largo con un espesor de 2mm, y el volumen lateral de 16.5cm de largo, 0.79 de alto y 2mm de espesor. Al igual que en la primera etapa se consideran dos capas por cada cara del prisma.

Esta mezcla se batió por 5 minutos y a diferencia del primer refuerzo, la tira de fibra se coloca de forma helicoidal tensándola desde la punta previamente adherida y enrollándola de forma perpendicular al eje principal manteniendo la inclinación a 20°. Una vez que está envuelta en totalidad la pieza se coloca inmediatamente en el sistema de moldeo con el ángulo metálico y la lámina, para mantener sujeta a la pieza durante el curado. En esta etapa se debe girar el compuesto al menos dos veces a 180° cada 4-6 horas para mejorar la homogeneidad de la pieza hasta el desmolde 24 horas después.

En la tabla 13 se muestra proporción de mezcla epóxica para la segunda fase de refuerzo en piezas D638; en las figuras 58 y 59 se muestran los esquemas del orden y aplicación de los materiales, y en las figuras 60 – 65 se muestran las fotografías del procedimiento y las probetas finales.

Probeta	Largo	Ancho	Espesor	volumen
Volumen 1	16.5cm	1.9cm	0.4cm	12.54cm ³
Volumen 2	16.5cm	0.79	0.4cm	5.21cm ³
Total				17.75cm ³
Dosificación		Mezcla requerida	Catalizador	Resina
30 -100		22.90gr	6.87gr	16.03gr

TABLA 13 DOSIFICACIÓN DE RESINA EPÓXICA EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN REQUERIDO – SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

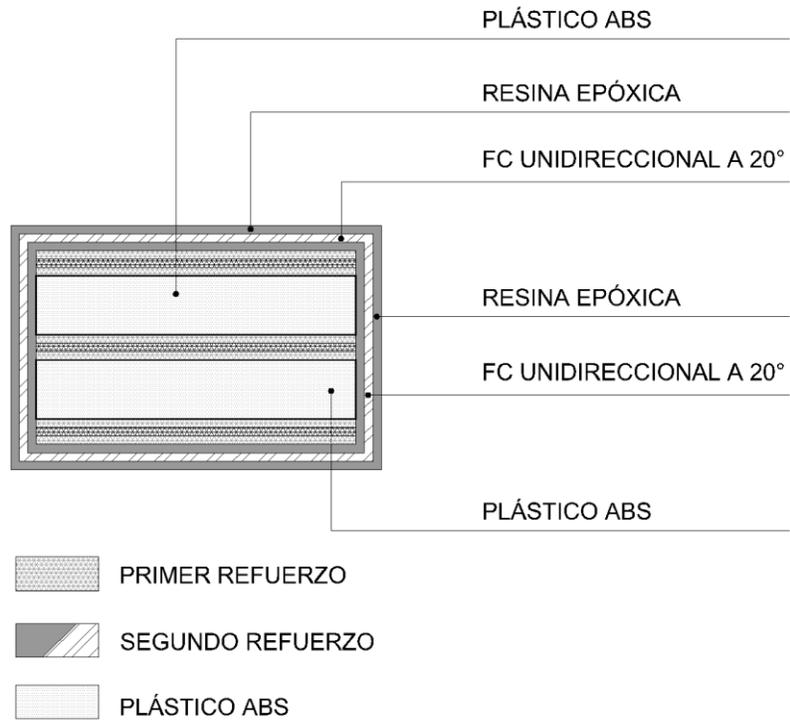


FIGURA 58 ESQUEMA DEL ORDEN Y APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA, FIBRA DE CARBÓN A 20°.

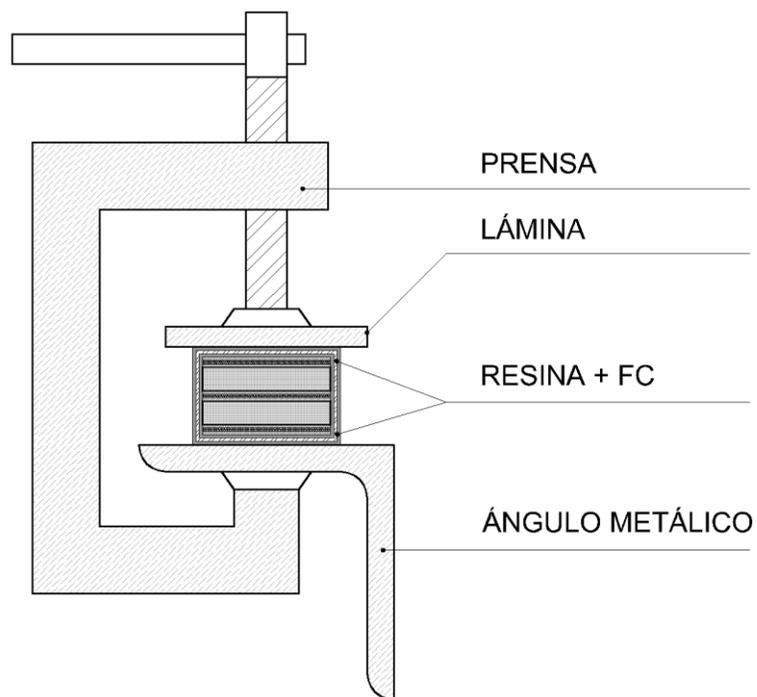


FIGURA 59 COLOCACIÓN DE COMPUESTO CONFINADO EN FC A 20° EN MOLDE METÁLICO.

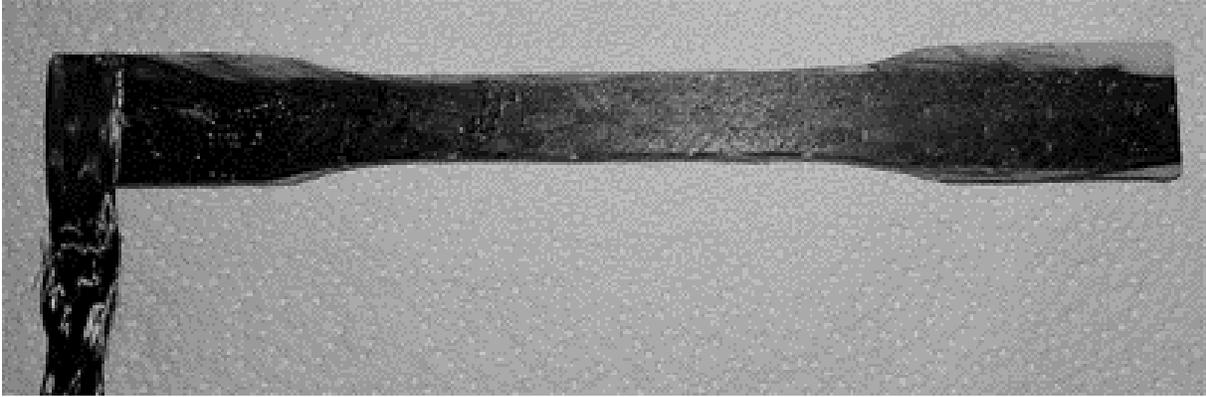


FIGURA 60 LAMINADO TIPO SÁNDWICH CON TIRA DE FC ADHERIDA PARA SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

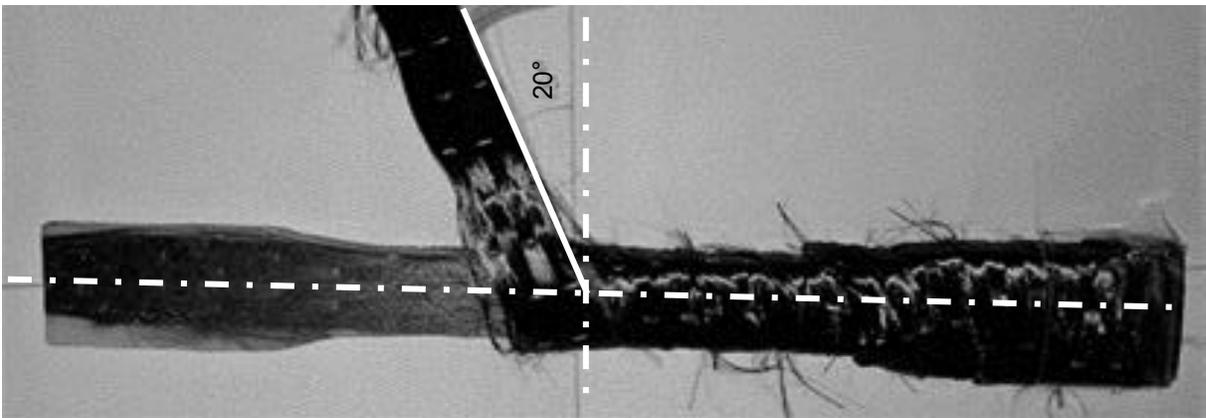


FIGURA 61 APLICACIÓN HELICOIDAL DE LA FC CON ORIENTACIÓN DE 20° PERPENDICULAR AL EJE PRINCIPAL – SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

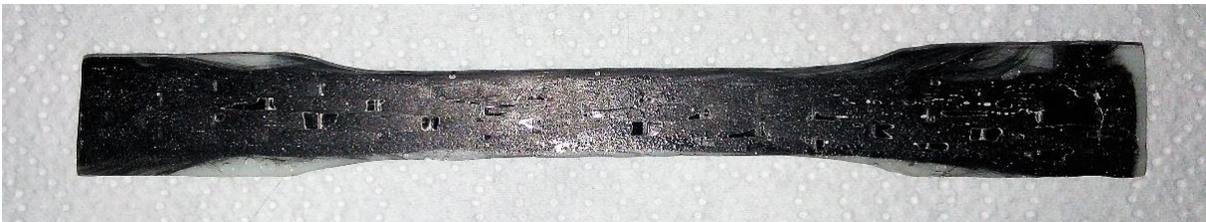


FIGURA 62 PROBETA FINAL D 638 LAMINADA TIPO SÁNDWICH (FRENTE).

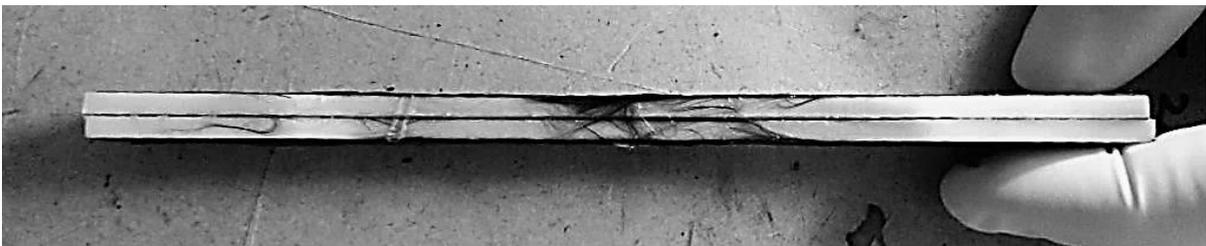


FIGURA 63 PROBETA FINAL D 638 LAMINADA TIPO SÁNDWICH (COSTADO).



FIGURA 64 PROBETA FINAL D 638 CONFINADA EN FC A 20° (FRENTE).



FIGURA 65 PROBETA FINAL D 638 CONFINADA EN FC A 20° (COSTADO).

PROBETAS D695

En la primera etapa de refuerzo la pieza se prepara con el pulido antes mencionado y una vez realizado en las cuatro superficies del prisma, se corta una sección de FC con tejido unidireccional de 6cm de ancho por 12.5cm de largo (75cm²). El corte de la fibra se realiza en el sentido longitudinal del tejido y se envuelve a la pieza con él en dirección paralela al eje del prisma. A continuación se calcula la dosificación de resina con la misma proporción de antes; para obtener el volumen se toma la medida longitudinal (12.5cm) y transversal (1.3cm) con un espesor de 0.2cm y sólo se prepara suficiente para cubrir un solo lado de la pieza con dos aplicaciones. La aplicación del tejido se realiza cara por cara ya que las dimensiones de la pieza hacen difícil la manipulación de la fibra si no se tiene un punto estable para tensarla. Durante el confinamiento se debe adherir cara por cara el refuerzo para garantizar la homogeneidad de la matriz. La mezcla se bate por 5 minutos y se aplica en una sola superficie, se coloca el tejido, se aplica una segunda capa y a continuación se coloca en el molde metálico, se sujeta la pieza y se deja reposar 4 - 6 horas hasta el curado de la resina. Se desmolda y se repite el procedimiento hasta cubrir las 4 caras de la probeta.

En la tabla 14 se muestra proporción de mezcla epóxica para la primera fase de refuerzo en piezas D695; en las figuras 66 - 68 se muestran los esquemas del orden y aplicación de los materiales, y en las figuras 69 – 71 se muestran las fotografías del procedimiento de aplicación de la resina epóxica y el refuerzo de fibra de carbón.

Probeta	Largo	Ancho	Espesor	Volumen
D 695	12.5cm	1.3cm	0.2cm	3.25cm ³
Dosificación	Mezcla requerida		Catalizador	Resina
30 -100	4.19gr		1.25gr	2.94gr

TABLA 14 DOSIFICACIÓN DE RESINA EPÓXICA EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN REQUERIDO – SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

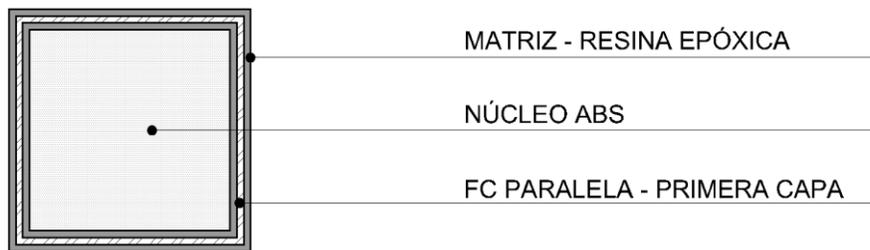


FIGURA 66 ESQUEMA DE CONFINAMIENTO DEL ABS CON FC.

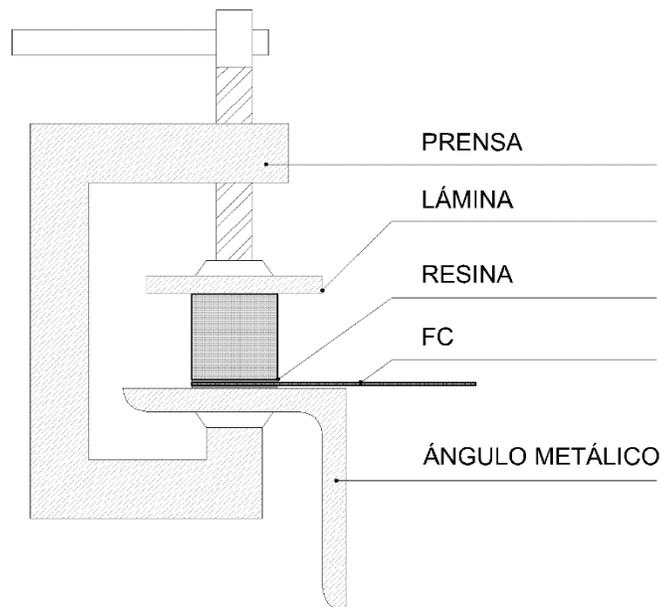


FIGURA 67 COLOCACIÓN DE PROBETA D 695 CON REFUERZO EN UNA DE SUS CARAS.

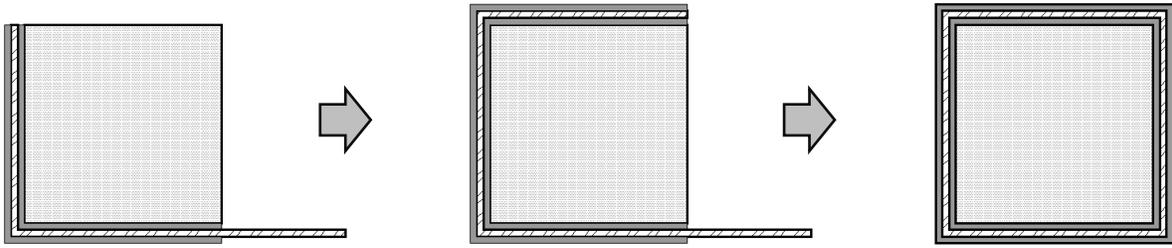


FIGURA 68 ESQUEMA DE LAMIDADO CARA POR CARA DEL ABS CON FC.

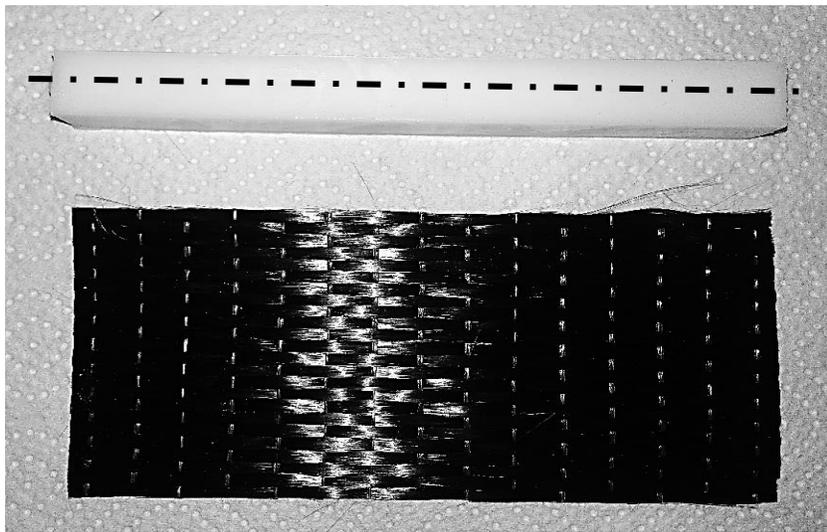


FIGURA 69 TEJIDO UNILATERAL PARALELO A LA PIEZA DE ABS.

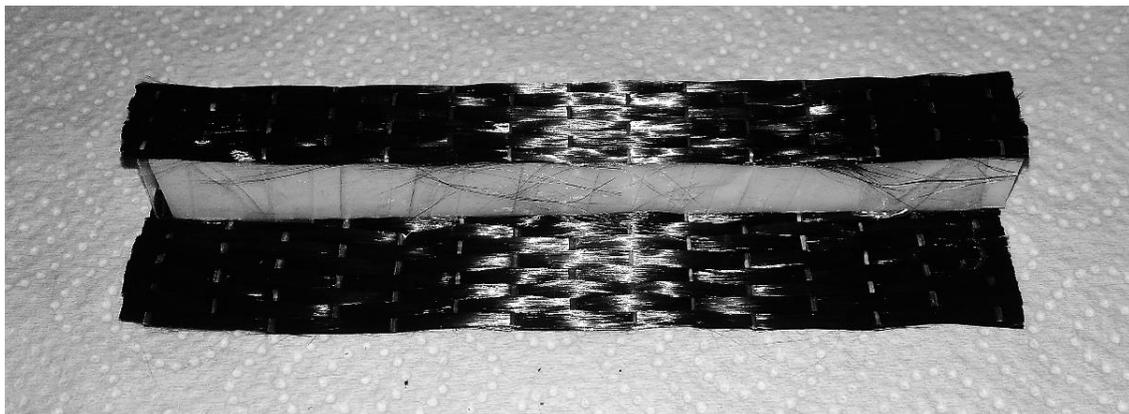


FIGURA 70 PROBETA D695 DURANTE CONFINAMIENTO CARA POR CARA.

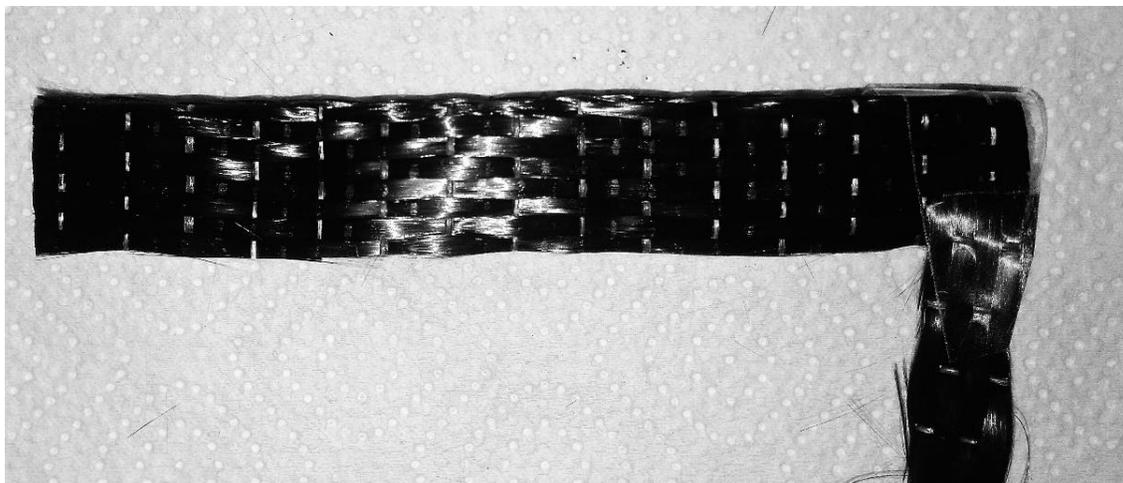


FIGURA 71 PROBETA D695 CON UN EXTREMO DE DE FC ADHERIDO ANTES DE SER CONFINADO.

La aplicación del segundo refuerzo se realiza bajo las mismas consideraciones que los de la probeta D 638, en cuanto a utilizar un eje secundario para adherir un extremo de fibra con una inclinación de 20° . Este refuerzo requiere de una tira de FC de 1.3cm de ancho por 75cm de largo (97.5cm^2) para cubrir la totalidad de la pieza; en la relación de resina se consideró la previamente mencionada pero extendida a las cuatro caras del prisma, más dos capas extra para dos superficies paralelas ($08.\text{cm} + 0.4\text{cm}$). Esta mezcla se batió por 5 minutos y se aplicó sobre las superficies de la probeta, la tira de fibra se coloca de forma helicoidal tensándola desde la punta previamente adherida y se enrolla de forma perpendicular al eje principal manteniendo la inclinación a 20° hasta cubrir la probeta.

Una vez que la pieza está envuelta con la fibra de carbón, se sujeta con pinzas y se aplica otra capa de resina sobre dos superficies paralelas de la pieza. Se coloca al compuesto en el sistema de moldeo y se sujeta por las superficies impregnadas de resina y se deja reposar; se gira a 180° después de 4-6 horas para mejorar la homogeneidad de la pieza. Transcurridas 6 horas más se aplica la resina en las superficies opuestas y se repite el montaje en el molde. Finalmente, pasadas 8 horas se desmonta la pieza. En la tabla 15 se muestra proporción de mezcla epóxica para la segunda fase de refuerzo en piezas D695; en las figuras 72 – 77 se muestran las fotografías del procedimiento y las probetas finales.

Probeta	Largo	Ancho	Espesor	Volumen
D 695	12.5cm	1.3cm	1.2cm	19.5cm ³
Dosificación		Mezcla requerida	Catalizador	Resina
30 -100		25.15gr	7.54gr	17.61gr

TABLA 15 DOSIFICACIÓN MEZCLA RESINAS EPÓXICAS PROBETAS D 695 SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

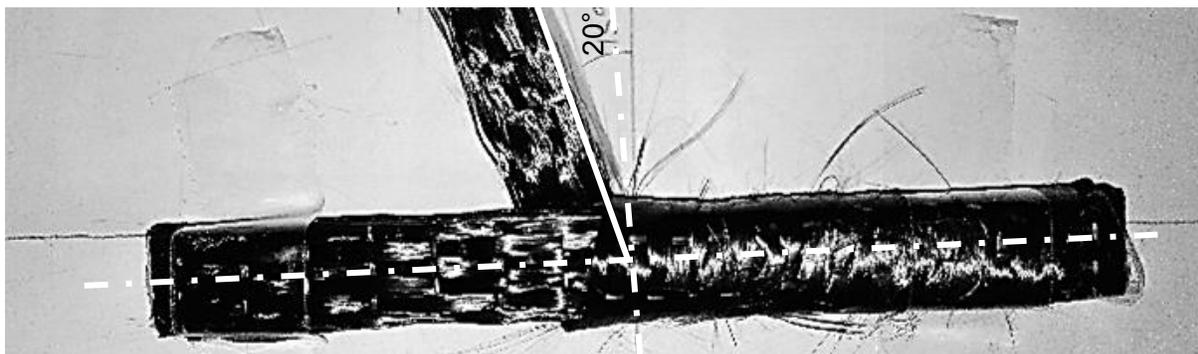


FIGURA 72 COLOCACIÓN HELICOIDAL DE LA FC CON ORIENTACIÓN DE 20° PERPENDICULAR AL EJE PRINCIPAL – SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

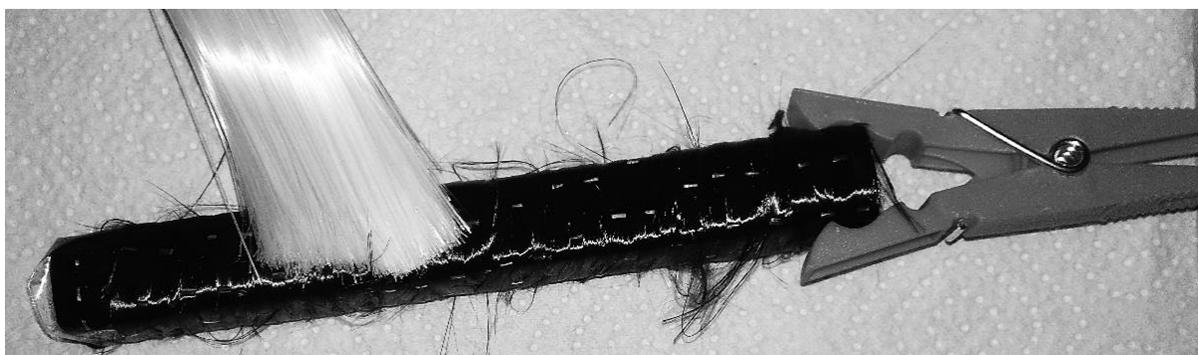


FIGURA 73 APLICACIÓN DE RESINA EN DOS SUPERFICIES PARALELAS.



FIGURA 74 SUPERFICIES CON RESINA ANTES DEL MONTAJE EN EL MOLDE.



FIGURA 75 PROBETAS D 695 SEGUNDA ETAPA DE REFUERZO.

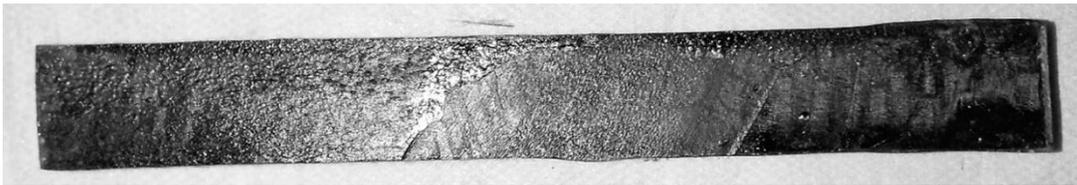


FIGURA 76 PROBETA FINAL D 695 TERMINADA (LONGITUDINAL).



FIGURA 77 PROBETA FINAL D 695 TERMINADA (TRANSVERSAL)

6.5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para que un material pueda ser considerado como apto para ser utilizado dentro de la industria constructora debe cumplir con propiedades específicas y estados de servicio mínimos ante una serie de ensayos químicos y mecánicos, establecidos por una autoridad en el campo, que comprobaran su comportamiento ante un esfuerzo medible o ante un fenómeno físico específico, para esta investigación se realizaron los siguientes ensayos:

- **Tensión:** deformación de la probeta por estiramiento uniaxial.
- **Compresión:** deformación de la probeta por compresión uniaxial.
- **Flexión:** deformación de la probeta por aplicación de una carga concentrada al centro y perpendicular al eje.
- **Inflamabilidad:** aplicación de fuego hasta descomposición de la probeta.
- **Adherencia:** rotura de la probeta por estiramiento uniaxial y estiramiento paralelo al eje.
- **Envejecimiento a la intemperie:** deterioro de la probeta por radiación UV y/o humedad en un entorno abierto.

Estos ensayos comprobaran la hipótesis de que el plástico ABS reforzado con fibra de carbón puede ser considerado como un elemento estructural; y de ser admisibles los resultados dichas pruebas determinaran también el tipo sistema en el cual el material podría exhibir un desempeño eficiente: vigas, columnas o armaduras.

7.0

EVALUACIÓN DEL COMPUESTO

MAGNITUDES

A través de la realización de ensayos mecánicos a las probetas será posible conocer la relación entre una fuerza exterior aplicada, las fuerzas internas resultantes (esfuerzos) y la deformación resultante; y con estos datos se determinara la deformación para una carga dada y las cargas máximas que pueden aplicarse a un espécimen de ABS + fibra de carbón. Las magnitudes que se requiere registrar para la caracterización del compuesto son: esfuerzo, deformación, elasticidad, plasticidad y la relación entre la deformación axial y la deformación lateral (*módulo de Poisson*).

Los ensayos mecánicos que se presentaran en este apartado se realizaron en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en cooperación con el Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM), durante una estancia de investigación de Septiembre a Diciembre del año 2016.

ESFUERZO

Intensidad de la distribución de fuerza que actúa sobre un área seccionada que se mantiene en equilibrio en cada segmento de un cuerpo: es el valor límite de la fuerza por unidad de área considerando un material continuo y cohesivo; y su magnitud depende del tipo de carga que actúa sobre el cuerpo y la orientación del elemento [39]. Para el caso del esfuerzo cortante, este se produce cuando las fuerzas aplicadas producen corte un deslizamiento con respecto de la otra, las fuerzas cortantes resistentes actúan en un plano paralelo a la carga aplicada [66]. En la ecuación 3 se muestra la relación esfuerzo/área, y en la figura 78 un esquema de esfuerzo de tensión y de compresión en un cuerpo.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [3]$$

σ = ESFUERZO
P= CARGA APLICADA
A= ÁREA SOBRE LA QUE ACTÚA LA CARGA

ECUACIÓN 3 EXPRESIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DEL ESFUERZO. *Fitzgerald.*

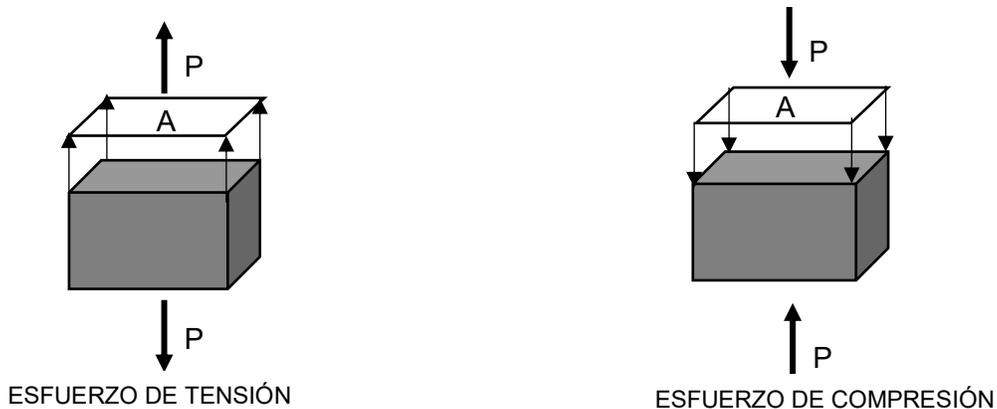


FIGURA 78 RELACIÓN FUERZA- ÁREA (ESFUERZO). *Figura realizada basado en Hibbeler y Fitzgerald.*

DEFORMACIÓN, ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD

Se le conoce como deformaciones a los cambios de longitud (elongación o contracción) que sufre una probeta de material al aplicarle una carga. La deformación total es cambio último en la longitud de un miembro y la deformación unitaria refiere al cambio de longitud por unidad de longitud. La relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria se establece a través de la Ley de Hooke⁷³ junto con la aplicación del módulo de elasticidad (E) [66]. De esa forma es posible realizar cálculos para definir el esfuerzo unitario.

La elasticidad es la propiedad de un material para deformarse ante la aplicación de una carga y al retirarla de regresar a su forma original, si no regresa a su forma original puede considerarse parcialmente elástico (presenta una deformación permanente). La ecuación 4 y 5 muestran la relación de la deformación total y unitaria y en la ecuación 6 la relación del esfuerzo unitario.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad [4]$$

δ = DEFORMACIÓN TOTAL
P= CARGA APLICADA
L= LONGITUD
A= ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL
E= MÓDULO DE ELASTICIDAD

ECUACIÓN 4 RELACIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN TOTAL. Fitzgerald.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad [5]$$

ϵ = DEFORMACIÓN UNITARIA
 δ = DEFORMACIÓN TOTAL
L= LONGITUD

ECUACIÓN 5 RELACIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA. Ídem.

$$\sigma = E\epsilon \quad [6]$$

σ = ESFUERZO UNITARIO
E= MÓDULO DE ELASTICIDAD
 ϵ = DEFORMACIÓN UNITARIA

ECUACIÓN 6 RELACIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DEL ESFUERZO UNITARIO. Ídem.

⁷³ Ley que establece que el esfuerzo es inversamente proporcional a la deformación unitaria. Ver capítulo 2.5, pág. 12. Libro Mecánica de materiales de Fitzgerald, W. Robert.

MÓDULO DE POISSON

Esta relación considera que cuando se aplica una fuerza a un elemento, la deformación que sufre no sólo se da en dirección de la carga (deformación axial) sino que también se producen deformaciones laterales. Las deformaciones laterales mantienen una relación estrecha con las deformaciones axiales. En la ecuación 7 se muestra la relación entre deformaciones laterales y axiales y en la figura 79 se muestra un esquema de dichas deformaciones.

$$\mu = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_A} \quad [7]$$

μ = MÓDULO DE POISSON
 ϵ_L = DEFORMACIÓN LATERAL
 ϵ_A = DEFORMACIÓN AXIAL

ECUACIÓN 7 EXPRESIÓN ALGEBRAICA PARA CALCULAR EL MÓDULO DE POISSON. Ídem.

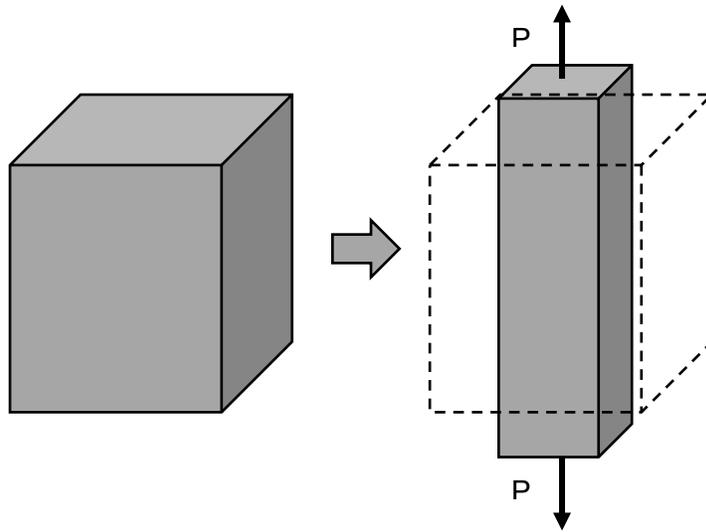


FIGURA 79 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA DEFORMACIÓN LATERAL Y AXIAL DE UN MATERIAL ANTE UN ESFUERZO DE TENSIÓN. Figura realizada basado en Hibbeler y Fitzgerald.

EQUIPO Y HERRAMIENTA

Máquina de pruebas universales “SUZPECAR” con capacidad de 50KN, modelo MEM-i03/SDC; mordazas de cuña para ensayos de tensión \neq 7-14; calibrador vernier, cinta métrica y pantalla protectora contra impacto. En la figura 80 se muestra la máquina de pruebas universales y en la figura 81 se muestran las mordazas.

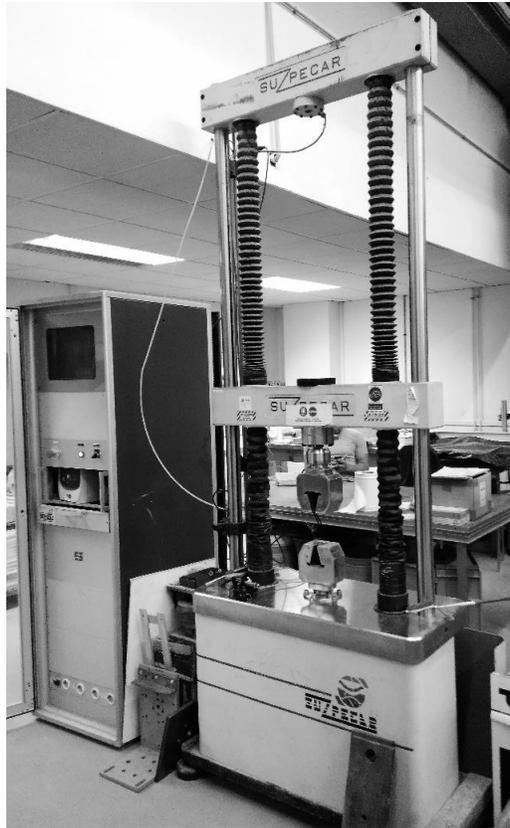


FIGURA 80 MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL SUZPERCAR DE 50KN. Fotografía tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), con fines de investigación.

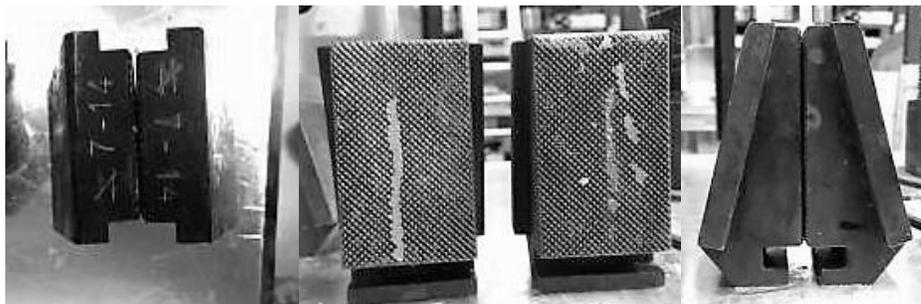


FIGURA 81 MORDAZAS DE CUÑA PARA ENSAYO DE TENSIÓN. Ídem.

7.1 ENSAYO DE TENSION

PROTOCOLO

El ensayo de tensión consiste en aplicar una carga uniaxial gradualmente creciente sobre uno de los extremos de la probeta mientras que el otro extremos se mantiene fijo, de forma que la carga aplicada se distribuya uniformemente a través del eje de la pieza hasta provocar una fractura. En la figura 82 se muestra el esquema del ensayo a tensión.

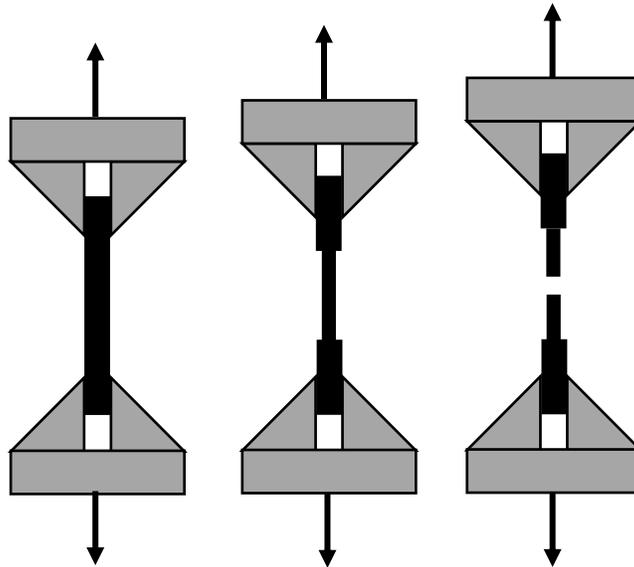


FIGURA 82 ENSAYO DE TENSION: APLICACION DE FUERZA UNIAXIAL HASTA FRACTURAR UNA PROBETA.

La primera parte del ensayo consiste en constatar que funciona correctamente, si todo está en orden a continuación se procede con el montaje de las piezas. La probeta a tensión debe colocarse en posición vertical dentro de las mordazas de la máquina, se debe sujetar primero del extremo inferior para mantenerla fija durante el ajuste de altura de la mordaza superior. El diseño de la probeta contempla una distancia de agarre promedio de 15 ± 5 cm entre los ejes perpendiculares de las mordazas. En la figura 83 se muestra el agarre mínimo de la probeta con las mordazas y en la figura 84 se muestra una pieza montada en la máquina de pruebas universales.

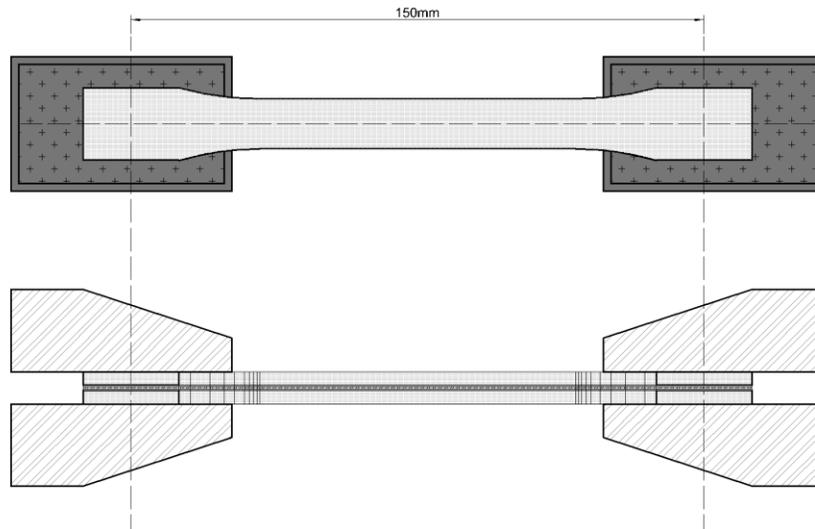


FIGURA 83 ÁREA DE MORDAZAS, ESQUEMA DE MONTAJE DE PROBETA.

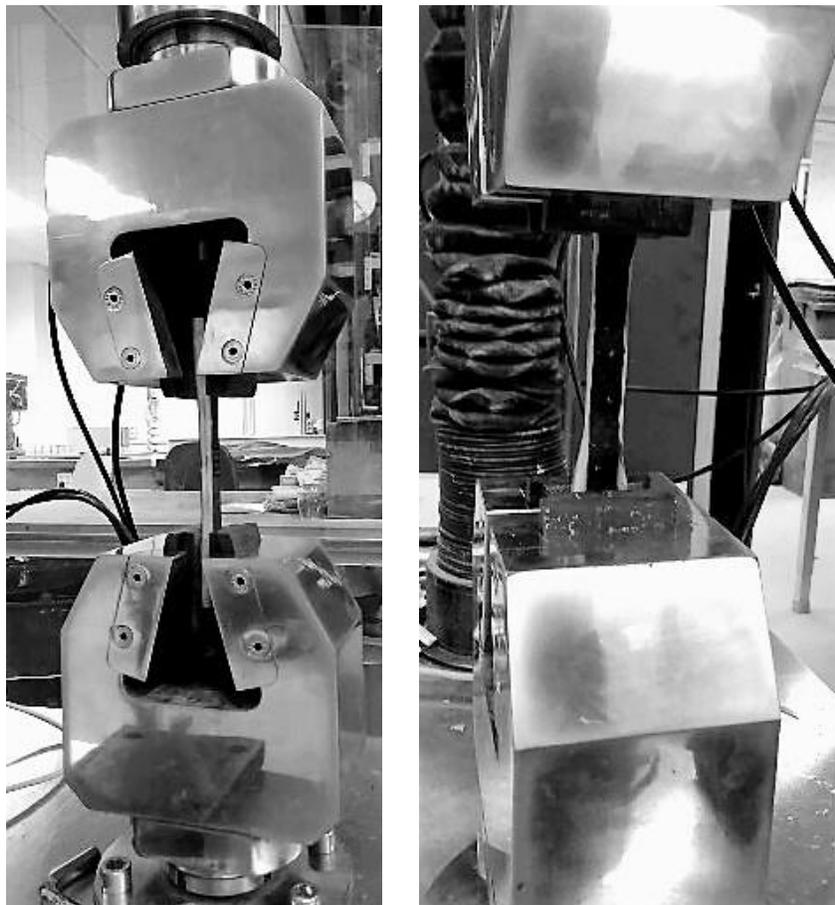


FIGURA 84 MONTAJE DE UNA PROBETA D630 LAMINADA EN LA MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSALES. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Una vez que está montada la probeta se debe proceder con la calibración de la máquina con los parámetros del ensayo: fuerza: 0.0KN; recorrido: 0.0mm; dirección del esfuerzo: rampa positiva (tensión); velocidad 5mm/min. En la figura 85 se muestra la captura de pantalla de la máquina calibrada.

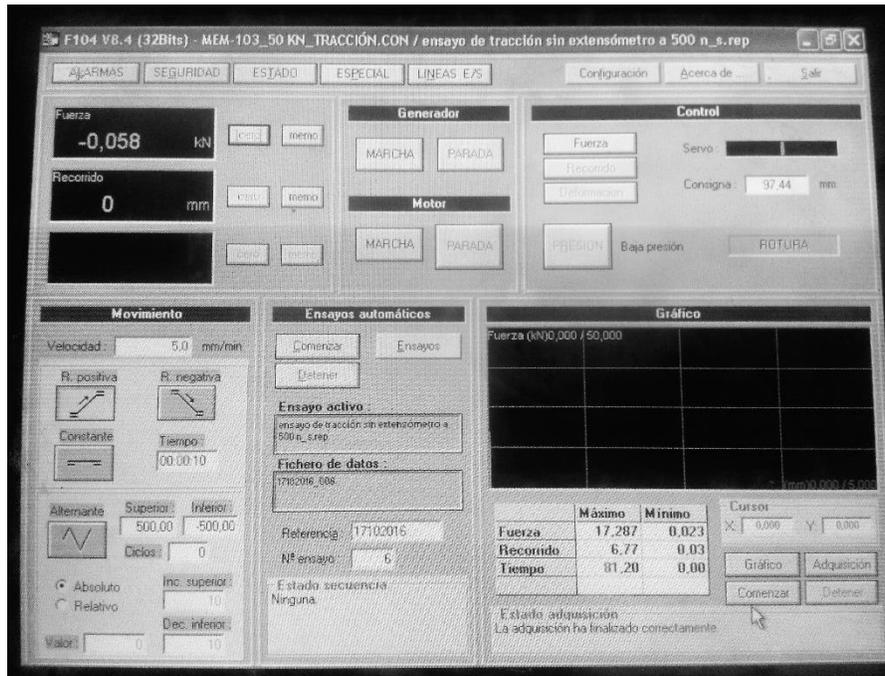


FIGURA 85 CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS. Ídem

ENSAYOS

Se comenzó por ensayar las probetas con laminado paralelo tipo sándwich bajo esfuerzo de tensión y posteriormente los especímenes confinados, para ambas piezas se utilizan los mismos estándares de calibración. El primer grupo de probetas fue sometido a cargas de tensión hasta alcanzar la ruptura, con lo que el esfuerzo de carga máximo se localizó dentro de un rango de 9KN hasta 12KN. Al segundo grupo de probetas se le aplicaron cargas similares y sus tensiones de rotura se localizaron dentro de un rango de 8KN hasta 17KN. En la figura 86 se muestran los especímenes ensayados del primer grupo y en la figura 87 los del segundo grupo, en ambos grupos se observa la fractura total y/o parcial del núcleo, la matriz y los tejidos de cada probeta.

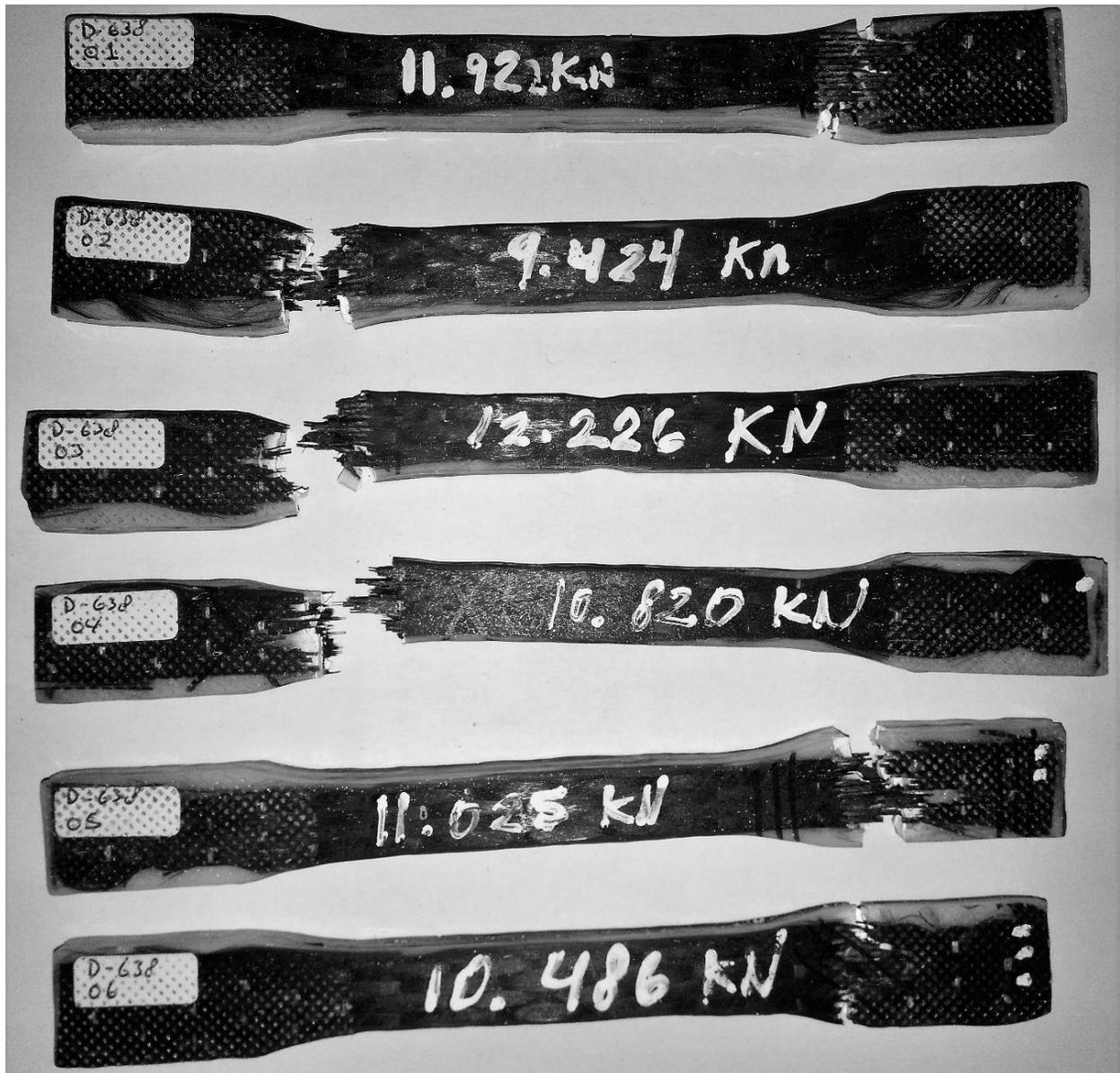


FIGURA 86 ENSAYOS PRIMER GRUPO DE PROBETAS D638, LAMINADO PARALELO TIPO SÁNDWICH.



FIGURA 87 ENSAYOS SEGUNDO GRUPO DE PROBETAS D638, LAMINADO POR CONFINAMIENTO.

ANÁLISIS

En ambos grupos la fractura se dió en uno de los extremos de las probetas, en el arco del estrechamiento. La repetición de la falla en la misma zona indica la influencia de un factor externo a las probetas, la causa probable de este fenómeno se relaciona con las mordazas puesto que en la zona de la falla del grupo uno (figura 87) se puede observar una ruptura irregular y violenta de los tejidos, provocada por la separación de tejidos y matriz del núcleo de ABS antes de la aplicación de la carga. Esta falla fue producto del impacto de las mordazas sobre la pieza al cerrarse y se propago durante el ensayo. Para el caso del grupo dos (figura 87), las fallas también se ven influenciadas de la misma forma por causa del impacto de las mordazas ya que este se transmite de una matriz a otra, sin embargo en este grupo las matrices manifestaron tres tipos de comportamiento:

- Separación total entre la matriz perpendicular y la matriz a 20°, con ruptura uniforme de tejidos.
- Separación parcial la matriz perpendicular y la matriz a 20°, con ruptura irregular de tejidos.
- Fractura uniforme de marices con ruptura uniforme de tejidos.

El primer caso es una falla en la adherencia de la matriz a 20°, aunque estas piezas no alcanzaron la ruptura sirven como parámetros del comportamiento de la fibra orientada a 20° y como evaluación de la adherencia entre refuerzo – matriz – polímero. El segundo caso es una falla por adherencia de la matriz a 20° en la zona de impacto de las mordazas, esta matriz se rompió gradualmente y al suceder transmitió una excentricidad hacia la matriz perpendicular que beneficio separación del refuerzo del núcleo y provoco una falla similar a las del primer grupo. El último caso expone una adherencia aceptable entre materiales y la forma uniforme de la rotura indica que la falla se dio por la propagación de una grieta en la zona de impacto de las mordazas. En las figuras 88 – 90 se muestran los detalles de las fracturas descritas en ambos grupos de probetas.

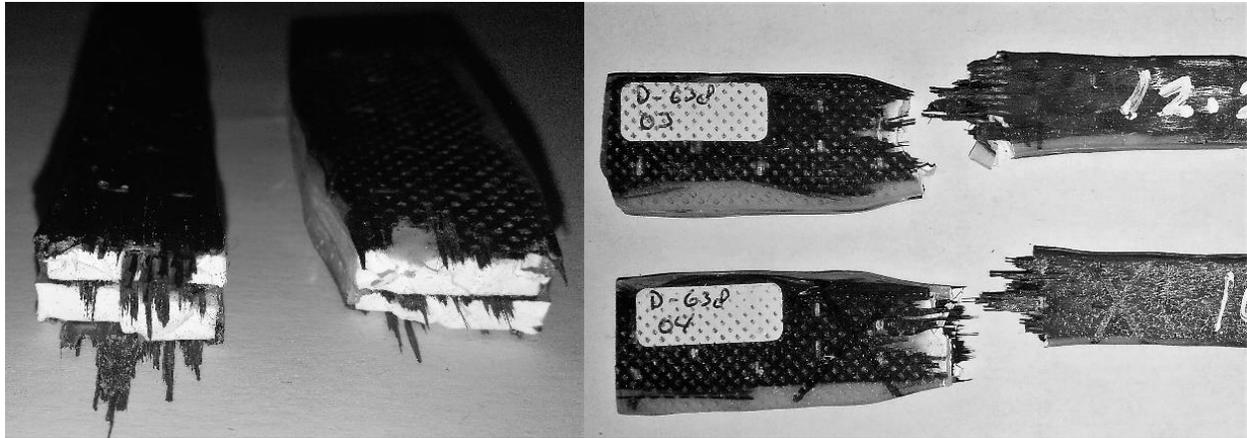


FIGURA 88 FRACTURA PROBETAS LAMINADAS TIPO SÁNDWICH.



FIGURA 89 FRACTURA PROBETA LAMINADA POR CONFINAMIENTO A 20°- ADHERENCIA PARCIAL.



FIGURA 90 FRACTURA PROBETA LAMINADA POR CONFINAMIENTO A 20°- ADHERENCIA HOMOGÉNEA.

Ambos grupos presentan fallas frágiles aunque en el área de la ruptura se pueden ver decoloraciones en el plástico ABS⁷⁴, cuya longitud refiere a un breve estado de fluencia antes de que se formen los puntos de estricción. No obstante el refuerzo y la matriz restringen el comportamiento dúctil del polímero por lo que se puede decir que el material manifiesta un comportamiento completamente plástico. Otra causa de falla que se puede observar en algunas de las probetas es el grado de homogeneidad entre sus componentes: presencia de tejidos secos, superficies con brillo relativo (áreas sin adherencia), las aristas irregulares y huecos (transmisión discontinua de cargas), todos son factores que intervienen en la distribución del esfuerzo durante la aplicación de la carga. Con respecto a los aumentos en la fuerza de tensión necesaria para la fractura de los especímenes, se deben a la transmisión de cargas de la matriz epóxica con refuerzo a 20°, principalmente porque que la otra matriz se encuentra completamente inmersa en esta; y la uniformidad de la ruptura de la matriz con tejido a 20° se debe a que la matriz también restringe la alineación de las fibras haciéndolas vulnerables a la carga. En la figura 91 se muestra una probeta con tejido seco y en la figura 92 el detalle de una fractura homogénea.

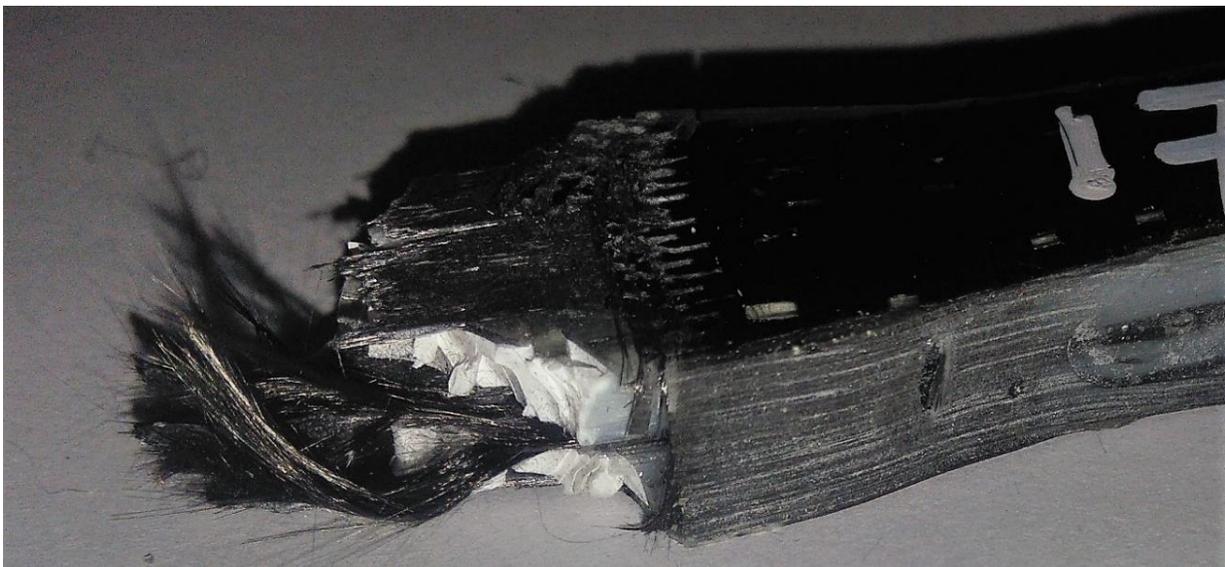


FIGURA 91 PROBETA CON REFUERZO A 20°, FIBRAS SECAS (SIN RESINA EPÓXICA).

⁷⁴ En los polímeros termoplásticos, la decoloración ante un esfuerzo de tensión significa que la orientación de las moléculas se dio hacia una dirección, es decir que empezó a fluir, causando una deformación irreversible. Por las propiedades de estos materiales este tipo de deformaciones suelen ser de longitudes extensas respecto de su estado original.

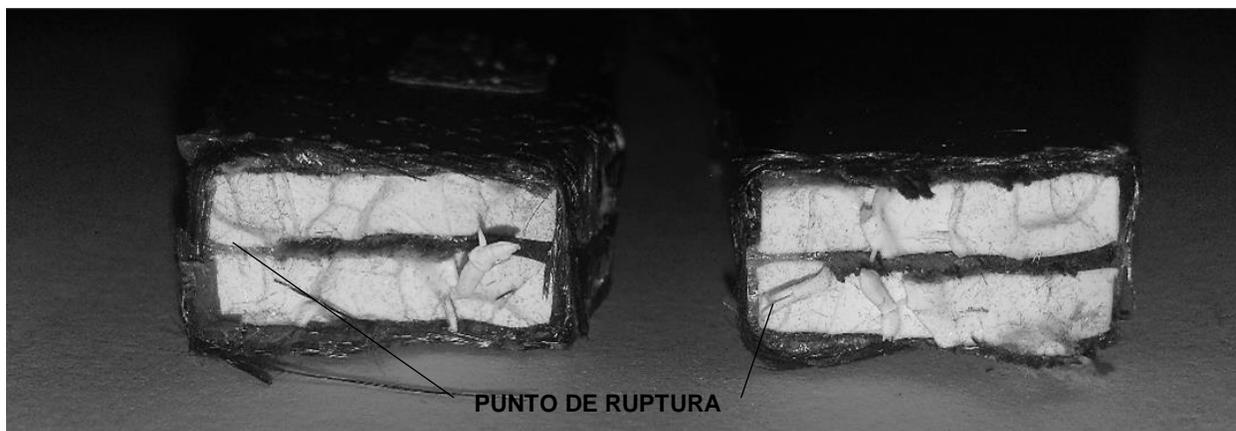


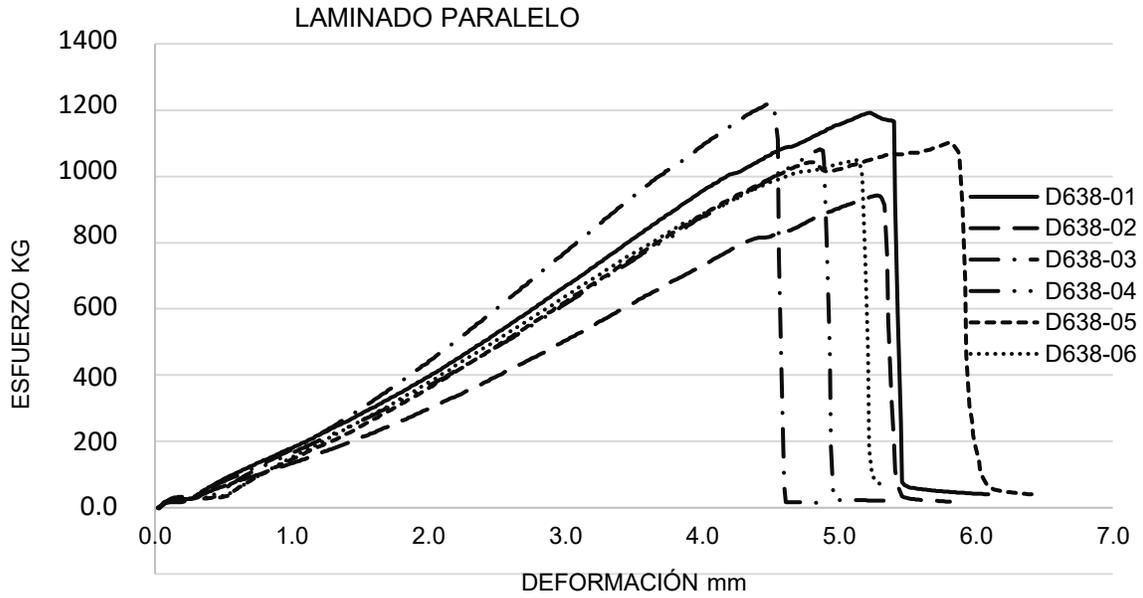
FIGURA 92 PROBETA CON REFUERZO A 20°, DETALLE FRACTURA.

RESULTADOS

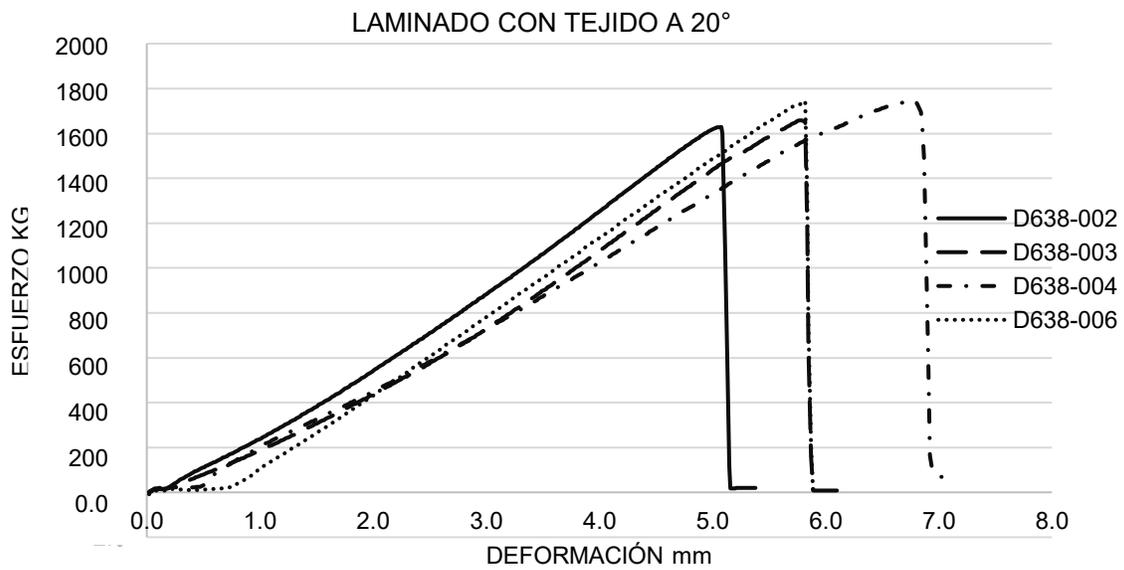
Se presentan los datos procesados que se obtuvieron en los ensayos de esfuerzo de tensión, en la tabla 16 se muestran los valores de la relación esfuerzo/deformación que registro la máquina de pruebas universales, en las gráficas 5 y 6 se muestra el comportamiento mecánico de los grupos de probetas (la gráfica 6 sólo considera cuatro especímenes puesto que los otros dos se utilizaron como parámetros de adherencia); y en la tabla 17 se muestran los cálculos para determinar las propiedades mecánicas.

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D638-01	11.922	1,192	5.23	62.60
D638-02	9.424	942	5.28	63.20
D638-03	12.226	1,223	4.50	53.80
D638-04	10.820	1,082	4.86	58.20
D638-05	11.025	1,103	5.82	69.60
D638-06	10.486	1,049	5.14	61.40
D638-002	16.286	1,629	5.08	60.80
D638-003	16.578	1,658	5.79	69.40
D638-004	17.461	1,746	6.79	81.40
D638-006	17.449	1,745	5.82	69.80

TABLA 16 RESULTADOS DE ENSAYOS A TENSIÓN.



GRÁFICA 5 COMPORTAMIENTO FRÁGIL, ESFUERZO/DEFORMACIÓN DE PROBETAS D638 LAMINADAS PARALELAMENTE.



GRÁFICA 6 COMPORTAMIENTO FRÁGIL, ESFUERZO/DEFORMACIÓN DE PROBETAS D638 LAMINADAS CON TEJIDOS A 20°.

Probeta	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Deformación total (cm)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo unitario (Kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Porcentaje de elongación %
LAMINADO PARALELO								
D638-01	1.30	1,192	0.52	916.70	916.70	0.032	28,920.85	3.17
D638-02	1.23	942	0.53	767.69	767.69	0.032	23,990.25	3.20
D638-03	1.17	1,223	0.45	1,041.01	1,041.01	0.027	38,170.48	2.73
D638-04	1.12	1,082	0.49	963.09	963.09	0.029	32,697.36	2.95
D638-05	1.55	1,103	0.58	711.18	711.18	0.035	20,162.23	3.53
D638-06	1.45	1,049	0.51	724.56	724.56	0.031	23,259.35	3.12
LAMINADOS CON TEJIDO A 20°								
D638-002	1.55	1,629	0.51	1,052.26	1,052.26	0.031	34,177.88	3.08
D638-003	1.49	1,658	0.58	1,113.27	1,113.27	0.035	31,725.45	3.51
D638-004	1.78	1,746	0.68	979.21	979.21	0.041	23,795.14	4.12
D638-006	1.44	1,745	0.58	1,214.36	1,214.36	0.035	34,427.70	3.53

TABLA 17 CÁLCULOS: ESFUERZO/ DEFORMACIÓN PROBETAS D638

Para obtener el desempeño de cada grupo se deben calcular los valores promedio, a través de la media aritmética " \bar{x} ", a través de este cálculo será posible graficar la tendencia en el comportamiento mecánico de cada grupo con el fin de homologar las propiedades del material compuesto. En la ecuación 8 se muestran las expresiones para obtener \bar{x} ; en la tabla 18 se muestran los resultados de \bar{x} .

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i x_i \quad [8]$$

\bar{x} = MEDIA ARITMÉTICA

f_i = FRECUENCIA

x_i = VARIABLE

n = NÚMERO DE VARIANTES DIFERENTES

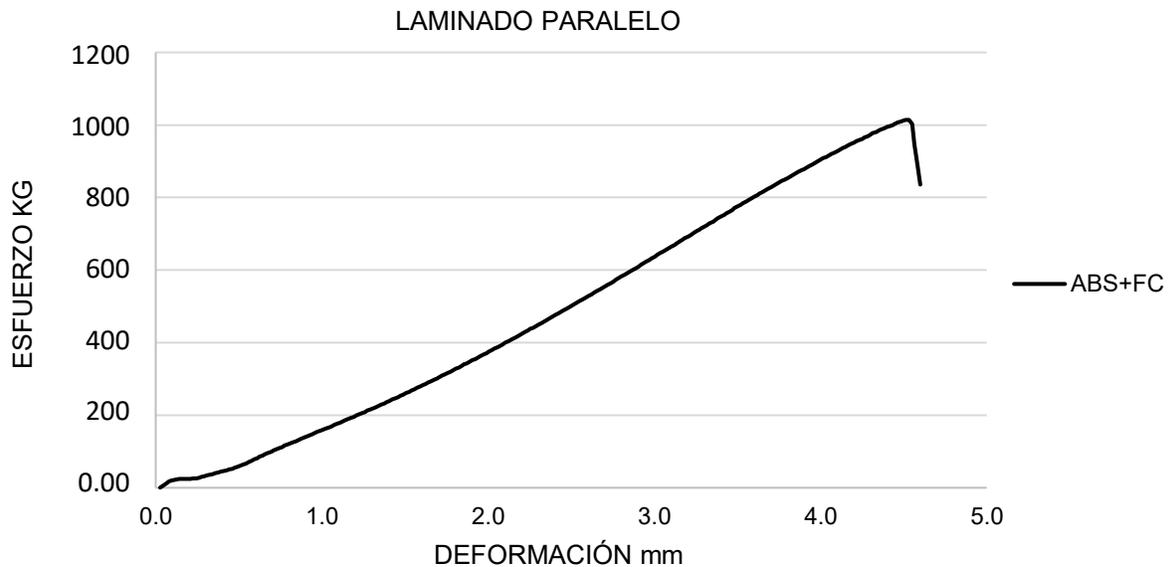
N = FRECUENCIA TOTAL

ECUACIÓN 8 EXPRESIÓN ALGEBRAICA PARA EL CÁLCULO DE LA MEDIA ARITMÉTICA. [68]

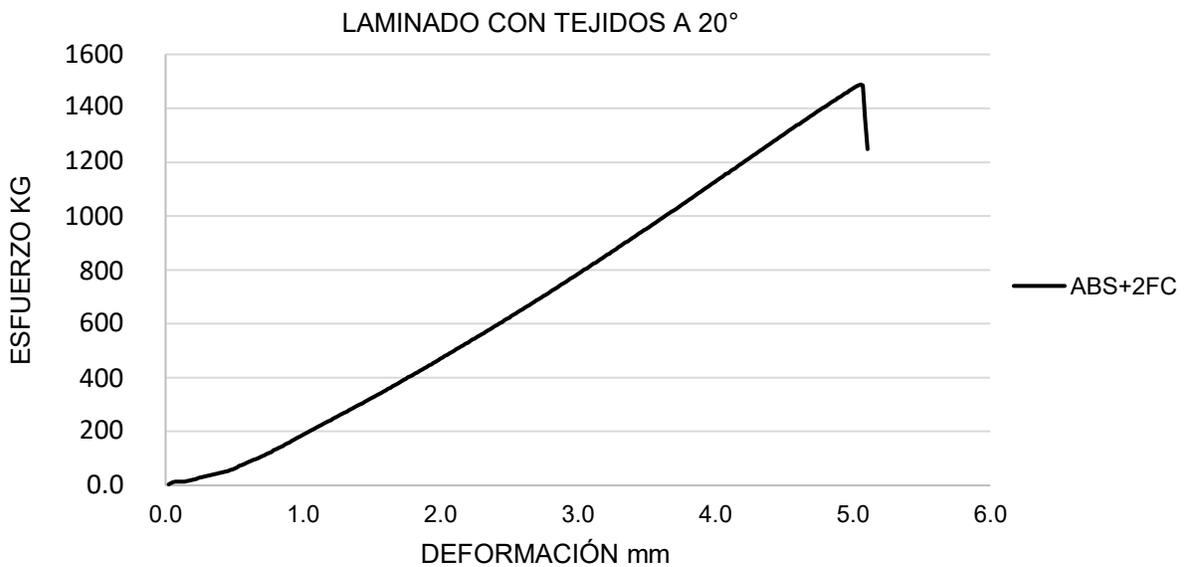
	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (kg/cm ²)	Módulo de Young (kg/cm ²)	Porcentaje de elongación %
PROBETAS LAMINADAS				
Media aritmética	854.0385	0.031	27,866.7533	3.1141
PROBETAS CONFINADAS				
Media aritmética	1,089.7761	0.0356	31,031.5426	3.5576

TABLA 18 CÁLCULO DE \bar{x} .

Con base en la tabla 18, se observa que ambos casos tuvieron un rendimiento aceptable, aunque la distribución y transmisión de cargas de las probetas con laminado paralelo muestran una resistencia menor; y los valores del porcentaje de elongación y deformación unitaria indican una tendencia frágil en ambos grupos. En las gráficas 7 y 8 se muestra la tendencia del comportamiento mecánico por grupo.



GRÁFICA 7 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DEL COMPUESTO ABS+FC CON REFUERZO PARALELO.



GRÁFICA 8 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DEL COMPUESTO ABS+FC ORIENTACIÓN COMBINADA DEL REFUERZOS.

CONCLUSIONES

En este ensayo comprobó el incremento de la resistencia a la deformación uniaxial por tensión del compuesto ABS reforzado con fibra de carbón orientada en paralelo al eje; posteriormente se agregó un segundo refuerzo colocado con una inclinación de 20° respecto de un eje perpendicular, condición que supero el umbral de servicio de la pieza anterior. La matriz envuelve por completo al termoplástico y este queda, mecánicamente, subordinado a las propiedades de la resina y el tejido, en la tabla 19 se muestra el resumen de propiedades.

	Esfuerzo unitario (kg/cm²)	Deformación unitaria (kg/cm²)	Módulo de Young (kg/cm²)	Porcentaje de elongación %
Laminado paralelo	854.0385	0.031	27,866.7533	3.1141
Tejidos a 20°	1,089.7761	0.0356	31,031.5426	3.5576

TABLA 19 PROPIEDADES MECÁNICAS PROBETAS D-638.

En correspondencia con el texto, gráficas y tabla anteriores se establecen las siguientes conclusiones de los ensayos a tensión;

- La combinación de termoplástico ABS, resina epóxica y fibra de carbón generan un material compuesto frágil a tensión.
- De los tres elementos que componen del material, la aportación imperante del termoplástico ABS es servir como relleno reductor de peso y materiales.
- La matriz polimérica y la fase dispersa de fibra de carbón, aplicadas paralelamente al eje de un elemento ABS aumenta 10 veces su resistencia a tensión.
- La aplicación de una segunda matriz de refuerzo orientada a 15° - 20° respecto de un eje perpendicular de un elemento de ABS incrementa su resistencia a tensión hasta 15 veces.
- Cuando una probeta del compuesto recibe la carga de tensión, los tejidos de la matriz con refuerzo perpendicular a 20° intentan alinearse en dirección del esfuerzo y presentan una fuerza de oposición mayor debido a que se encuentran atrapadas en la resina y por lo tanto proveen a la pieza de una mayor fuerza opositora respecto de las probetas con un solo refuerzo paralelo.

7.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

PROTOCOLO

El ensayo de compresión consiste en aplicar una carga uniaxial a velocidad constante sobre la pieza en uno de sus extremos y mantenerla fija del otro a modo de que la carga aplicada fluya uniformemente a través del eje de la pieza, hasta que lograr la deformación máxima por fractura. En la figura 93 se muestra el esquema del ensayo a compresión.

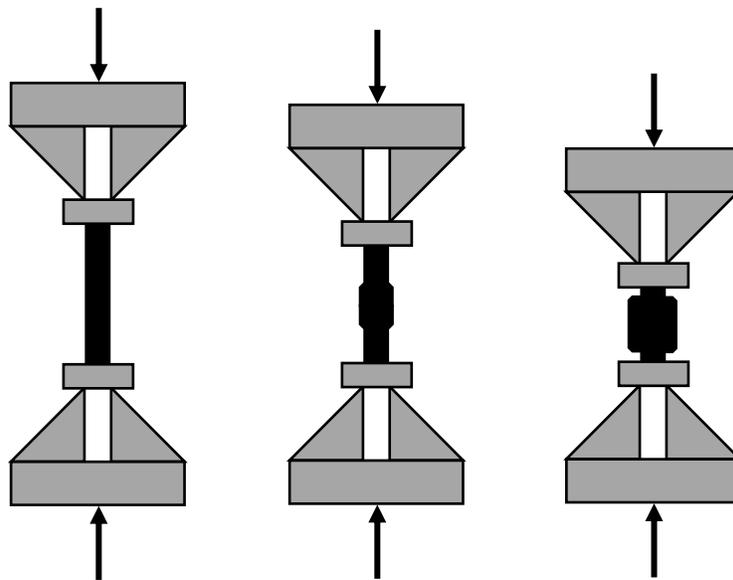


FIGURA 93 ENSAYO DE COMPRESIÓN: APLICACIÓN DE FUERZA UNIAXIAL HASTA LA DEFORMACIÓN MÁXIMA.

En este ensayo el esfuerzo se aplica a través de la mordaza superior, el montaje se realiza colocando una base metálica en la mordaza inferior generando una superficie de contacto uniforme para las probetas. Una vez montada la pieza se le coloca otra sección metálica en el extremo opuesto, la cual queda sujeta con la mordaza superior; la mordaza se coloca hasta estar parcialmente en contacto con la pieza de acero y adicional mente se coloca un cilindro metálico y una pantalla como medidas de seguridad ante el riesgo de que la pieza salga proyectada. En la figura 94 se muestra una pieza montada. Una vez cumplida esta condición se procede a calibrar la máquina.



FIGURA 94 MONTAJE PROBETA D695. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

La calibración de la máquina se realiza con los parámetros: fuerza: 0.0KN; recorrido: 0.0mm; dirección del esfuerzo: rampa negativa (compresión); velocidad 5mm/min. En la figura 95 se muestra la captura de pantalla de la máquina calibrada.

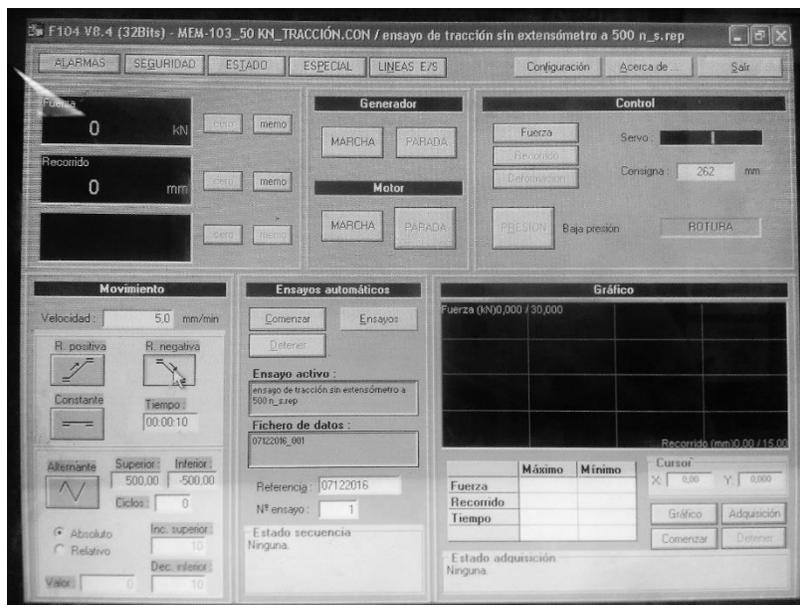


FIGURA 95 CALIBRACIÓN DE MÁQUINA MEDIANTE SOFTWARE. Ídem.

ENSAYOS

Las probetas fueron sometidas a compresión hasta alcanzar la falla con las siguientes características: la carga de compresión se mantuvo constante con una velocidad de 5mm/min con lo que el esfuerzo de compresión máximo de las probetas se localizó dentro de un rango de 8KN y 9KN, en la figura 96 se muestran las piezas probadas en el orden de los ensayos.

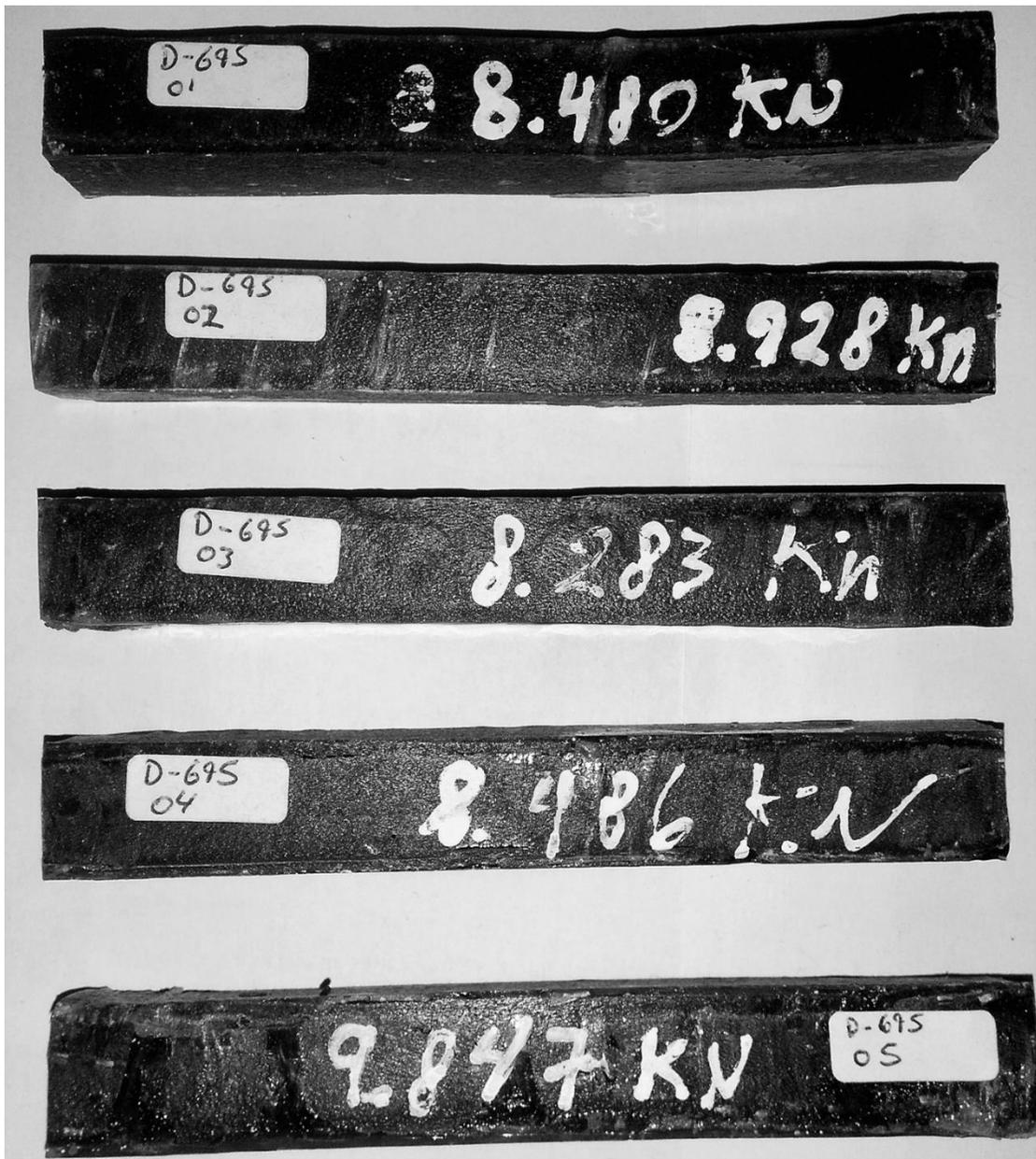


FIGURA 96 ENSAYOS DE PROBETAS D695 LAMINADAS Y CONFINADAS.

En la figura 96 se puede observar que las muestras no sufrieron deformaciones severas durante el ensayo, esto se debe a que los ensayos se detuvieron por razones de seguridad una vez que la pieza alcanzo el esfuerzo máximo de carga (acorde con las lecturas del software), para prevenir que la probeta saliera proyectada.

En correspondencia con las zonas de falla, todos los especímenes exhiben una fractura perpendicular al eje causada por pandeo de la probeta. El careado de las piezas se realizó a mano por lo que la horizontalidad de las superficies de contacto es la primera causa probable de falla. Al comenzar el ensayo la carga se aplicó sobre las aristas en primer plano generando un esfuerzo excéntrico y conforme se desarrolló el ensayo la pieza se pandeo hasta ajustarse y tener una superficie de contacto estable, en la figura 97 se muestran probetas con delamianción y falla por pandeo.



FIGURA 97 PROBETAS D 695 CON DEFORMACIONES POR PANDEO LOCAL.

Durante la transmisión del esfuerzo, la aparición de zonas decoloradas refiere a la separación de la matriz y el tejido. En estas áreas convergen la carga aplicada y la fuerza de oposición generando un punto de constricción que causo el falló de la probeta por pandeo y la fractura de la resina. En la figura 98 se muestra la falla de la probeta D965-01.

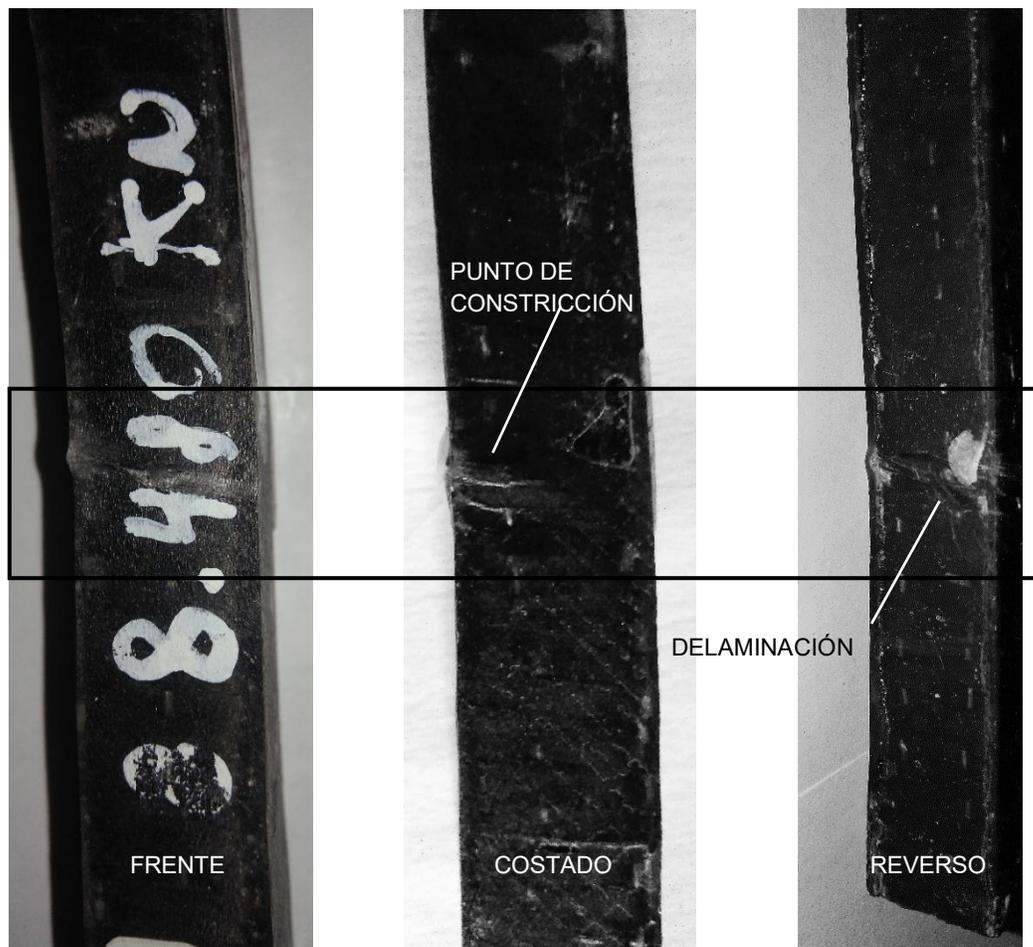


FIGURA 98 PROBETA D695-01 FALLA POR PANDEO LOCAL.

La delaminación en las probetas con superficie irregular se dio desde el comienzo del ensayo, el punto de constricción fue la arista que recibió primero la carga y esta tuvo un comportamiento excéntrico que se transmitió sólo a través de la resina y el tejido provocando el deslizamiento simultáneo de las matrices. En la figura 99 se observa la decoloración de las aristas y la deformación que sufrió en forma de pliegues.

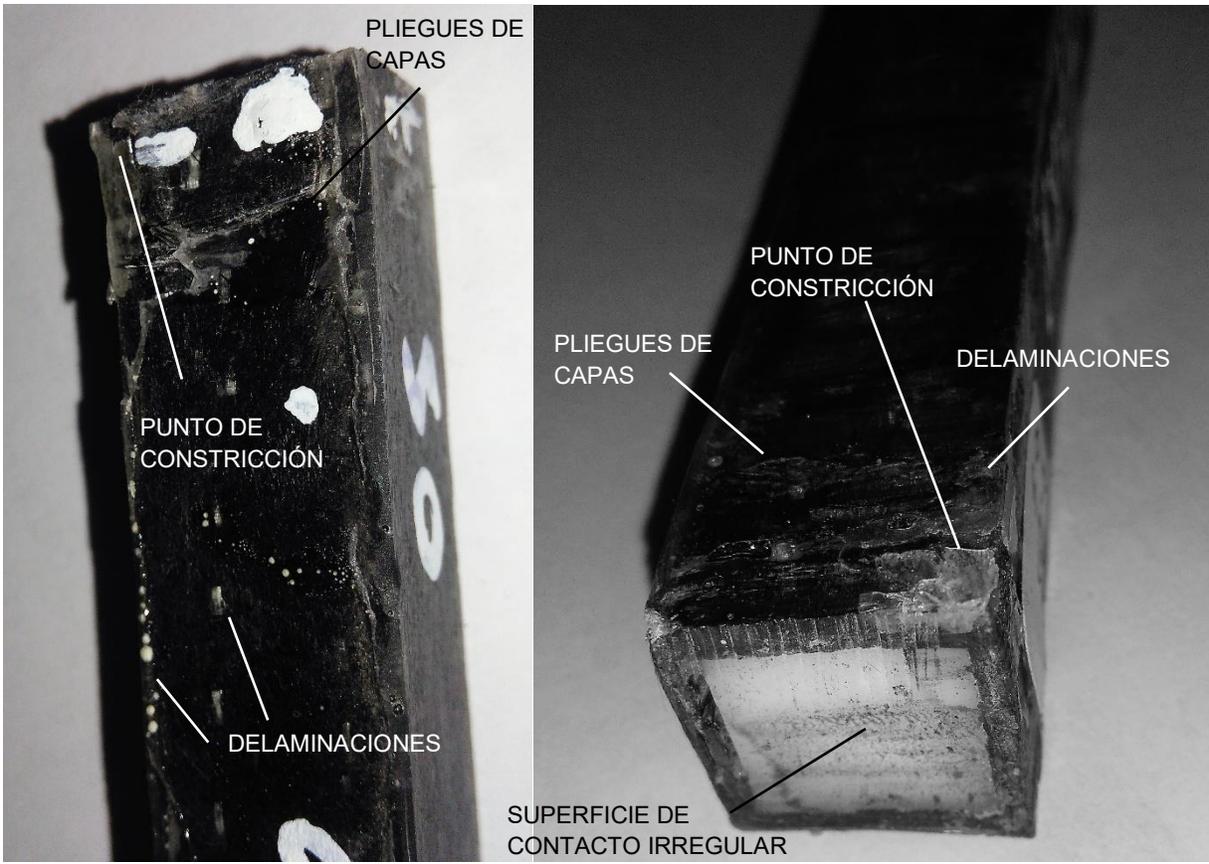


FIGURA 99 PROBETA D695-05 FALLA POR PANDEO LOCAL EN LOS EXTREMOS.

PIEZAS CORTAS

Como se mencionó, por motivos de seguridad no se llevó a cabo el ensayo hasta la destrucción de las probetas. Sin embargo, con el objetivo de ejecutar el ensayo en su totalidad se cortaron dos probetas en tres secciones cada una, de tal forma que se redujera el riesgo de proyección durante el ensayo. El procedimiento de montaje y los parámetros del ensayo son los mismos que se utilizaron con las piezas largas. En la figura 100 se muestra el montaje de una pieza corta y en la figura 101 las probetas después de los ensayos.



FIGURA 100 PROBETA D695 CORTA PREPARADA PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC).



FIGURA 101 PROBETAS D695 CORTAS DESPUÉS DE LOS ENSAYOS.

Las probetas cortas (D695) mostraron un comportamiento de falla por pandeo local con valores de resistencia de 10KN – 12.8KN. De la misma forma que las probetas largas, las irregularidades en las superficies de contacto influyen en el pandeo de las piezas, en estos especímenes se puede observar que los deslizamientos de matrices se transmiten desde las aristas hacia el cuerpo prismático separando la matriz con tejido a 20° cuando el esfuerzo se distribuye uniformemente sobre la pieza; las áreas delaminadas se transforman en puntos de constricción.

En las zonas delaminadas se observa que la matriz tiene un breve comportamiento dúctil (fluye antes de romperse) y a medida que se aplica la carga el núcleo de ABS se comprime en paralelo con las zonas no delaminadas hasta alcanzar la fractura de las matrices. En las figuras 102 y 103 se muestra probetas D695 deformándose durante los ensayos.

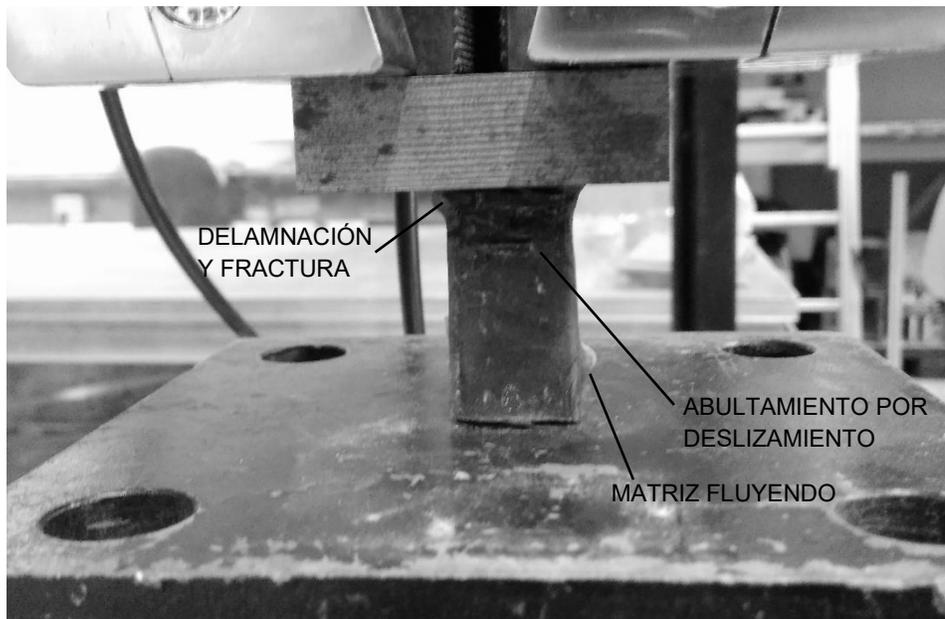


FIGURA 102 PROBETA D695-103 DURANTE ENSAYO DE COMPRESIÓN. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

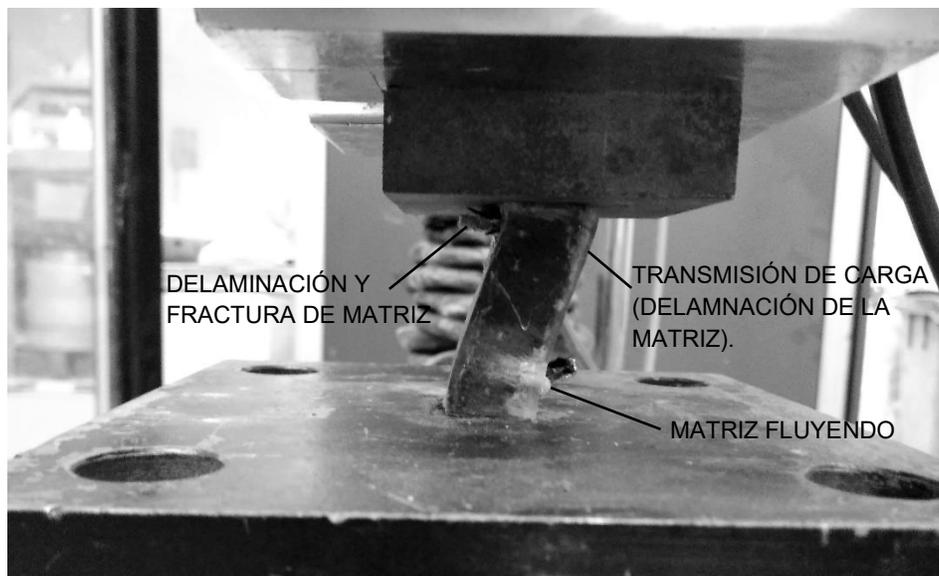


FIGURA 103 PROBETA D695-104 DURANTE ENSAYO DE COMPRESIÓN. Ídem.

ANÁLISIS

El comportamiento de las probetas D695, largas y cortas, se ve influenciado por la homogeneidad de las superficies de contacto y ambos grupos presentan fallas por pandeo y torsión; estos fenómenos se pueden apreciar a detalle en los especímenes cortos. Si se considera un sistema de vectores en donde las aristas de la superficie de contacto forman los ejes “X” y “Y” y el vértice donde se aplicó la carga como origen y eje “Z”; entonces se puede describir gráficamente la distribución del esfuerzo durante el ajuste de la pieza con superficie irregular durante el ensayo, en la figura 104 se muestra la probeta y el esquema vectorial de fuerzas.

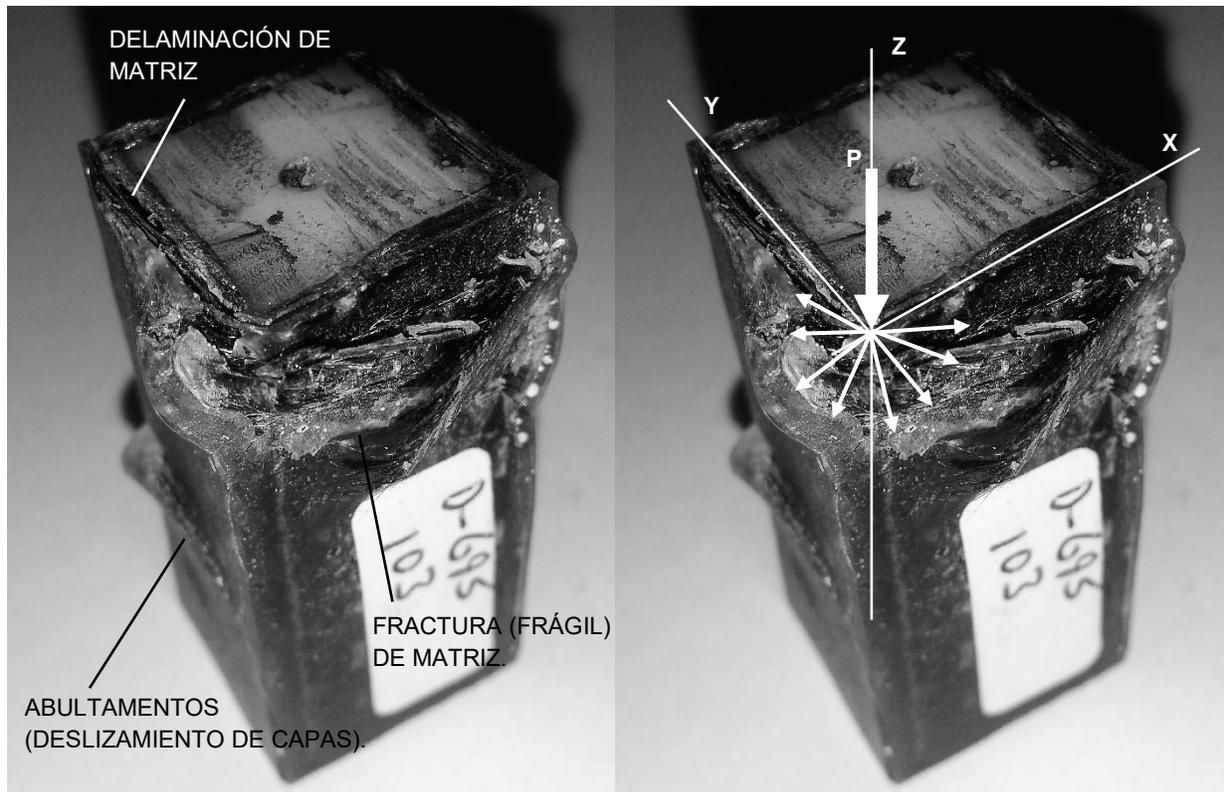


FIGURA 104 PROBETA D695-103 Y DIAGRAMA VECTORIAL DE FUERZAS.

En la figura 104 se aprecia que la fractura de la matriz se dio en una de las aristas (eje Z) y a partir de esa fractura se dio el desprendimiento de la segunda matriz en una de las caras del prisma (eje X).

La dirección del pandeo indica que a partir de esta primera deformación se generó una zona de constricción perpendicular a la cara opuesta lo que provocó el deslizamiento y fractura de ambas matrices. En la figura 105 se muestra la dirección del pandeo y los detalles de la fractura de la probeta D695-103.

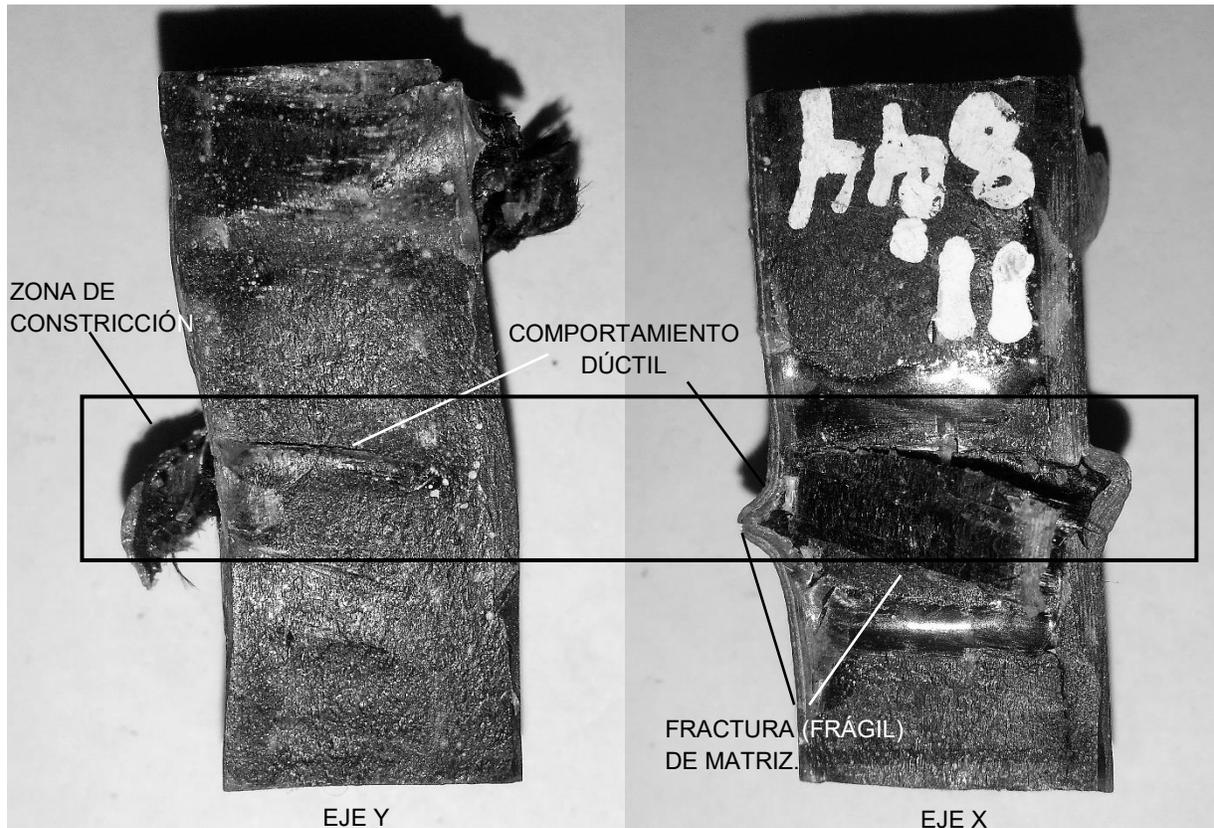


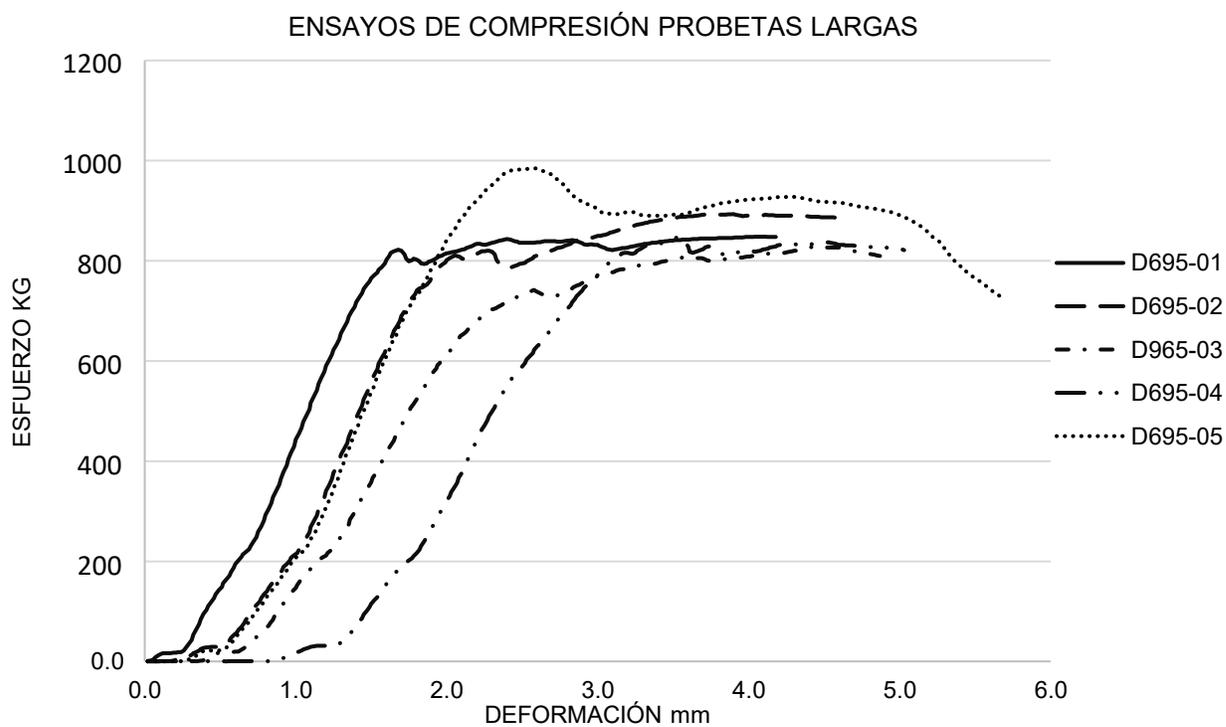
FIGURA 105 PROBETA D695-103 FALLA POR PANDEO LOCAL.

RESULTADOS

A continuación se presentan los datos procesados, en la tabla 20 se muestran los valores obtenidos en los ensayos, en las gráficas 9 y 10 se muestra el comportamiento mecánico de los grupos de probetas; y en la tabla 21 se muestran los cálculos para determinar las propiedades mecánicas. En la tabla 22 se muestran los valores promedio del material obtenidos a través de la media aritmética " \bar{x} ".

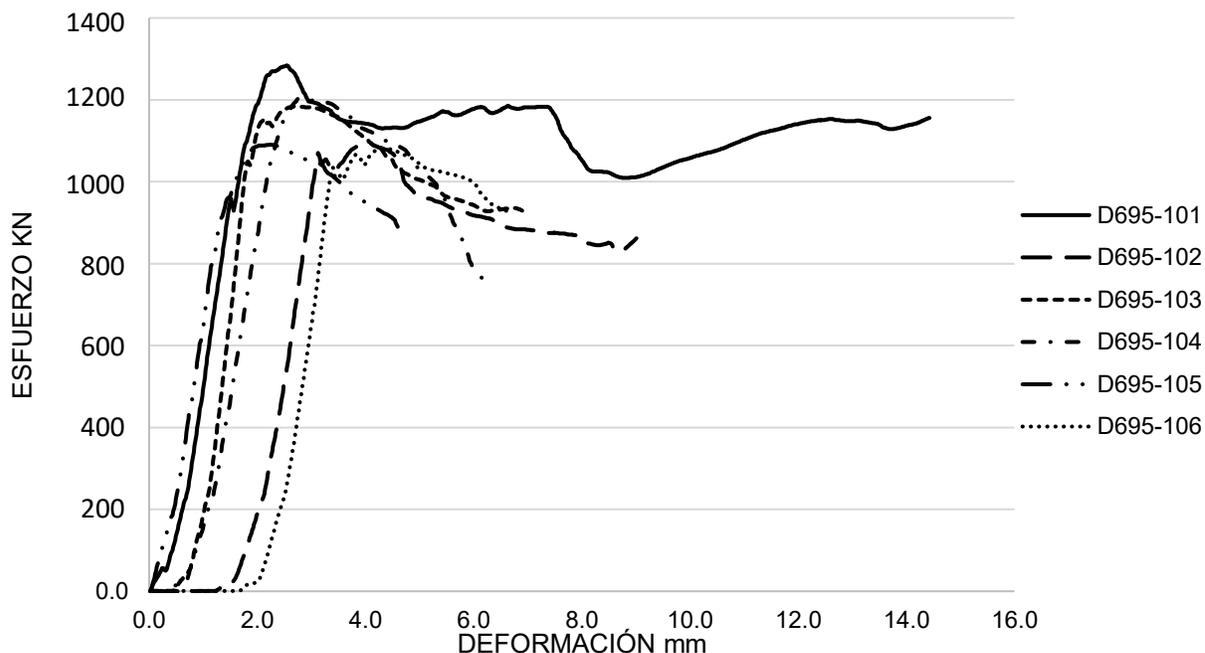
Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D695-01	8.480	848	4.18	50.00
D695-02	8.928	892.8	4.63	55.60
D695-03	8.283	828.3	4.87	58.40
D695-04	8.486	848.6	5.03	60.40
D695-05	9.847	984.7	5.69	68.40
D695-101	12.841	1,284.1	14.43	173.40
D695-102	10.952	1,095.2	9.01	108.20
D695-103	11.844	1,184.4	6.9	83.00
D695-104	12.067	1,206.7	6.29	75.40
D695-105	10.906	1,090.6	4.77	57.20
D695-106	10.804	1,080.4	6.67	80.00

TABLA 20 RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN.



GRÁFICA 9 COMPORTAMIENTO DÚCTIL, RELACIÓN ESFUERZO/DEFORMACIÓN PROBETAS LAMINADAS Y CONFINADAS D695 LARGAS.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN PROBETAS CORTAS



GRÁFICA 10 COMPORTAMIENTO DÚCTIL, RELACIÓN ESFUERZO/DEFORMACIÓN PROBETAS LAMINADAS Y CONFINADAS D695 CORTAS.

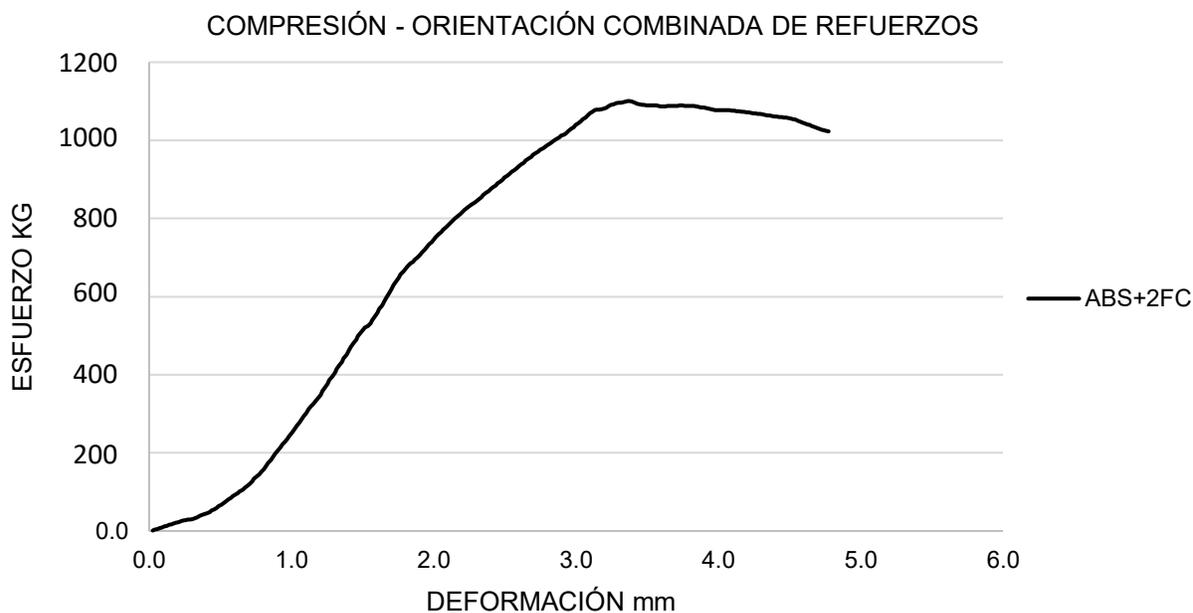
Probeta	Área (cm ²)	Carga (kg)	Deformación total (cm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm)	Módulo de Young (kg/cm ²)	Módulo de Poisson	Porcentaje de elongación %
PROBETAS LARGAS									
D695-01	2.69	848.000	0.418	314.9431	314.943	0.030	10,472.988	0.528623	3.01
D695-02	2.83	892.800	0.463	315.2066	315.207	0.033	9,463.006	0.615330	3.33
D695-03	2.90	828.300	0.487	285.6433	285.643	0.035	8,152.859	0.078574	3.50
D695-04	2.75	848.600	0.503	308.2444	308.244	0.036	8,518.087	0.199718	3.62
D695-05	2.95	984.700	0.569	333.6696	333.670	0.041	8,151.155	0.247834	4.09
PROBETAS CORTAS									
D695-101	2.81	1,284.100	1.443	456.5406	456.541	0.104	4,397.723	0.208298	10.38
D695-102	2.65	1,095.200	0.901	412.7505	412.750	0.065	6,367.627	0.569353	6.48
D695-103	2.78	1,184.400	0.690	426.7874	426.787	0.050	8,597.602	0.658201	4.96
D695-104	2.78	1,206.700	0.629	433.3150	433.315	0.045	9,575.642	0.303971	4.53
D695-105	2.98	1,090.600	0.477	365.9854	365.985	0.034	10,664.984	0.554297	3.43
D695-106	2.99	1,080.400	0.667	361.6398	361.640	0.048	7,536.422	0.680168	4.80

TABLA 21 CÁLCULOS: ESFUERZO/ DEFORMACIÓN PROBETAS D695.

	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm)	Módulo de Young (kg/cm ²)	Módulo de Poisson	Porcentaje de elongación %
PROBETAS LARGAS					
Media aritmética	311.541	0.0351	8,951.619	0.33	3.511
PROBETAS CORTAS					
Media aritmética	409.503	0.0576	7,856.667	0.50	5.764

TABLA 22 CÁLCULO DE \bar{x} .

En la tabla 22 se puede observar que el desempeño del material en secciones largas o cortas es virtualmente el mismo, a excepción de la relación entre la deformación por el acortamiento vertical de la pieza y el ensanchamiento transversal de acuerdo con el resultado del módulo de Poisson. Los puntajes del porcentaje de elongación y la deformación unitaria indican una ductilidad aceptable aunque con tendencia frágil. En la gráfica 11 se muestra la tendencia del comportamiento mecánico de las probetas D695.



GRÁFICA 11 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A COMPRESIÓN DEL COMPUESTO ABS+FC ORIENTACIÓN COMBINADA DEL REFUERZOS.

CONCLUSIONES

Los ensayos revelaron una resistencia a la compresión aceptable dentro de los parámetros de capacidad compresiva de los polímeros. Durante la aplicación de la carga en las en las probetas se constató la influencia de la matriz epóxica y el tejido de fibra de carbón en el desempeño del termoplástico y viceversa. La exploración física expone fallas por pandeo y fracturas frágiles en el compuesto sin embargo su comportamiento general muestra una alta elasticidad y plasticidad. Este ensayo expone de forma clara las virtudes de los compuestos para adaptarse a diversos entornos de trabajo: por separado los termoplásticos y los refuerzos de fibra de carbón no se utilizan para estados de servicio a compresión, sin embargo extrapolando el sistema de confinamiento con FC hacia el ABS fue posible generar un compuesto con una compresibilidad apta para estados de servicio ligeros, en la tabla 23 se muestra el resumen de propiedades.

	Esfuerzo unitario (kg/cm²)	Deformación unitaria (kg/cm²)	Módulo de Young (kg/cm²)	Módulo de Poisson	Porcentaje de elongación %
P. largas	311.5415	0.035	8,951.619	0.344	3.5
P. cortas	409.5031	0.058	7,856.667	0.496	5.7

TABLA 23 PROPIEDADES MECÁNICAS PROBETAS D-695.

En correspondencia con el texto, gráficas y tabla anteriores se establecen las siguientes conclusiones de los ensayos a compresión:

- La combinación de termoplástico ABS, resina epóxica y fibra de carbón generan un material compuesto de alta plasticidad ante una fuerza de compresión.
- Durante la aplicación de carga a compresión en el compuesto, los materiales que lo conforman presentan una relación de trabajo sinérgica
- Durante la compresión del compuesto, cuando el núcleo de ABS comienza a deformarse genera abultamientos perpendiculares que son restringidos por la matriz de confinamiento a 20°, la cual impide la fluencia del plástico debido a que el tejido recibe fuerzas de tensión, relativamente, paralelas a su orientación.
- Con base en lo anterior, cuando la deformación del ABS se ve frenada por el refuerzo de FC el núcleo aumenta su fuerza de oposición a la compresión.

7.3 ENSAYO DE FLEXIÓN

PROTOCOLO

Para el ensayo de flexión se utilizaron tres probetas D638 y dos D695, no obstante que su geometría no es la estipulada por la norma ASTM, durante este apartado se les referirá a dichas especímenes D790. Esta decisión se tomó con base en que la forma de las probetas no afecta el desarrollo de la prueba. El ensayo de flexión consiste en aplicar una carga uniaxial al centro de un material colocado de manera horizontal sobre dos apoyos libres, hasta deformarlo de forma perpendicular hasta que la deformación sea irreversible. En la figura 106 se muestra el esquema del ensayo a flexión.

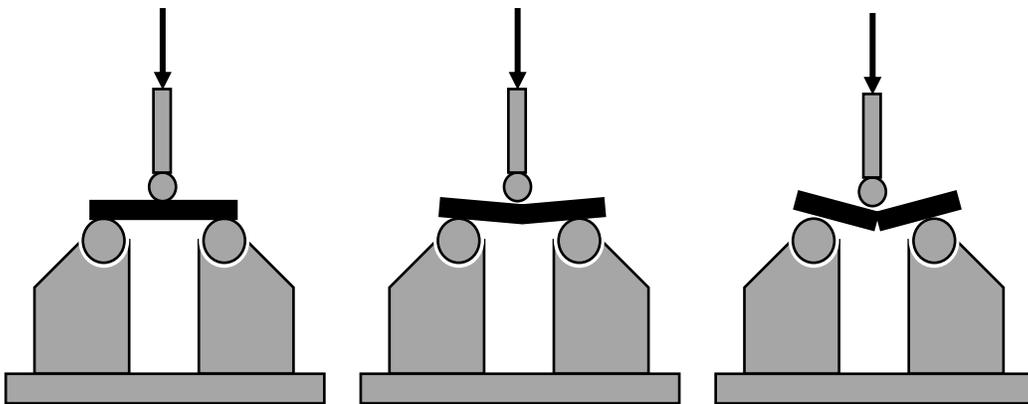


FIGURA 106 ENSAYO A FLEXIÓN: APLICACIÓN DE FUERZA UNIAxIAL AL CENTRO DEL MATERIAL, COLOCADO DE FORMA HORIZONTAL SOBRE DOS PUNTOS DE APOYO.

Para el montaje de las probetas se utilizan dos bases trapezoidales metálicas simétricas montadas en un riel para ajustar la distancia entre ellas, cada base tiene un rodillo de acero de 5cm de radio y 13cm de largo en la cima, colocado de forma horizontal y perpendicular al eje del riel de ajuste. Se retiran de la máquina de pruebas universales a las mordazas inferiores y en su lugar se coloca el riel: la norma establece que la pieza debe tener dos puntos de apoyo y estos deben estar en contacto total con el espécimen, la forma cilíndrica garantiza que sin importar la geometría de la probeta durante la aplicación de la carga la pieza estará en contacto con ambos apoyos.

Para la aplicación de la carga se retiraron las mordazas superiores (la pieza que las mantiene sujetas) y se colocó en su lugar una punta hecha con redondo de 7.9 x 60mm y solera de 6x 25 x 25mm respectivamente; la solera fue soldada por uno de los costados a una tuerca para ajustarlo en la máquina y por el otro al costado del redondo, de forma que el redondo mantuviera una posición horizontal.

Una vez montadas las bases, los rodillos y la punta se alinearon de forma paralela: las bases se alinearon con una distancia de 10cm entre los ejes de cada rodillo y la punta se alineó al centro de esa distancia (5cm). En la figura 107 se muestra el montaje de las bases y la punta; y en la figura 108 se muestran las probetas montadas.

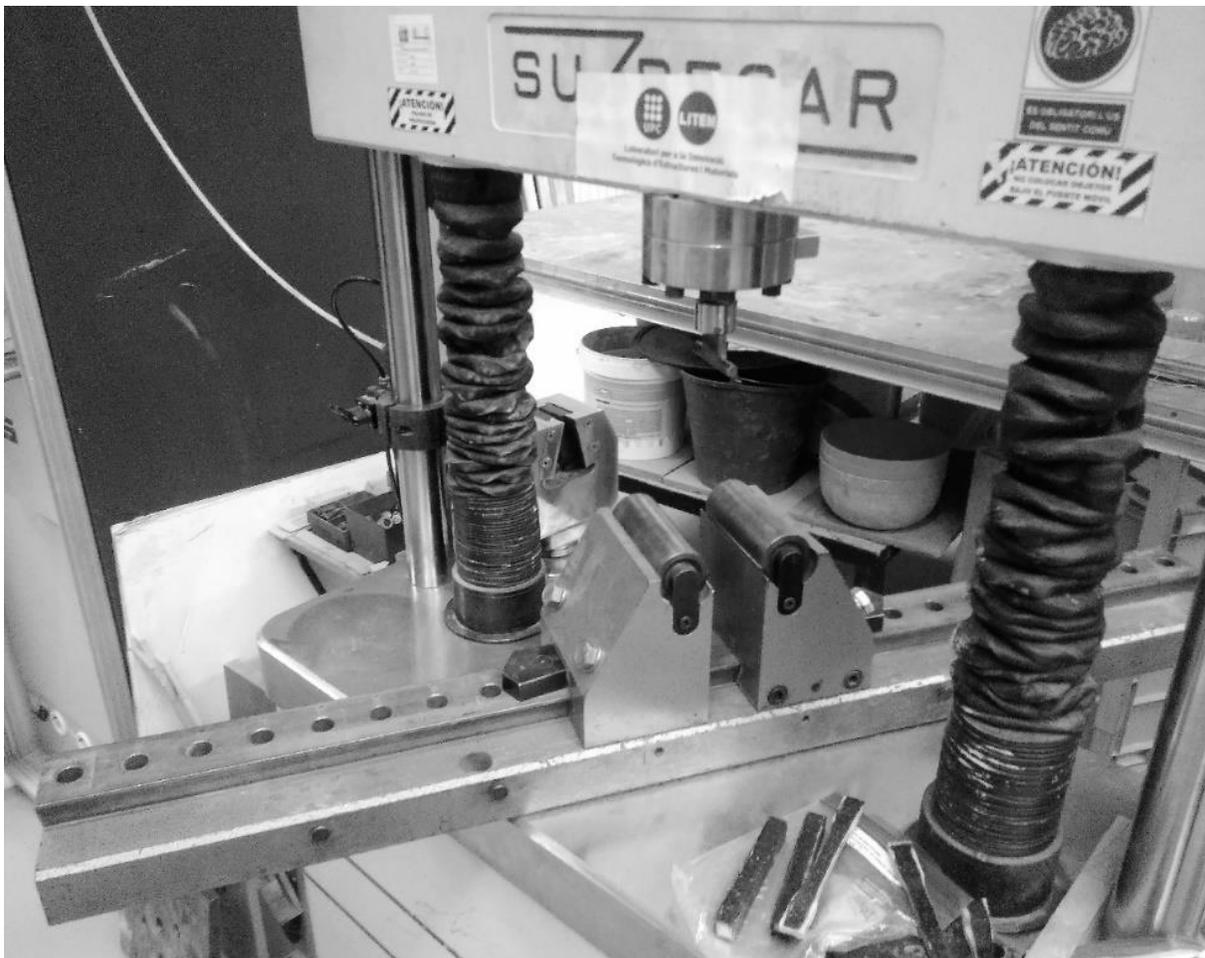


FIGURA 107 MONTAJE DE BASES METÁLICAS Y PUNTA CILÍNDRICA Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

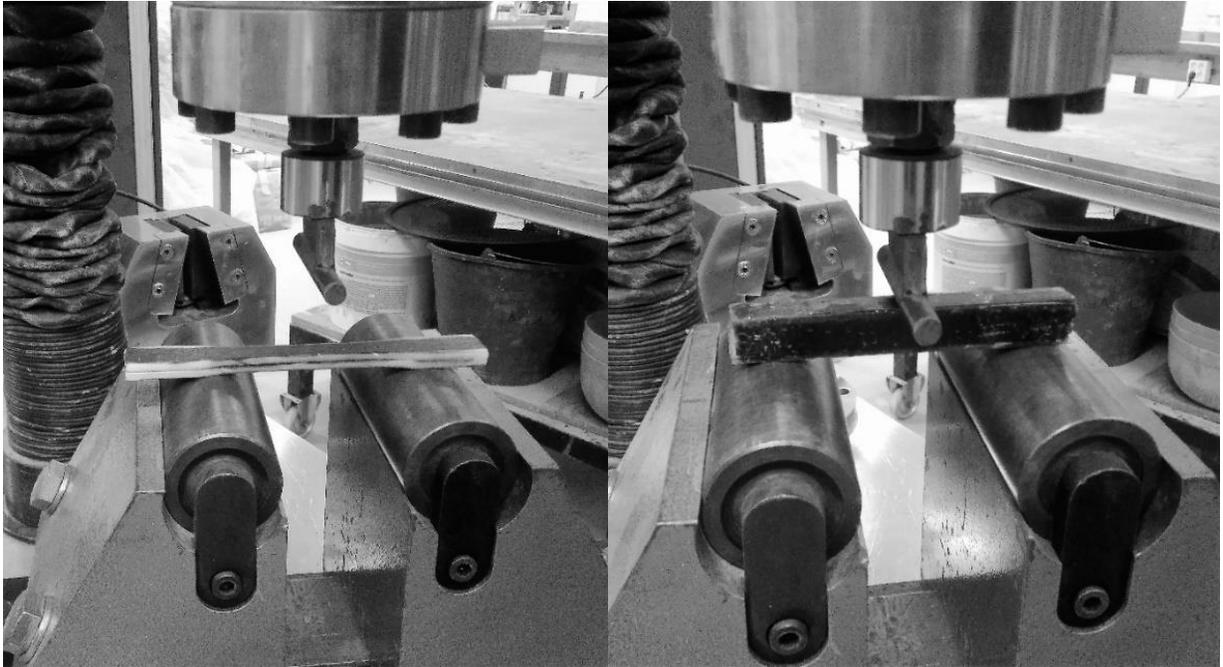


FIGURA 108 PROBETAS D790 MONTADAS PARA ENSAYO DE FLEXIÓN. Ídem.

La calibración de la maquina se realiza con los parámetros: fuerza: 0.0KN; recorrido: 0.00mm; dirección del esfuerzo: rampa negativa (compresión); velocidad 50mm/min.

ENSAYOS

La carga aplicada al centro de las probetas se mantuvo constante con una velocidad de 5mm/min hasta deformar perpendicularmente cada una, los valores de carga máxima aplicada obtenidos son de 0.7 – 3.2KN. En la figura 109 se muestran las probetas D790 ensayadas a flexión.

En la figura 109, la geometría de las probetas D-790-02 y D790-03 permite observar con claridad la fractura de las matrices en los costados con la dirección de la carga aplicada. En el caso de las probetas restantes visualmente sólo se puede apreciar la fractura de los tejidos perpendiculares a la dirección de la carga debido la disposición tipo sándwich.



FIGURA 109 PROBETAS D790 DESPUÉS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN.

ANÁLISIS

Comenzando con las probetas sándwich, la carga aplicada en las probetas origino una fractura frágil del refuerzo en la superficie de contacto con la punta, en tanto que el núcleo de ABS sólo presentó comportamiento plástico sin fractura: durante la aplicación de la carga la punta generó un eje perpendicular en la zona de contacto, la matriz, en donde se transmitió un esfuerzo de compresión cuya dirección de convergencia fue hacia dicho eje. Esta zona de constricción causo la delaminación del refuerzo hasta forzar el deslizamiento de la matriz y despegarla del núcleo de ABS, la falla ocurrió debido a la separación de la matriz y el núcleo: esta condición provocó una excentricidad que

transmitió una fuerza cortante fracturando la matriz y el refuerzo de FC. En la superficie opuesta de la pieza la transmisión del esfuerzo generó una zona de fuerzas de tensión, cuyo origen fue un eje perpendicular a la probeta y en el cual sólo se manifestó una pequeña fractura refuerzo y núcleo: dicha zona no presentó delaminaciones perceptibles de la matriz lo que indica que estas se dieron sobre la micro estructura de la pieza.

Sin embargo el hecho de que la fractura se diera de la matriz hasta el núcleo exhibe una adherencia homogénea entre materiales y substancia. En la figura 110 se muestra el espécimen D790-01 después del ensayo a flexión y en la figura 111 el detalle de la deformación. En el caso de la probeta D790-05, el comportamiento mecánico se dio de forma similar aunque la carga generó una fractura irregular frágil de mayor magnitud en la zona de tensión y en la cual se observan tejidos secos, en la figura 112 se muestra la fractura del espécimen D790-05.



FIGURA 110 PROBETA D790-01 ENSAYADA A FLEXIÓN.

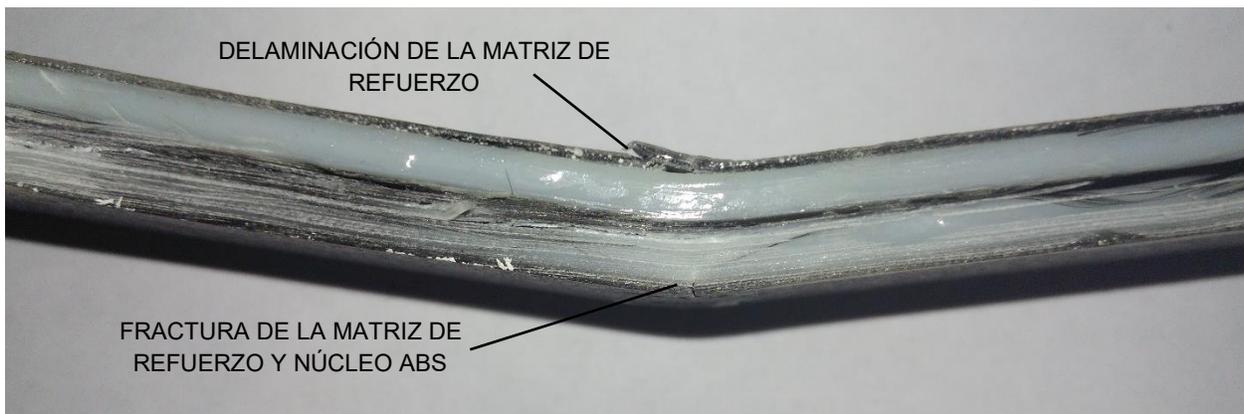


FIGURA 111 PROBETA D790-01 DETALLE DEFORMACIÓN.



FIGURA 112 PROBETA D790-05, DETALLE DE FRACTURA FRÁGIL.

La deformación de la probeta D790-04 presenta una deformación perpendicular relativamente escasa en comparación de las otras probetas. Esta condición se debe a que durante el ensayo este espécimen padeció una severa delaminación en la capa de refuerzo central, lo que indica la probable existencia de áreas sin resina en el tejido de FC. Y de acuerdo con la dirección de las grietas que se manifestaron en la zona de separación de capas, estas zonas secas se encontraban en la pieza inferior de ABS lo que supone que la fuerza de tensión propicio el deslizamiento de capas hasta arrancar la sección de ABS del refuerzo.

No obstante en el área de aplicación de la carga se presentó un eje de constricción similar al descrito en las probetas anteriores, mientras que en la zona de tensiones la pieza no sufrió delaminaciones ni fracturas visibles. En la figura 113 se muestra la delaminación del espécimen D790-04 durante el ensayo, en la figura 114 se muestra la probeta después del ensayo y en las figuras 115 y 116 el detalle del deslizamiento de capas.



FIGURA 113 PROBETA D790-04 DELAMINACIÓN DURANTE ENSAYO DE FLEXIÓN. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

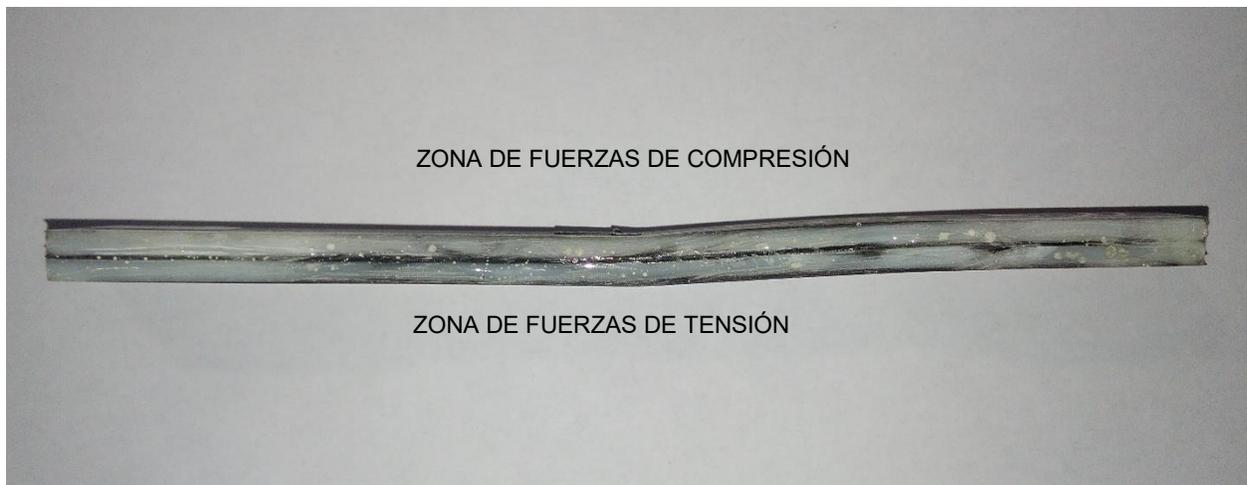


FIGURA 114 PROBETA D790-04 DESPUÉS DEL ENSAYO D FLEXIÓN.

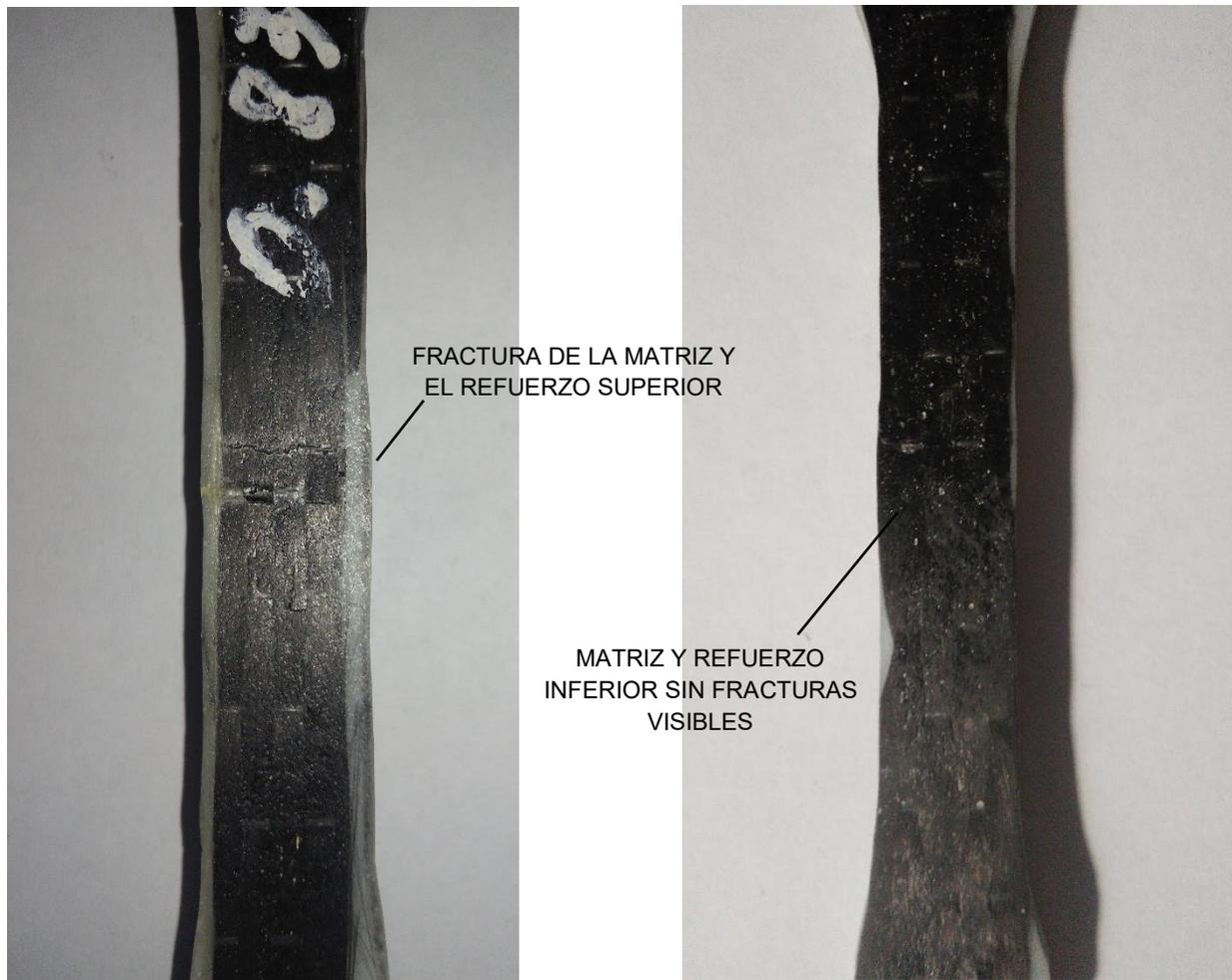


FIGURA 115 PROBETA D790-04 DETALLE DE FRACTURA FRÁGIL DE MATRIZ.

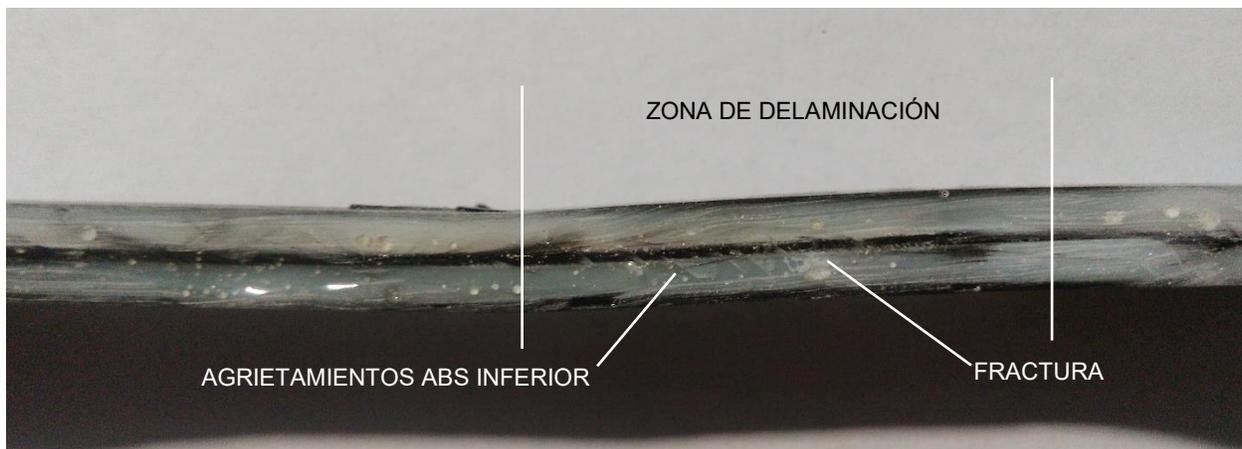


FIGURA 116 PROBETA D790-04 DETALLE DELAMINACIÓN DE CAPAS.

En las probetas D790-02 y 03 presentan deslizamiento de matrices con un comportamiento relativo dúctil en la parte superior (indicado por la decoloración de la zona de compresión) mientras que en la inferior presentaron una fractura frágil. En contraste con los especímenes tipo sándwich, en estas probetas el esfuerzo se distribuyó a través de las superficies horizontales y también en los costados verticales; aumentando la resistencia de los elementos a flexión. La fractura de ambas piezas se ubica en la parte inferior y por la dirección de propagación el origen se dio en una de las aristas inferiores de la matriz.

Para la pieza D790-02 en una de las caras verticales se presenta un fractura paralela a la originada por la fuerza de tensión, sin embargo la decoloración de la arista superior indica una separación total de la segunda matriz con el refuerzo que propicio un deslizamiento abrupto de capas y creo una grieta cuya propagación fue más rápida que la primera. En ambos casos la causa probable de falla es que la fuerza cortante se incrementa en los elementos cuando la carga comprime y separa las matrices superiores hasta que los deslizamientos de las paredes verticales crean un punto de fractura en las aristas inferiores. En las figuras 117 y 118 se muestra la fractura de la probeta D790-02 y en la figura 119 y 120 la fractura de la probeta D790-03.



FIGURA 117 PROBETA D790-02 FRACTURA FRÁGIL (PARED VERTICAL)



FIGURA 118 PROBETA D790-02 FRACTURA FRÁGIL (PARED HORIZONTAL)



FIGURA 119 PROBETA D790-03 FRACTURA FRÁGIL (PARED VERTICAL)



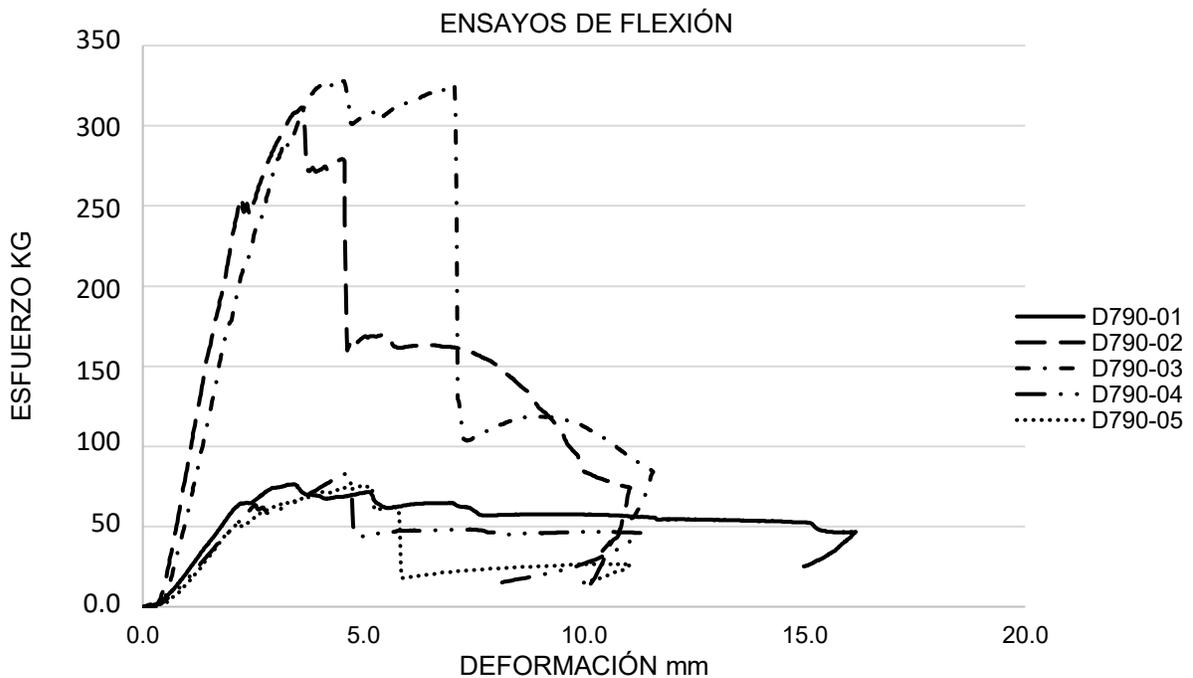
FIGURA 120 PROBETA D790-03 FRACTURA FRÁGIL (PARED HORIZONTAL).

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de la base de datos de la máquina de pruebas universales, tabla 24. En la gráfica 12 se presentan los resultados de las cinco probetas; en la tabla 25 se muestran los cálculos para determinar las propiedades mecánicas y en la tabla 26 se muestran los valores promedio del material compuesto, obtenidos a través de la media aritmética " \bar{x} ".

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D790-01	0.7640	76.4	16.16	234.00
D790-02	3.1140	311.4	11.05	149.20
D790-03	3.2980	329.8	11.57	156.80
D790-04	0.8360	83.6	11.30	168.20
D790-05	0.7570	75.7	11.06	168.20

TABLA 24 RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN.



GRÁFICA 12 COMPORTAMIENTO RELATIVO DÚCTIL, RELACIÓN ESFUERZO/DEFORMACIÓN DE PROBETAS D790.

Probeta	Área (cm ²)	Carga (kg)	Deformación total (cm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm)	Módulo de Young (kg/cm ²)	Porcentaje de elongación %
PROBETAS LARGAS								
D670-01	29.38	76.400	1.616	2.6006	2.601	0.098	26.553	9.79
D670-02	27.80	311.400	1.105	11.2001	11.200	0.088	126.699	8.84
D670-03	27.80	329.800	1.157	11.8619	11.862	0.093	128.154	9.26
D670-04	29.38	83.600	1.130	2.8456	2.846	0.068	41.551	6.85
D670-05	29.38	75.700	1.106	2.5767	2.577	0.067	38.441	6.70

Tabla 25 CÁLCULOS: ESFUERZO/ DEFORMACIÓN PROBETAS D790.

	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm)	Módulo de Young (kg/cm ²)	Porcentaje de elongación %
PROBETAS LAMINADAS				
Media	2.6743	0.078	35.5151	7.7818
PROBETAS CONFINADAS				
Media	11.5310	0.0778	127.4263	9.0480

TABLA 26 CÁLCULO DE \bar{x} .

En la tabla 26 se observa que el desempeño de ambos grupos es completamente distante en la aplicación de un esfuerzo a flexión en una proporción de 1:5; y ambos grupos exhiben una tendencia predominantemente frágil. En correspondencia con los datos y la exploración física, este comportamiento está subordinado a la geometría transversal de las secciones. En la gráfica 13 se muestra la tendencia del comportamiento mecánico de las probetas D790.



GRÁFICA 13 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A FLEXIÓN DEL COMPUESTO ABS+FC ORIENTACIÓN COMBINADA DEL REFUERZOS.

CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico del material a flexión exhibe valores bajos respecto a los obtenidos en los ensayos anteriores. No obstante el rango de servicio que soporta puede considerarse como aceptable para servicio ligero. El ensayo demuestra que al aplicar una fuerza en una probeta con un refuerzo paralelo, el cortante producido causa deslizamientos de capas hasta realizar una fractura. Al aplicar la fuerza en una pieza que combina la orientación de los tejidos, el cortante produce grietas en las matrices mientras que el núcleo de ABS comienza a fluir; una vez que las matrices se fracturan la carga es absorbida en totalidad por el termoplástico: el compuesto presenta un comportamiento de alta plasticidad.

En la tabla 29 se muestran los valores promedio del compuesto bajo un esfuerzo flexionante.

	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria	Módulo de Young (kg/cm ²)
Refuerzo paralelo	3.00	0.0078	39.91
Orientación combinada	14.59	0.0069	212.77

TABLA 27 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN DEL COMPUESTO SEGÚN EL TIPO DE REFUERZO.

En correspondencia con el texto, gráficas y tabla anteriores se establecen las siguientes conclusiones de los ensayos de flexión:

- El refuerzo paralelo de elementos horizontales no aporta resistencia significativa ante una fuerza de flexión; deformación con tendencia dúctil y falla por deslizamiento de componentes.
- El refuerzo que combina la orientación paralela con la orientación perpendicular incrementa la resistencia a flexión en un rango similar al de materiales metálicos (perfiles PTR).
- La deformación de un elemento que combina orientaciones tiene comportamiento con tendencia dúctil con falla por fracturas frágiles de las matrices.

7.4 TASA DE ARDOR Y/O EXTENSIÓN Y TIEMPO DE QUEMADO

El método para determinar la tasa de ardor/o extensión y el tiempo de quemado de plásticos horizontales genera indicadores preliminares de la aceptabilidad de materiales poliméricos respecto a su inflamabilidad en una aplicación particular. El objetivo de este ensayo es medir el deterioro o los cambios del material exponiéndolo al fuego en un ambiente controlado [70].

EQUIPO Y HERRAMIENTA

Para este ensayo se utilizó: una cámara de pruebas de combustión horizontales y verticales con sistema de extracción de gases y suministro de gas propano (la cámara se muestra en la figura 121; mechero Bunsen, soporte metálico para probetas y cronómetro, en la figura 122 se muestra el equipo.



FIGURA 121 CÁMARA DE PRUEBAS DE COMBUSTIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC).



FIGURA 122 BASE Y MECHERO BUNSEN. Ídem.

PROTOCOLO

Para este ensayo se utilizó una probeta D695 conformada por dos matrices reforzadas y un núcleo de ABS, ambos cortados por la mitad; ambas muestras cumplen la geometría especificada por el ASTM para e por lo que de aquí en adelante se referirá a estos especímenes como probetas D635.

Se coloca una probeta D635 de forma horizontal sobre el soporte metálico y se sujeta de uno de sus extremos con una prensa dentro de la cámara de combustión. A continuación se enciende el sistema de extracción de gases de la cámara y posteriormente se enciende el mechero Bunsen. El ajuste del mechero se realiza a través de los puertos de aire del mismo hasta obtener una llama azul cuya altura promedio debe ser de 20mm y su temperatura aproximada de 500 – 1,300°C.

El ensayo para determinar la tasa de ardor y quemadura consiste en aplicar una llama con el mechero en el extremo libre de la probeta aproximadamente a 6 mm de profundidad durante 30 segundos y paralelamente iniciar el registro del tiempo. Una vez

iniciada la combustión la llama debe hacer un recorrido de 25mm partiendo del punto de ignición, en caso de que la combustión continúe (ya sea una llama visible o material incandescente sin llama) transcurridos los 30 segundos se debe tomar el tiempo de extinción y la distancia consumida a partir de los 25mm. Para calcular la tasa lineal de quemadura “V”, en correspondencia con la Norma D635, se utilizará la ecuación 9, en la figura 123 se muestra el esquema del ensayo para tasa de ardor y quemadura, y en la figura 124 se muestra la probeta D635-01 montada.

$$V = \frac{60L}{t} \quad [9]$$

V = TASA SE QUEMADURA LINEAR
L = DISTANCIA QUEMADA (mm)
t = TIEMPO TRANSCURRIDO (seg)

ECUACIÓN 9 CÁLCULO DE LA TASA SE QUEMADURA LINEAR. [70]

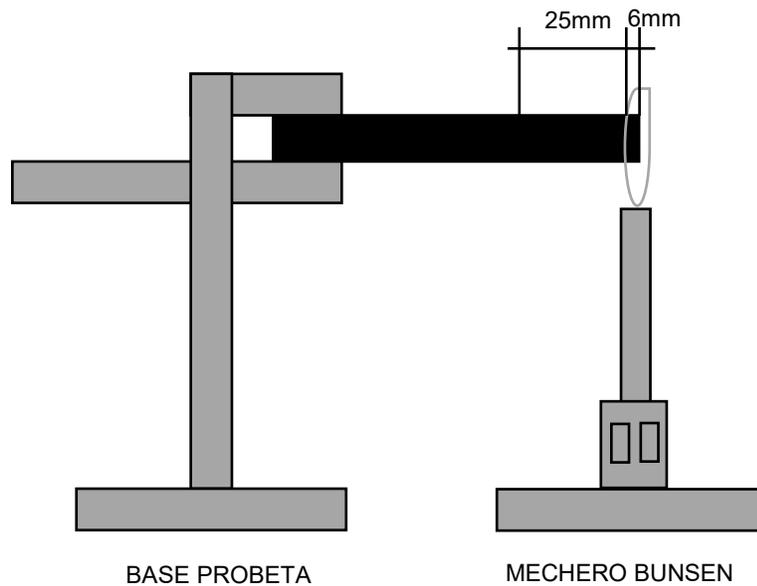


FIGURA 123 ESQUEMA ENSAYO TASA DE ARDOR Y/O EXTENSIÓN Y TIEMPO DE QUEMADO.



FIGURA 124 PROBETA D635-01 MONTADA PARA ENSAYO DE INFLAMABILIDAD. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC).

ENSAYOS

A las probetas D635-01 y 02 se les aplicó de forma perpendicular una llama con temperatura aproximada de 800 – 1300°C durante 30 segundos. Al colocar la llama a una distancia de 6 milímetros de la pieza D635-01 se observó que el primer material en reaccionar a la llama fue el núcleo de ABS y posteriormente las matrices de refuerzo. La causa probable para que la combustión se diera en ese orden considera que en la manufactura de estas probetas el núcleo está expuesto en los extremos: las propiedades del termoplástico ABS (se ablanda con el calor) lo convierten en el componente con mayor vulnerabilidad al fuego, mientras que en el caso del polímero termofijo (resina epóxica) lo dotan de una relativa resistencia al fuego, ya que este tipo de materiales se endurece con el calor.

En correspondencia con el párrafo anterior, pese a que la temperatura de inflamabilidad de la matriz⁷⁵ es de 120°C y el punto de fusión del ABS es de 220°C, el termoplástico sufrió el proceso de descomposición primero debido a que en el instante que se aplicó la llama, cuya temperatura superaba los umbrales de ambos materiales, provocó un cambio súbito de estados: el núcleo pasó de un estado de transición vítrea a uno de fusión y de este a uno de descomposición. Y en el caso del termofijo, al entrar en contacto con el fuego inició un proceso de endurecimiento que hizo frágil a la matriz hasta que esta comenzó a fracturarse y enseguida a descomponerse; en el caso de la probeta D635-02 se dio un comportamiento similar y para ambos casos la llama no se extinguió al retirar el mechero.

En la figura 125 se muestra el núcleo de la probeta D635-01 reaccionando a la llama y la propagación del fuego en la matriz, en la figura 126 se muestra la combustión después de retirar el mechero y en la figura 127 la pieza después del ensayo.

⁷⁵ Referida sólo a la resina epóxica, en el caso de la fibra de carbón su umbral de servicio se encuentra sobre los 1,500 – 3,000°C.



FIGURA 125 PROBETA D635-01 PUNTO DE IGNICIÓN Y PROPAGACIÓN DEL FUEGO. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

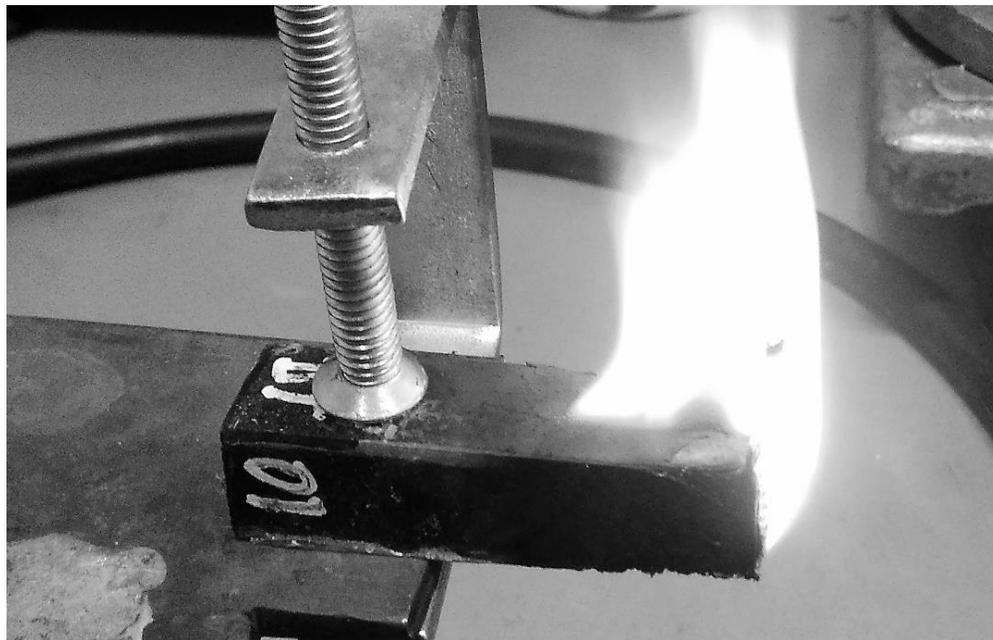


FIGURA 126 PROBETA D635-01 COMBUSTIÓN SIN MECHERO. Ídem.

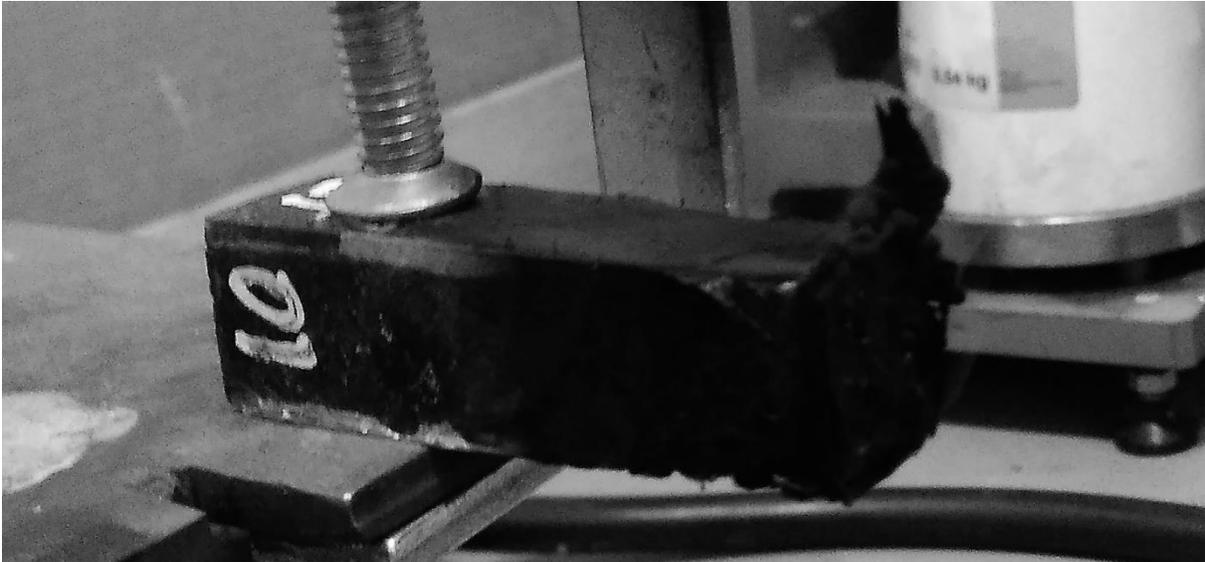


FIGURA 127 PROBETA D635-01 DESPUÉS DEL ENSAYO. Ídem.

ANÁLISIS

En la figura 127 se puede observar que la geometría de la probeta no sufrió deformaciones severas. Se observa la degradación parcial de las matrices en el punto de ignición, sin embargo el tejido de FC mantiene su forma por lo que se puede determinar la presencia de pequeñas cantidades resina epóxica en algunas áreas. El resto de la probeta presenta carbonización severa la segunda matriz sin alcanzar por completo a la primera. A modo de conjetura, la segunda matriz funciona como escudo: al estar en contacto con el fuego la resina comienza a endurecerse y cuando comienza a degradarse la fibra de carbón transmite el calor a lo largo del tejido hasta separarse de la primera matriz por lo que la segunda matriz se consume de forma independiente. Respecto del núcleo de ABS, las matrices funcionan como elemento de contención del fuego, debido a eso sólo la parte expuesta muestra una carbonización total, mientras que el resto de la probeta mantiene la rigidez que aporta el núcleo; debido a que la combustión requiere la presencia de oxígeno, el fuego sólo puede consumir la zona que no se encuentra confinada en los refuerzos. Cuando las matrices se descomponen se crean huecos por donde pasa el aire y permite que el núcleo sea consumido.

Con la meta de analizar el comportamiento crítico, una vez registrada la tasa de ardor de cada probeta, se tomó la decisión de alcanzar el estado máximo de descomposición por combustión de los especímenes para lo cual se les sometió al fuego hasta la degradación total de las matrices y la carbonización del núcleo, en la figura 128 se muestra una probeta en proceso de carbonización, en la figura 129 se muestra la probeta durante la extinción de la llama y en la figura 130 se muestran las probetas después del ensayo.



FIGURA 128 PROBETA D635 EN PROCESO DE CARBONIZACIÓN. Ídem.



FIGURA 129 PROBETA D635 EXTINCIÓN DE LA LLAMA. Ídem.



FIGURA 130 PROBETAS D635 DESPUÉS DEL ENSAYO.

En la figura 129 se observa que después de retirar el mechero, las llamas empiezan a extinguirse paulatinamente de la matriz hasta desaparecer y únicamente en los extremos de ABS expuestos continua la combustión, esto confirma la suposición de que las matrices retrasan por un breve instante de tiempo la transmisión de calor hacia el núcleo en los costados. Sin embargo, en la figura 130 se observa que las matrices se consumieron en un 90% dejando sólo los tejidos de FC, esta condición representa que una vez que las capas de resina epóxica se descomponen y se separan de las fibras de carbón, los tejidos de FC actúan como un horno que calienta al núcleo y comienza a descomponerlo de manera gradual en contraste con los extremos en dónde la descomposición se da de forma abrupta. En las figuras 131 y 132 se muestra del detalle de las probetas D635-01 y 02 después de la carbonización.

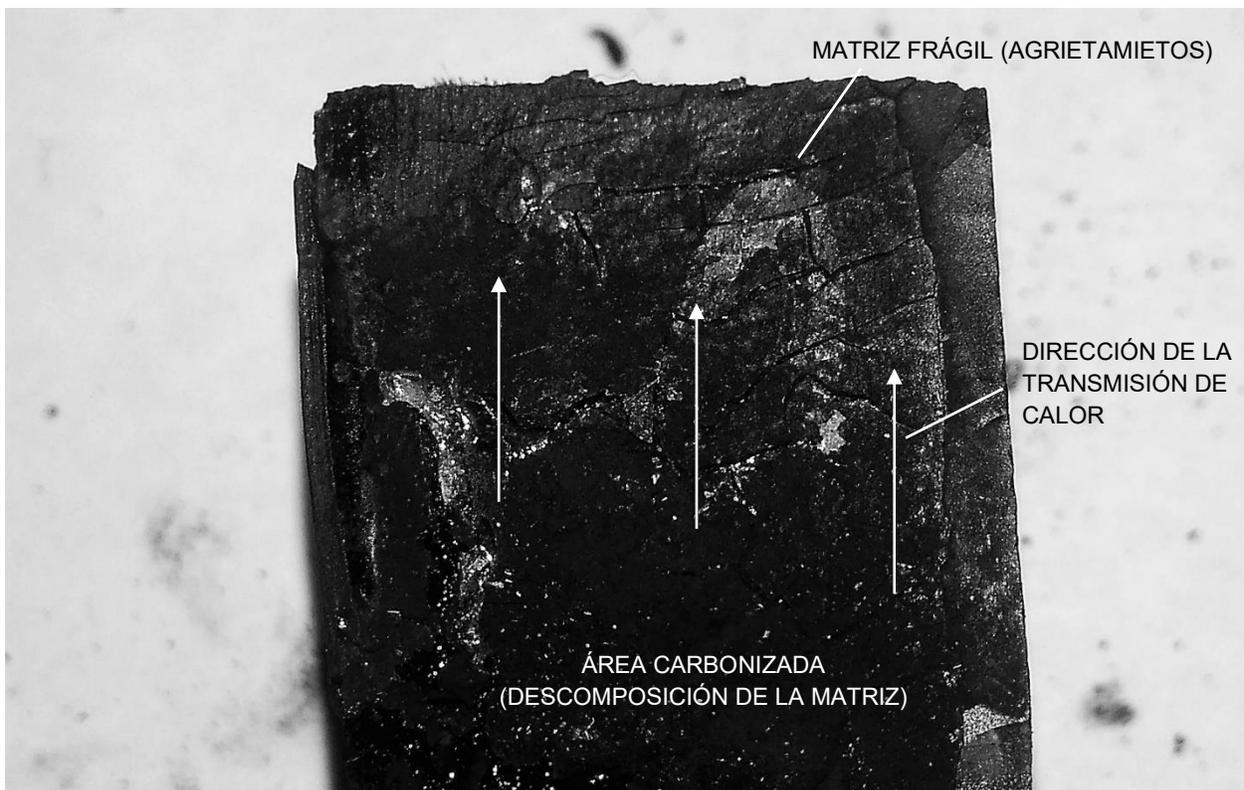


FIGURA 131 PROBETA D635-01 PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN.

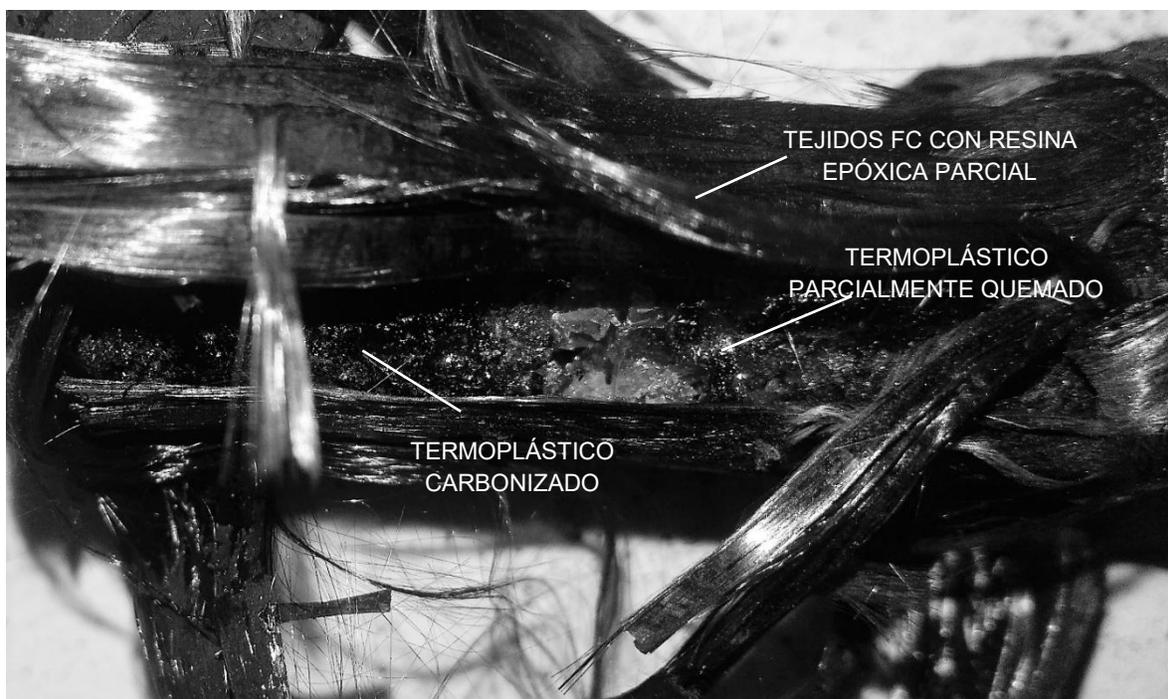


FIGURA 132 PROBETA D635-02 PROCESO DE CARBONIZACIÓN.

RESULTADOS

En la tabla 30 se muestran los datos obtenidos: tiempo transcurrido entre los eventos de cada probeta y longitud de quemadura. Y en la tabla 31 se muestran los valores de la tasa de ardor y/o extensión y tiempo de quemado de acuerdo a la ecuación 9 y a través de la desviación estándar “S”: para el cálculo de estos valores se consideró el lapso de tiempo desde que se retiró el mechero hasta la extinción de la llama de las matrices ya que el objeto de estudio de la investigación es el comportamiento combinado de la resina epóxica, la fibra de carbón y el termoplástico ABS.

Probeta	Longitud original mm	Tiempo de ignición (seg)	Tiempo de exposición (seg)	Combustión al retirar mechero	Distancia quemada mm	Combustión hasta extinguirse-matriz(seg)	Combustión hasta extinguirse-núcleo(seg)
PROBETAS D635 - EXPOSICIÓN POR 30 SEGUNDOS							
D635-01	63.93	12.47	30	Si	22.41	43.54	64.97
D635-02	62.50	10.93	30	Si	22.09	42.76	42.39
PROBETAS D635 - EXPOSICIÓN HASTA LA CARBONIZACIÓN							
D635-01	"	8.46	60	Si	48.93	90.01	143.49
D635-02	"	8.61	60	Si	50.32	74.38	127.13

TABLA 28 RESULTADOS ENSAYO TASA DE ARDOR.

	Distancia quemada (L)		Tiempo de combustión (t)		Tasa de ardor y tiempo de quemado (V)	
PROBETAS D635 - EXPOSICIÓN POR 30 SEGUNDOS						
Desviación estandar	S =	0.23 mm	S =	0.55 seg	24.62	mm/seg
PROBETAS D635 - EXPOSICIÓN HASTA LA CARBONIZACIÓN						
Desviación estandar	S =	0.98 mm	S =	11.05 seg	5.34	mm/seg

TABLA 29 VALORES DE LA TASA DE ARDOR Y TIEMPO DE QUEMADO DE LAS PROBETAS D635

CONCLUSIONES

La exposición del material al fuego por un periodo de 30 segundos provocó la carbonización superficial de la segunda matriz en cada probeta, una vez que se retiró la llama las probetas continuaron ardiendo por un lapso de 11-14 segundos hasta la extinción del fuego. El daño causado por el fuego sobre la matriz se consideró medio, dado que no había indicios de que el calor afectara de forma severa al núcleo. En la segunda fase se expuso al material a temperaturas críticas hasta la descomposición de las matrices de refuerzo. Durante los primeros segundos de la segunda fase, la pieza se mantuvo estable geoméricamente y a medida que se consumían las matrices comenzó la deformación perpendicular.

Acorde al comportamiento del material ante las dos condiciones de exposición al fuego se concluye que:

- La estabilidad estructural del material no se ve comprometida de forma severa en periodos cortos de exposición al fuego.
- Si un componente realizado con el material es expuesto al fuego (periodos cortos o largos) deberá ser remplazado para asegurar su correcto funcionamiento.
- La tasa de ardor del material lo hace vulnerable a siniestro; a pesar de presentar poca inflamabilidad la exposición permanente al fuego descompone con rapidez las matrices de refuerzo y vuelven inestable al compuesto.

7.5 ENSAYO DE ADHERENCIA

PROTOCOLO

El ensayo de adherencia está diseñado para la comparación y selección de materiales adhesivos o procesos de adherencia para la susceptibilidad a la fatiga y ambientes cambiantes [71]. El ensayo de adherencia consiste en aplicar una carga uniaxial gradualmente creciente en uno de los extremos de la probeta y mantenerla fija del otro a modo de que la carga aplicada se dé uniformemente a través del eje de la pieza, hasta que ocurre una fractura. Y a través de los datos obtenidos establecer el valore de resistencia mecánica: tensión de rotura. En la figura 133 se muestra el esquema del ensayo de adherencia.

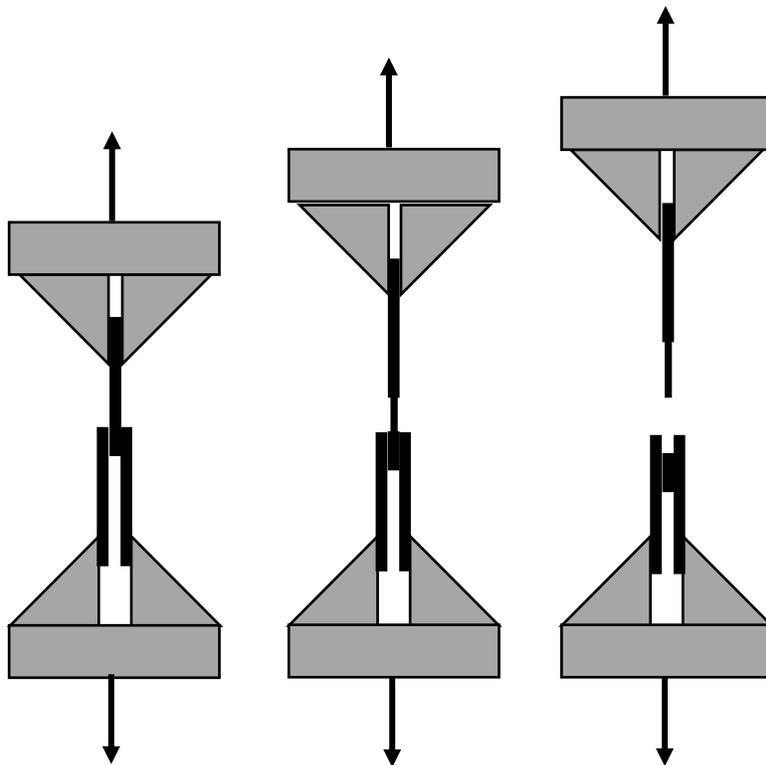


FIGURA 133 APLICACIÓN DE FUERZA UNIAXIAL HASTA LA FRACTURA DE LA UNIÓN DE UNA PROBETA D3163

El ensayo de adherencia comprende los parámetros de calibración del ensayo de tensión en la máquina de pruebas universales: fuerza: 0.0KN; recorrido: 0.0mm; dirección del esfuerzo: rampa positiva (tensión); velocidad 5mm/min. Las probetas se sujetan en las mordazas comenzando con la mordaza inferior de modo que cada probeta se mantenga mientras se ajusta la altura de la mordaza superior, el diseño de la probeta contempla una longitud de ± 35 cm y una distancia de agarre de 32cm entre los ejes perpendiculares de las mordazas.

En esta sección se incluyen los resultados de las probetas D638-001 y 005, como se mencionó en la sección de ensayos a tensión, estos especímenes mostraron una falla por adherencia de la segunda matriz (tejido de confinamiento). Sin embargo, en correspondencia al ASTM a partir de este punto se les denominará probetas D3163-“D” y “E”, respectivamente. En la figura 134 se muestra el esquema de ajuste de las probetas en las mordazas y en la figura 135 se muestra una probeta montada en la máquina.

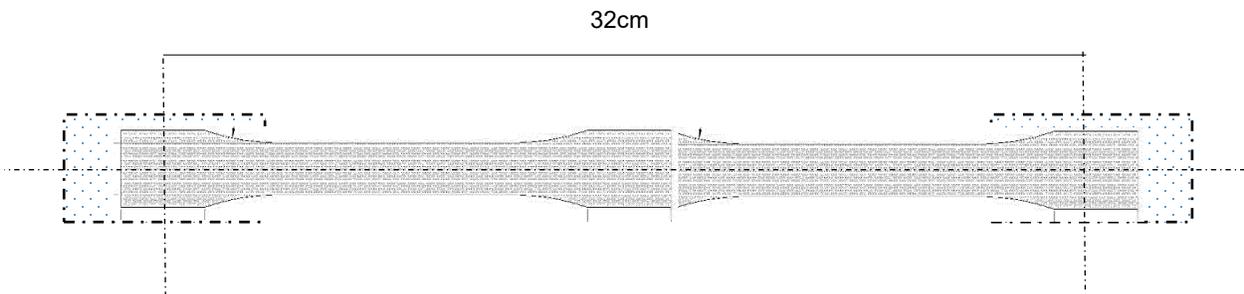


FIGURA 134 DISTANCIA ENTRE EJES DE MORDAZAS PARA PROBETAS D3163.

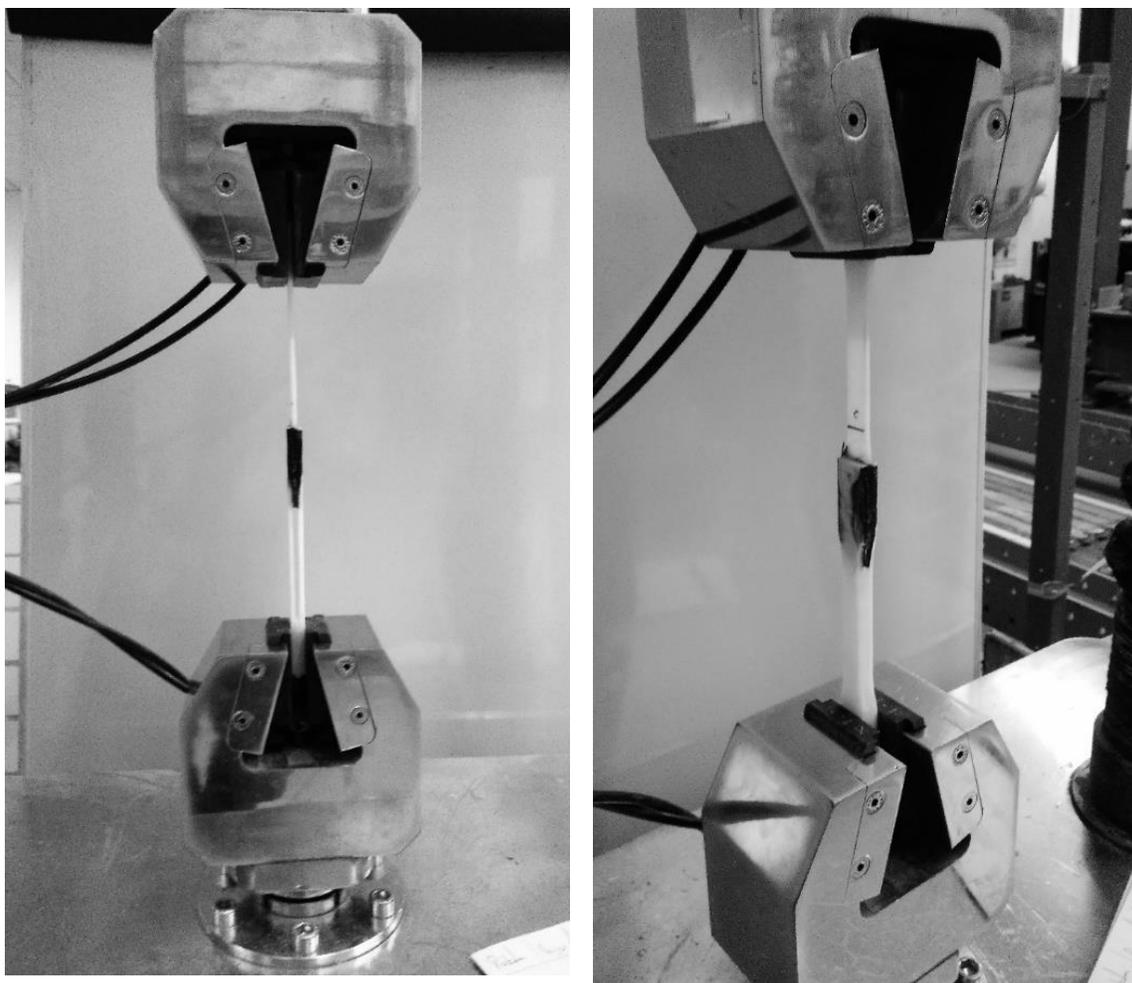


FIGURA 135 PROBETA D3163-C MONTADA EN MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSALES. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

ENSAYOS

Las probetas D3163-A, B y C fueron sometidas a tensión uniaxial hasta alcanzar la ruptura con las siguientes características: el esfuerzo máximo que soportaron las probetas en el momento de rotura se localizó en un rango de 1.32KN - 37KN; sin embargo la rotura de los especímenes no fue en el nodo de unión sino que se dio, para los tres casos, en la sección superior al punto de adherencia.

En cuanto a las probetas D3163-D y E, sólo presentan fracturas en el tejido de la matriz de confinamiento de uno de sus extremos y los valores obtenidos de esfuerzo máximo hasta el deslizamiento de capas fueron de 8.8KN y 17.2KN respectivamente, en la figura 136 se muestran las piezas A, B y C probadas en el orden de los ensayos, en la figura 137 se muestra el detalle de las fracturas y en la figura 138 las probetas D y E.

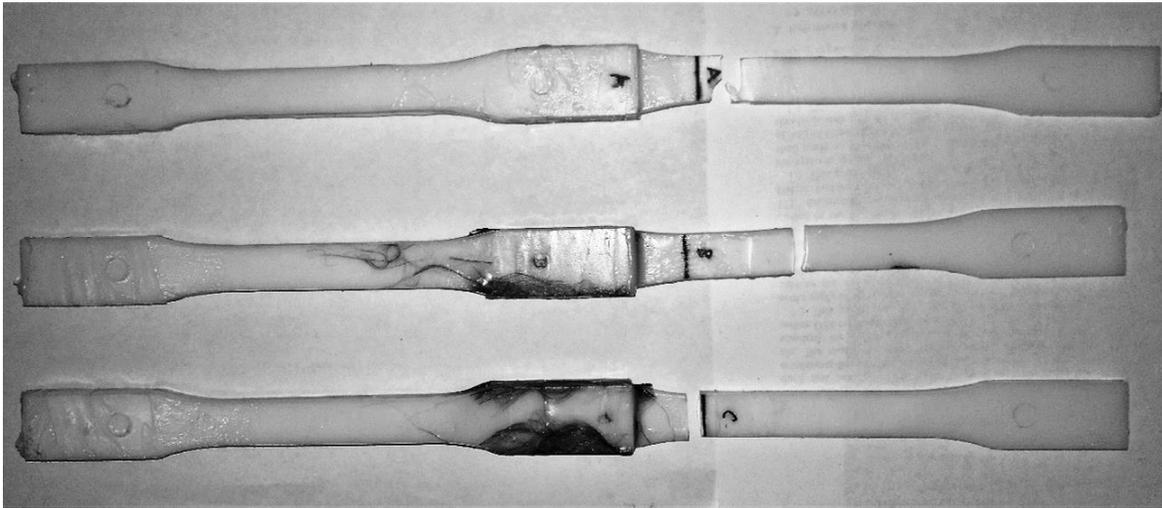


FIGURA 136 PROBETAS D3163 DESPUÉS DEL ENSAYO DE ADHERENCIA.

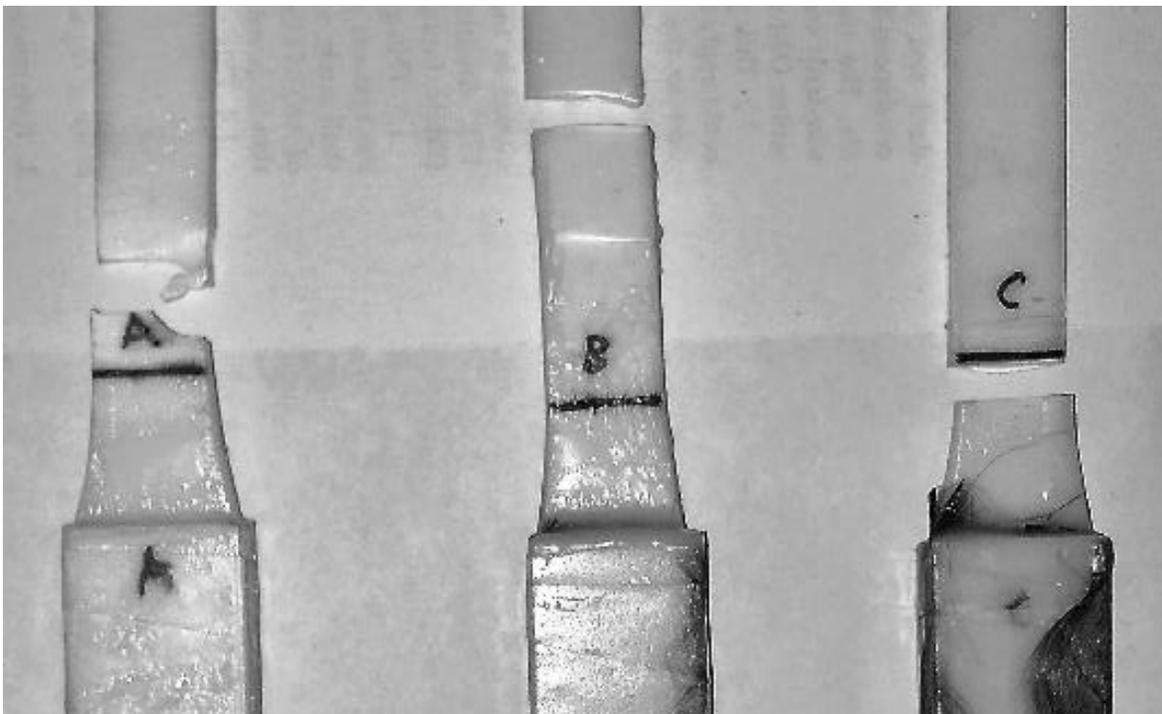


FIGURA 137 DETALLE DE FRACTURAS EN PROBETAS D3163.



FIGURA 138 PROBETAS D3163-D Y D3163-E (probetas que se utilizaron en ensayo de tensión y que presentaron falla por adherencia de tejidos y matrices de refuerzo)

ANÁLISIS

En la figura 138 se observa que la fractura de las probetas D3163-A y D3163-C se dio en la zona del arco del componente superior. Durante la aplicación de la carga, el nodo de unión es el punto en donde se originan los esfuerzos opuestos de tensión, por lo que la ubicación de la fractura sugiere que la falla se debió a la fuerza de oposición que presentó cada extremo de la probeta (en la parte superior del nodo se encontraba una pieza de ABS y en la inferior había dos de ellas, considerando al nodo como punto cero); y por consiguiente la transmisión de la carga localizó menor resistencia en la zona de los arcos superior.

En la fractura de la probeta D3163-A se puede observar comportamiento dúctil: la zona de falla presenta decoloraciones perpendiculares que señalan la deformación de la pieza hasta formar un punto de estricción en el que se originó una grieta que al propagarse provocó una violenta separación del costado opuesto debido a la fuerza aplicada por la máquina en ese momento, en las figuras 139 y 140 se muestran los detalles de la falla descrita.

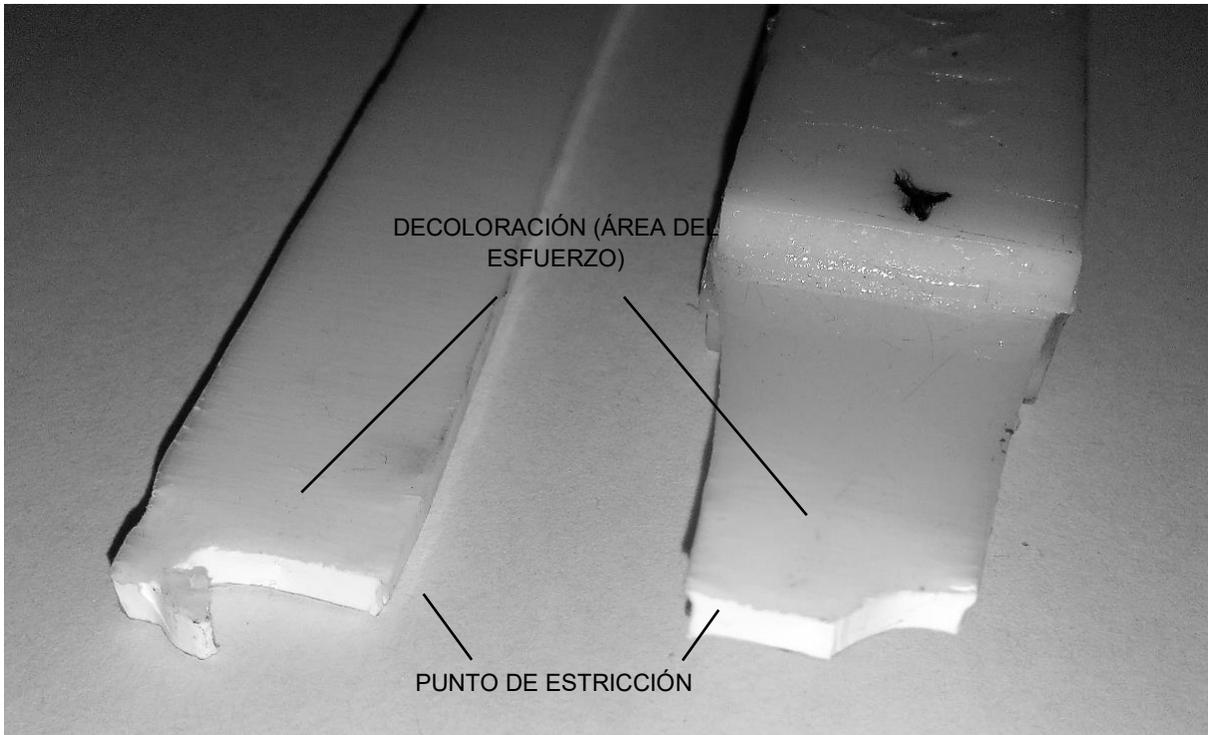


FIGURA 139 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-A.



FIGURA 140 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-A.

La probeta D3163-C no presenta deformación severa del ABS en el área de la fractura (tendencia frágil). La causa probable de falla es la manufactura: al aplicar la resina un tercio de la pieza superior se cubrió con ella impidiendo que el termoplástico fluyera durante el ensayo; durante el estiramiento se generó una grieta a un costado que se propagó hasta fracturarla, en las figuras 141 y 142 se muestran los detalles de la falla descrita.



FIGURA 141 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-C.

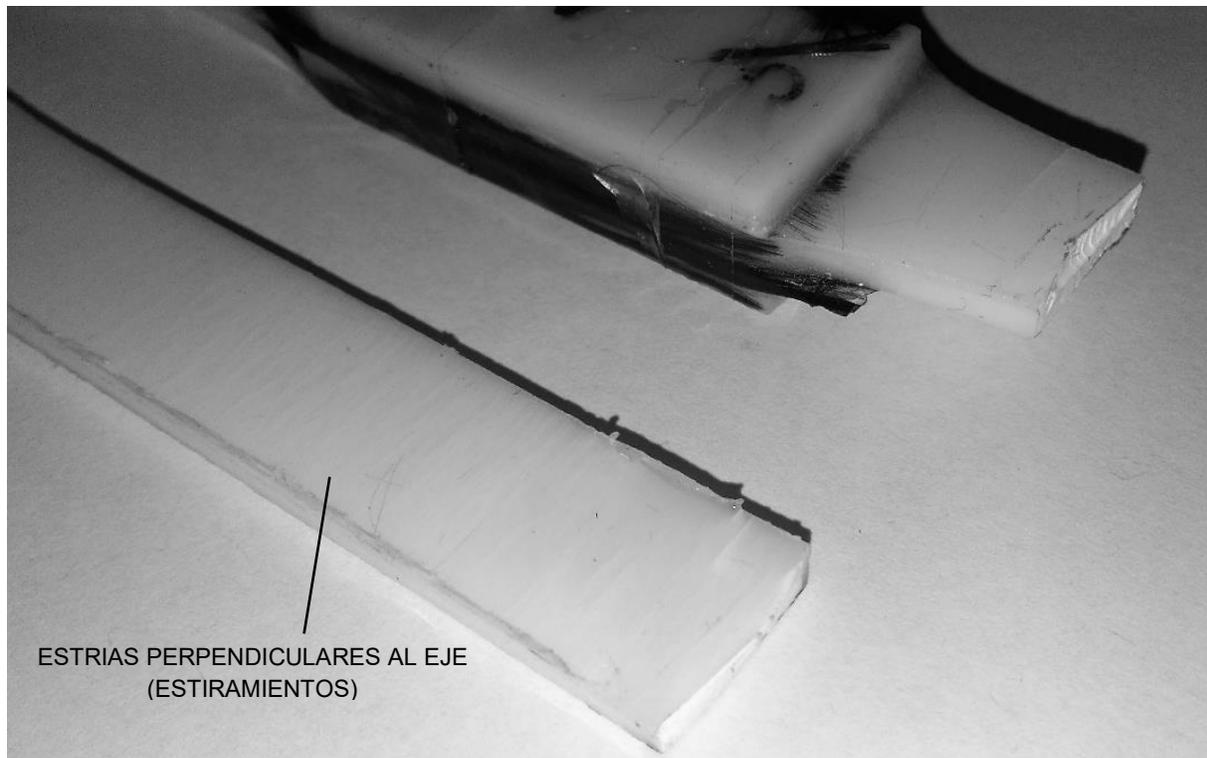


FIGURA 142 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-C.

En el caso de la fractura de la probeta D3163-B se localizan dos fallas en la zona esbelta de la pieza superior, la primera falla es un agrietamiento cuya propagación se detuvo debido a la segunda falla, la cual también fue una grieta que se propagó con mayor velocidad. El comportamiento de las grietas indica que la posición del espécimen no fue completamente vertical, sino que presentó una inclinación que generó una excentricidad en la zona de falla y propicio que la fuerza de oposición en cada costado fuera menor a la carga; por lo tanto la probeta exhibe una tendencia de ruptura frágil. En las figuras 143 y 144 se muestran los detalles de la falla descrita.

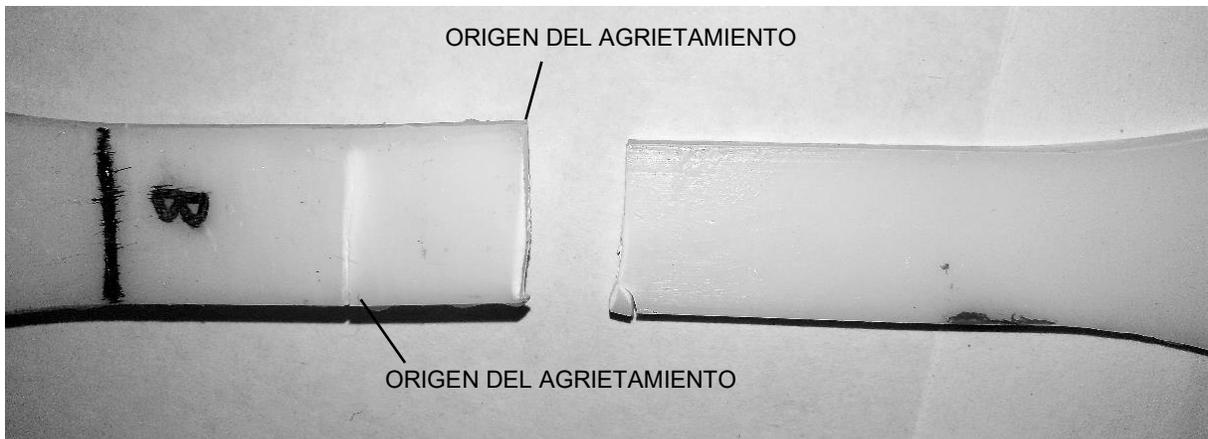


FIGURA 143 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-B.

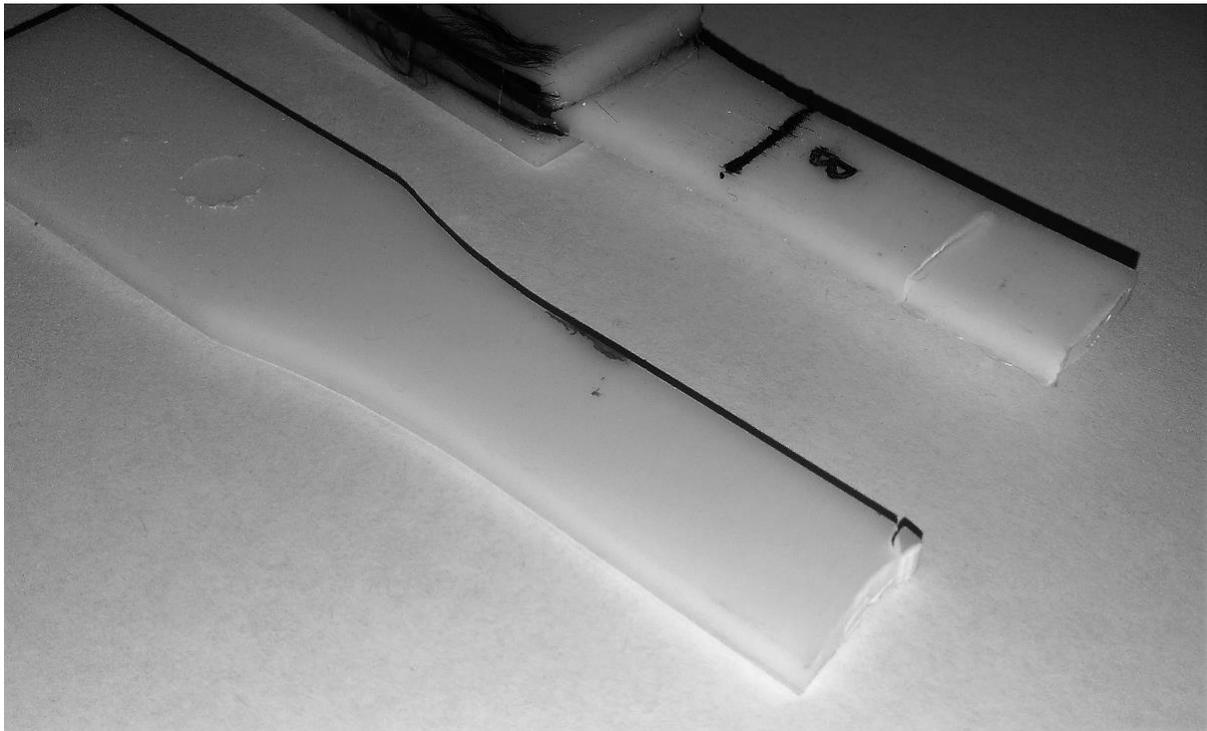


FIGURA 144 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-B.

Los casos de las probetas faltantes remiten al ensayo de tensión. Para estos casos, ambas piezas presentaron deslizamiento del refuerzo por confinamiento (segunda matriz) y dejaron relativamente intacto el refuerzo paralelo (primera matriz).

Los especímenes muestran surcos de 0.77mm paralelos al eje en las zonas del desprendimiento de tejidos que fueron causados por las mordazas, indicando que la segunda capa de refuerzo se desprendió y la distribución de fuerzas se concentró en ella, arrancándola de cada probeta. La condición de la superficie de la primera matriz en ambas muestras sugiere que no hubo una adecuada adherencia de matrices, lo que propició el deslizamiento una vez iniciado el ensayo. En las figuras 145 y 146 se muestran los detalles de la falla en la probeta D3163-D y en las figuras 147 148 se muestran los detalles D3163-E.

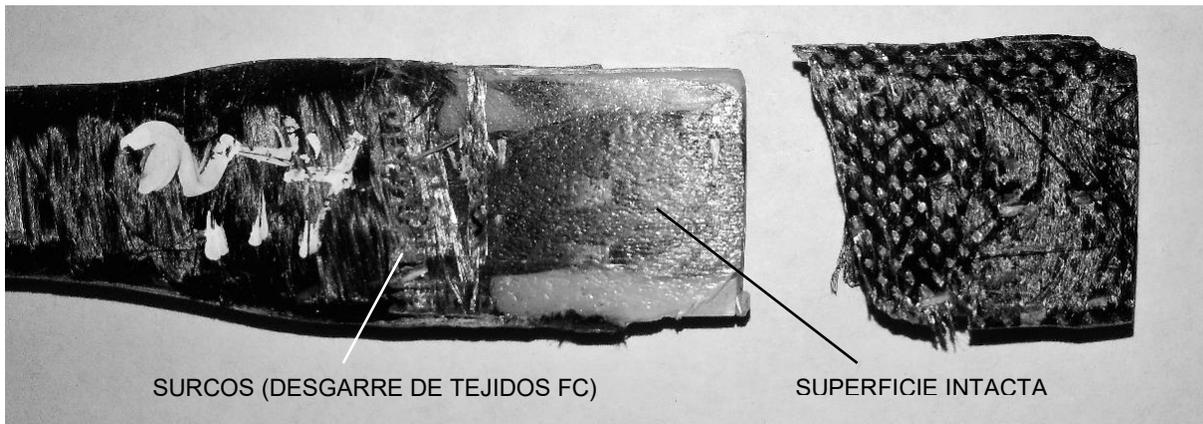


FIGURA 145 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-D (frente).

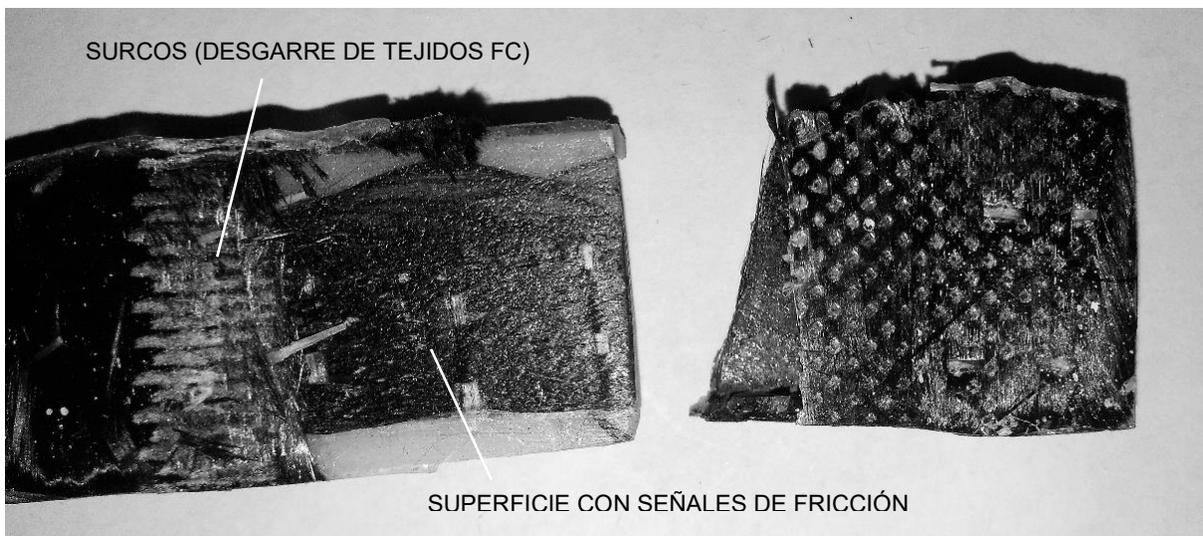


FIGURA 146 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-D (atrás).

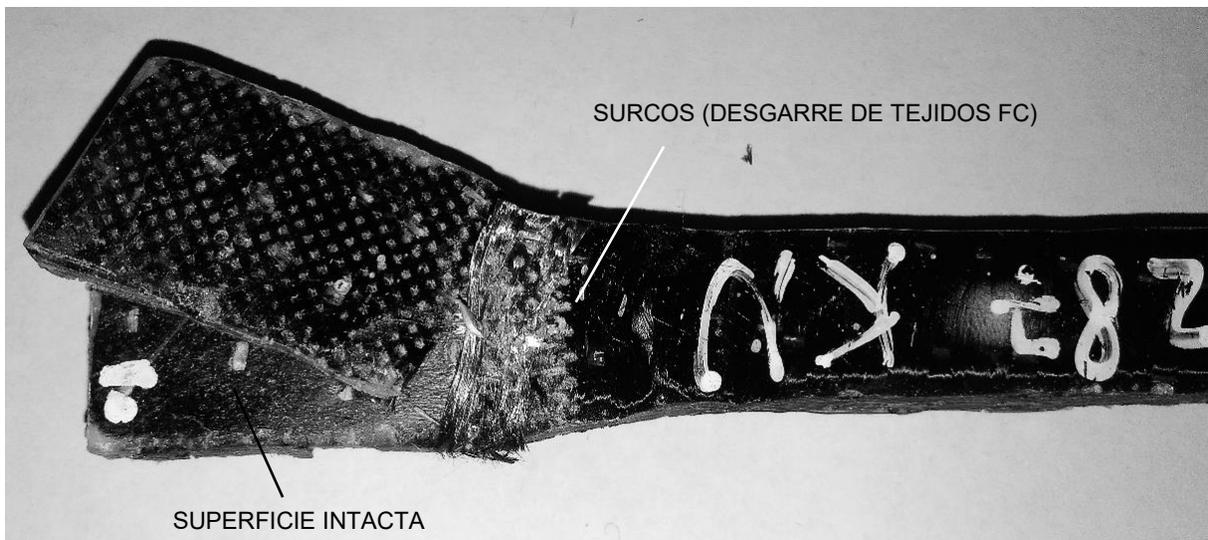


FIGURA 147 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-E (frente).

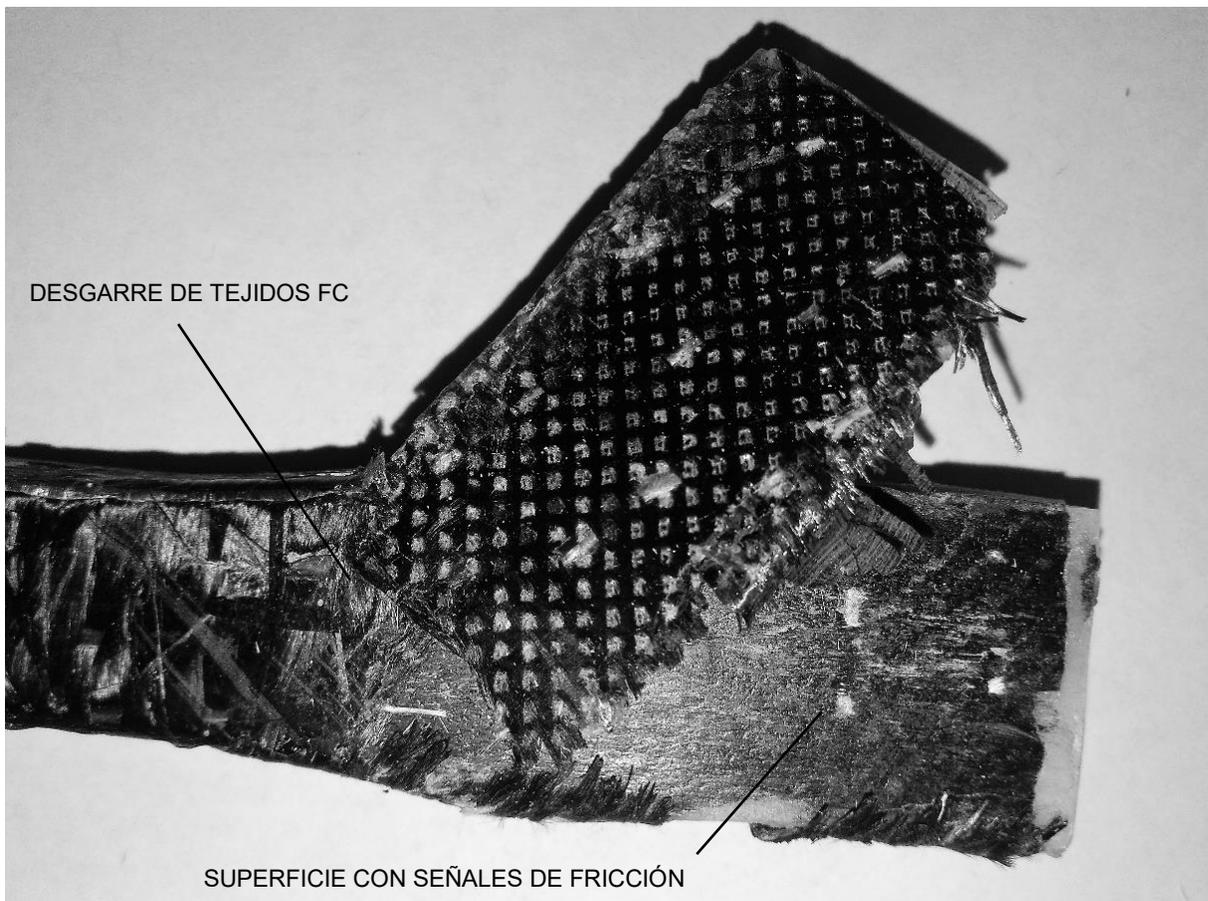


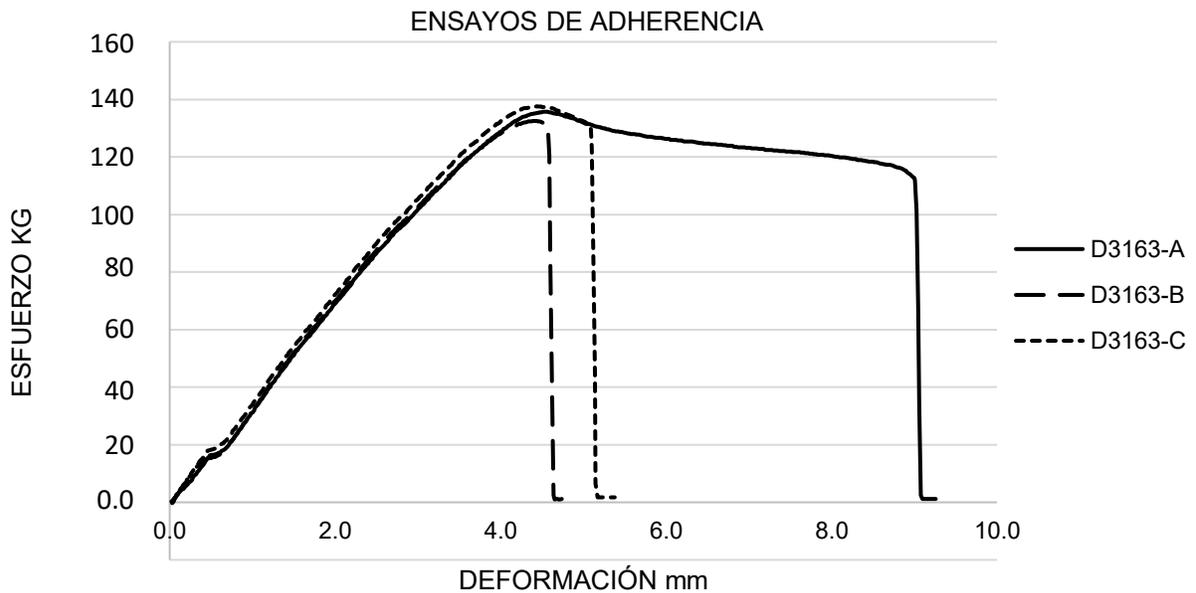
FIGURA 148 DETALLE FRACTURA PROBETA D3163-E (atrás).

RESULTADOS

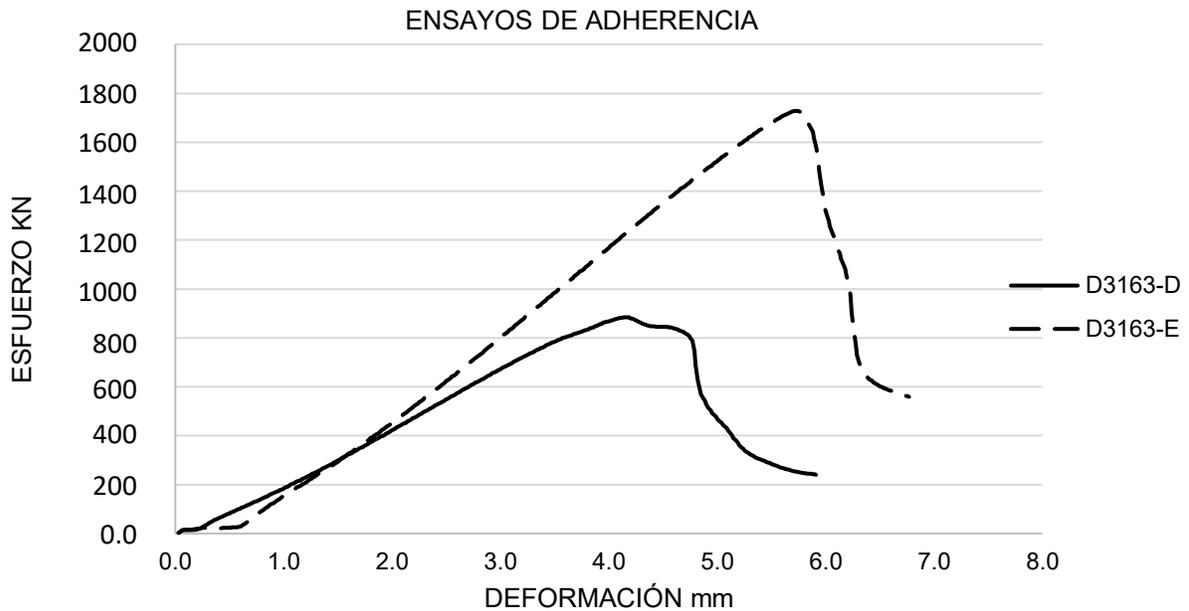
Los primeros tres especímenes se consideran para evaluar la adherencia entre materiales y los últimos dos la adherencia bajo una situación de trabajo crítico. Las piezas D3163- B y C consideran la fibra de carbón en el nodo y la pieza D3163-A únicamente resina; las probetas D3163-D y D3163-E se encontraban completamente envueltas por el refuerzo de FC. En la tabla 32 se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo, en las gráficas 14 y 15 el comportamiento mecánico de cada grupo; en la tabla 33 se muestran los cálculos para determinar las propiedades mecánicas y en la tabla 34 los valores promedio obtenidos a través de la media aritmética " \bar{x} ".

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D3163-A	1.357	135.7	9.26	111.40
D3163-B	1.325	132.5	4.74	56.60
D3163-C	1.376	137.6	5.38	64.40
D3163-D	8.841	884.1	5.91	70.80
D3163-E	17.287	1,728.7	6.77	81.20

TABLA 30 RESULTADOS DE ENSAYOS DE ADHERENCIA.



GRÁFICA 14 COMPORTAMIENTO MECÁNICO PROBETA D3163-A (DÚCTIL), PROBETA D3163-B (FRÁGIL) Y PROBETA D3163-C (FRÁGIL)



GRÁFICA 15 COMPORTAMIENTO MECÁNICO PROBETA D3163-D (FRÁGIL) Y PROBETA D3163-E (FRÁGIL)

Probeta	Área (cm ²)	Carga (kg)	Deformación total (cm)	Esfuerzo (kg/cm ²)
ADHERENCIA – PROBETAS LARGAS				
D3163-A	0.45	135.70	0.93	299.72
D3163-B	0.40	132.50	0.47	330.38
D3163-C	0.39	137.60	0.54	348.96
ADHERENCIA ESFUERZO CRÍTICO				
D3163-D	1.56	884.10	0.59	566.04
D3163-E	1.51	1,728.70	0.68	1,142.18

TABLA 31 CÁLCULOS: ESFUERZO MÁXIMO PROBETAS D3163.

	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)
ADHERENCIA – PROBETAS LARGAS	
Media aritmética	326.350
ADHERENCIA ESFUERZO CRÍTICO	
Media aritmética	854.110

TABLA 32 CÁLCULO DE \bar{x} .

CONCLUSIONES

Las probetas D3163 exhibieron una adherencia aceptable entre componentes, pero debido a la ubicación de la fractura no se puede establecer valores del esfuerzo máximo: la rotura se dio en un componente y no a causa del deslizamiento de las uniones en el nodo. Sin embargo, los resultados obtenidos son parámetros de la fuerza adherente entre polímeros a través del aumento de la rugosidad en la superficie de unión. En lo que respecta a la adherencia entre tejidos de FC y resina epóxica y su desempeño durante los ensayos: exhiben una fuerza adherente aceptable; se establecen las siguientes conclusiones:

- La estabilidad de las marices, al ser aplicadas en el termoplástico ABS, depende de la rugosidad en la superficie de contacto.
- La unión polimérica entre el termoplástico ABS y el termofijo Q1 se considera aceptable bajo la consideración de una superficie rugosa en las superficies que se disponga de unir con la resina.
- La adhesión de piezas de ABS con el termofijo Q1 manifiesta una aceptable resistencia ante la aplicación de una fuerza perpendicular a la dirección de la unión.

7.6 ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE

El ensayo de envejecimiento a la intemperie evalúa la estabilidad de los materiales plásticos cuando son expuestos a los cambios de temperatura, humedad, radiación y contaminación en el exterior: la duración relativa del material en una localidad específica. Para este ensayo se consideró un periodo de prueba de cinco meses en la Ciudad de México y una de tres meses en la ciudad de Terrassa, Barcelona; el objetivo fue evaluar las condiciones de desgaste a una latitud y longitud distinta a la de la CDMX.

EQUIPO Y HERRAMIENTA

Para este ensayo se utilizaron dos bastidores de aluminio, uno de 15cm de largo, 10cm de ancho y 10cm de alto, y otro de 13cm x 10cm, una brújula, un termopar, un equipo para monitoreo y recolección de datos (*data logger*) marca *Agilent* y una caja de conexiones para intemperie. En la figura 149 se muestra el equipo *data logger* y el termopar.



FIGURA 149 DATA LOGGER AGILENT Y TERMOPAR. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratorio de Sustentabilidad y Energía, y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

PROTOCOLO

El ensayo de envejecimiento a la intemperie consiste en colocar una probeta del material en un bastidor de modo que la pieza se mantenga de forma vertical y orientada hacia el sur para asegurar la exposición a la radiación UV. Y una vez transcurrido el periodo de prueba se debe comparar físicamente el desgaste adquirido en relación a las

condiciones climáticas registradas en cada espécimen, para lo cual se utiliza una pieza de control. En la figura 150 se muestra el esquema del ensayo.

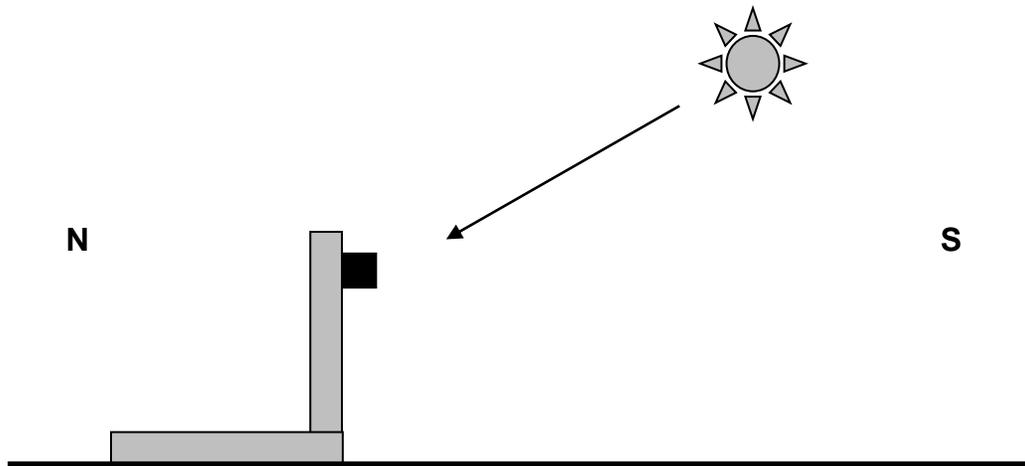


FIGURA 150 ESQUEMA ENSAYO ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE.

Para el ensayo de envejecimiento en la CDMX se colocó una probeta de material en bastidor de aluminio y se fijó con cinchos de plástico. Posteriormente se montó el bastidor en una estructura de madera y poliestireno (dicha estructura formo parte de otra investigación la cual llevo en paralelo la recolección de datos) en un área abierta de radiación solar permanente, y se procedió a colocar un extremo del termopar para el monitoreo de temperatura en la superficie del espécimen y el otro extremo al *data logger*. Una vez conectados los equipos se establecieron los parámetros de monitoreo en el equipo por periodos de 5 minutos. En las figuras 151 - 153 se muestra el montaje de la probeta D1435-01 en la azotea del edificio de la Unidad de Posgrado en Ciudad Universitaria.

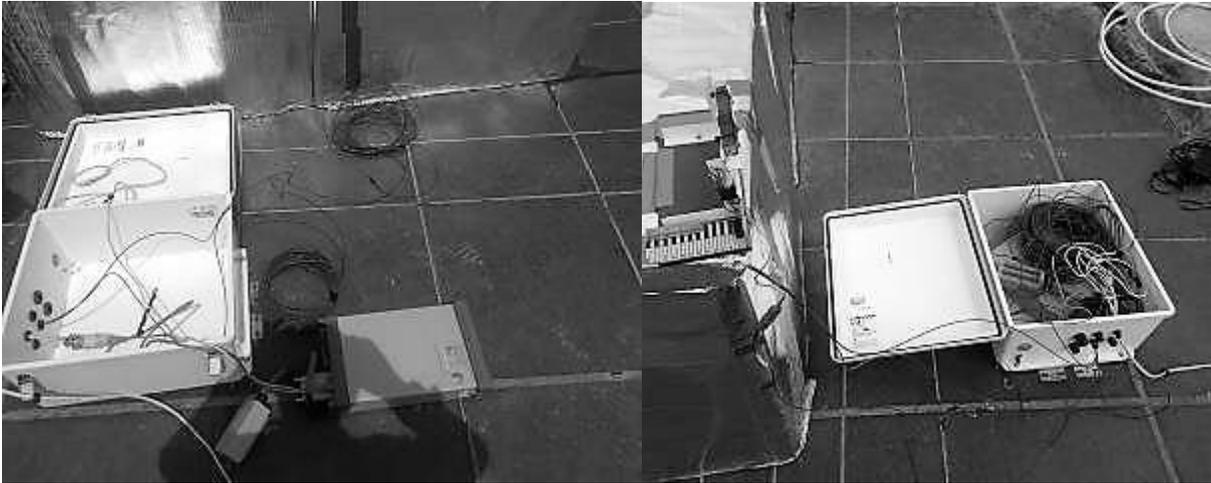


FIGURA 151 MONTAJE DE PROBETA D1435-01. Fotografía del equipo tomada en la Unidad de Posgrado con permiso de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

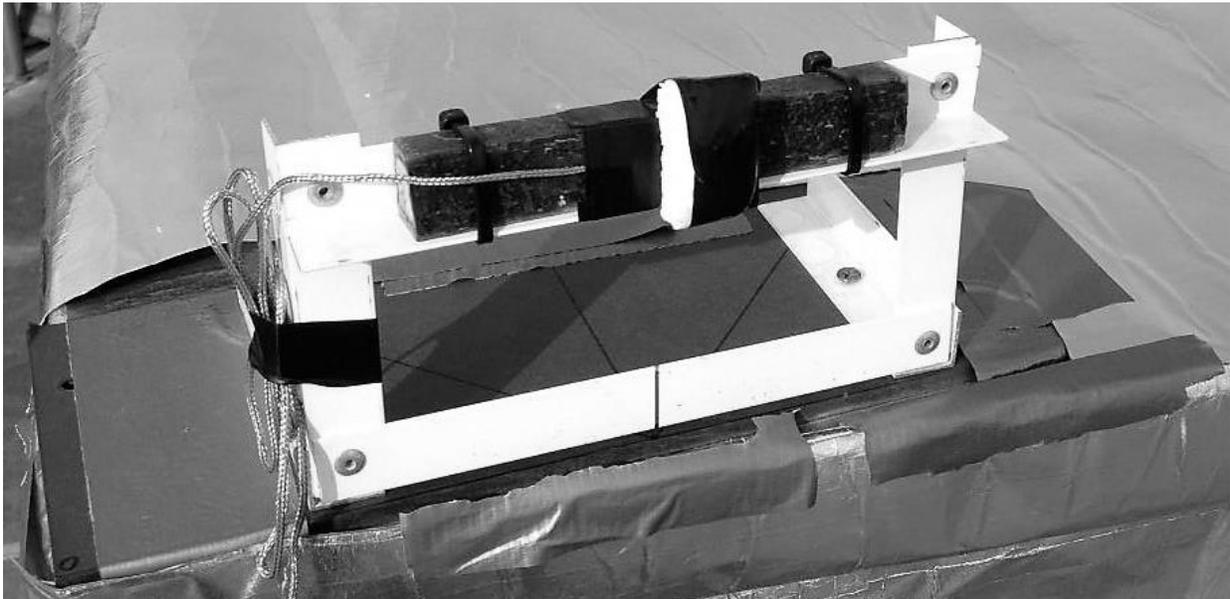


FIGURA 152 PROBETA D1435-01 MONTADA EN BASTIDOR CON TERMOPAR. Ídem.



FIGURA 153 PROBETA D1435-01 MONTADA EN AZOTEA DE LA UNIDAD DE POSGRADO. Ídem.

Para el ensayo de envejecimiento en la Ciudad de Terrassa, Barcelona, se colocó una probeta de material en bastidor de aluminio y se fijó con cinchos de plástico. El bastidor se colocó en las proximidades del estacionamiento de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en un área con radiación permanente. Para el monitoreo de la temperatura se consultaron los datos históricos emitidos a través de internet, para los cuales utilizan una estación meteorológica W-8681 conectada a un ordenador *Raspberry pi* con el *software weewx* [72]. En las figuras 154 y 155 se muestra el montaje de la probeta D1435-02 en las inmediaciones de la UPC Campus Terrassa, Barcelona.

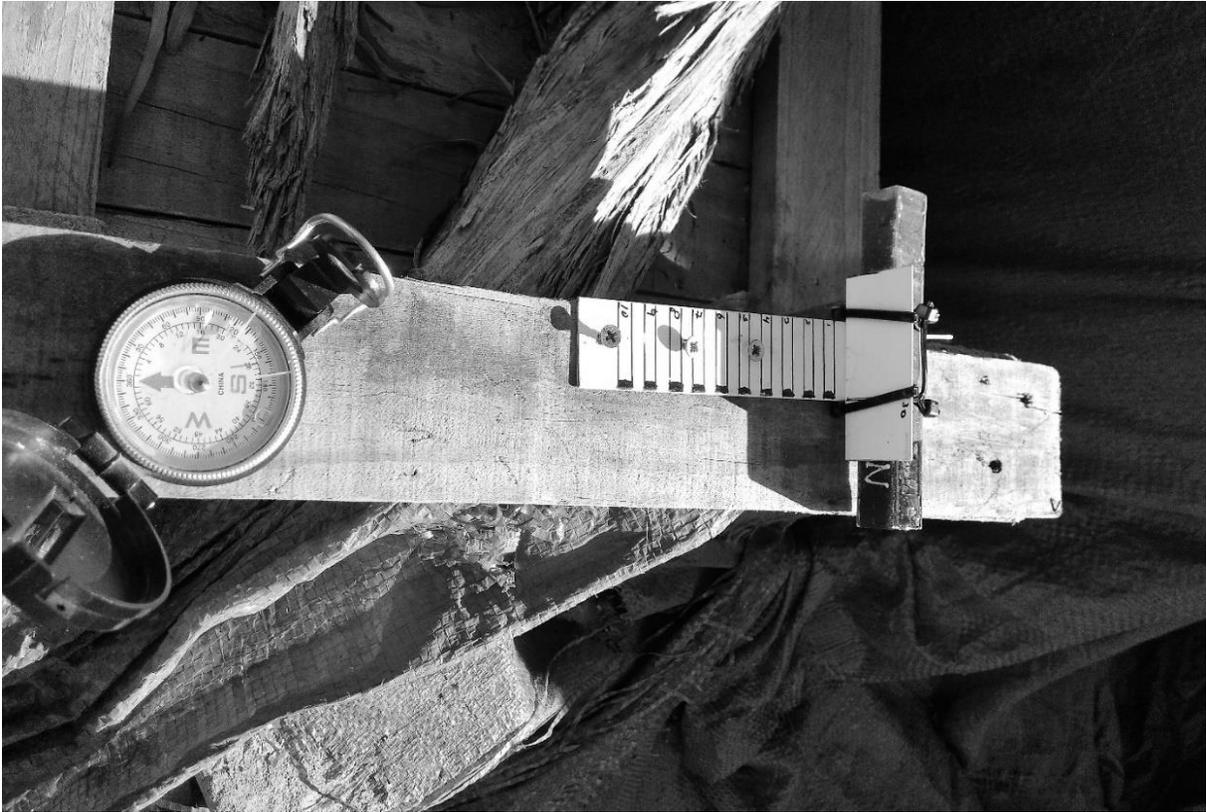


FIGURA 154 PROBETA D1435-02 MONTAJE EN CAMPUS UPC. Fotografia tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).



FIGURA 155 PROBETA D1435-02 MONTAJE EN CAMPUS UPC. Ídem.

ENSAYOS

Durante la revisión de la información capturada por el equipo *data logger* se identificaron lecturas de 30°C - 50°C desde el final de la primera semana de diciembre de 2016, las cuales sobrepasan los registros históricos de temperatura máxima de la Ciudad de México. Por lo tanto dicha información fue descartada del análisis de los especímenes.

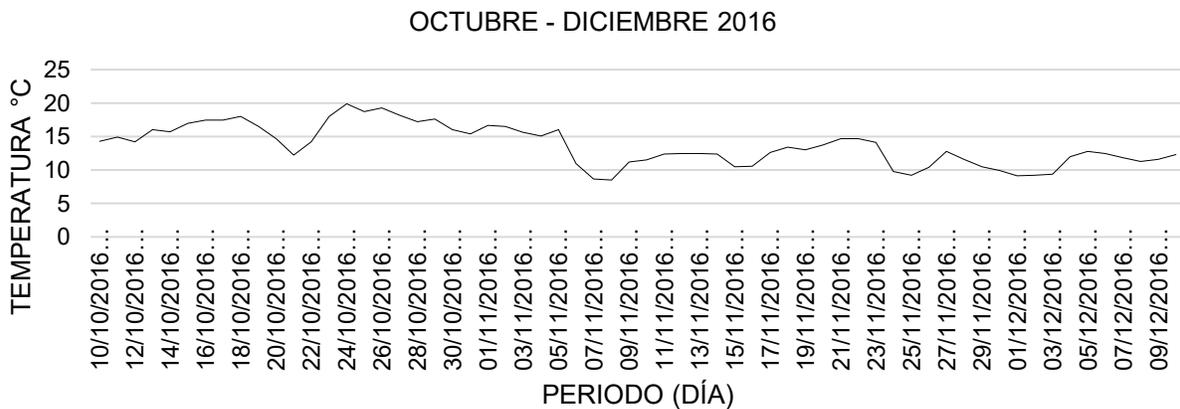
Se utilizó una pieza de control aislada para comparar los efectos de las condiciones climáticas de las otras dos probetas, esta pieza de control se denominó D1435-00. La evaluación de la probeta D1435-01 (Ciudad de México) se llevó a cabo por un plazo comprendido entre del 13 de septiembre al 05 de diciembre de 2016; mientras que la evaluación de la probeta D1435-02 (Terrassa, Barcelona) comprende un plazo del 10 de octubre al 10 de diciembre de 2016. Ambos periodos coinciden con la temporada de otoño, en la figura 156 se muestran las probetas D1435-00,01 y 02.



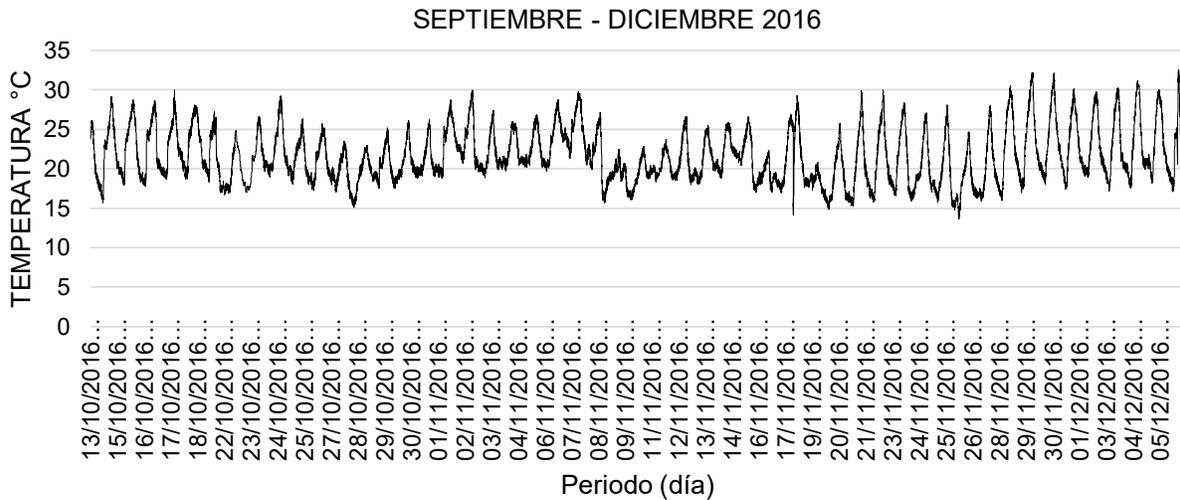
FIGURA 156 PROBETAS D1435 – 00(CONTROL), 01 (MÉXICO) Y 02 (BARCELONA).

ANÁLISIS

A simple vista las probetas no parecen tener ninguna diferencia entre sí, sin embargo si se observa con detalle se podrá ver en la figura 156, en la probeta D1435-02, una zona con tonalidades blanco-gris; y en la misma figura, en la parte inferior de la probeta D1435-01, se aprecia una decoloración similar. La diferencia entre el tamaño del área de desgaste se debe a las distintas condiciones del clima a que fueron expuestas las piezas: mientras que en Terrassa el clima fue predominantemente frío, en la Ciudad de México la temperatura se puede considerar fresca – cálida. En las gráficas 16 y 17 se muestran el comportamiento de la temperatura en Barcelona y México respectivamente.



GRÁFICA 16 TEMPERATURA DEL 10 DE OCTUBRE AL 10 DE DICIEMBRE DE 2016, TERRASSA, BARCELONA.



GRÁFICA 17 TEMPERATURA DEL 13 DE SEPTIEMBRE AL 5 DE DICIEMBRE DE 2016, CIUDAD DE MÉXICO.

En la gráfica 16 se observa que la temperatura de Terrassa registro valores de 8°C – 15°C y en relación a la probeta D1435-02, el clima frío de Terrassa presento lluvias escasas y cielo nublado la mayor parte del plazo de prueba, así que esta probeta tuvo una exposición predominante a bajas temperaturas, en las figuras 157 y158 se muestra a la probeta en distintas fechas de exposición.

En relación al desgaste de la matriz, se considera mínimo, siendo el área de la pieza que estuvo en contacto con el bastidor la que presenta la mayor afectación, la causa de esto se considera en la existencia de humedad en dicha zona a partir de la lluvia y que debido al breve soleamiento no fue evaporada, sino absorbida por la matriz durante el transcurso de la prueba, en las figuras 159 y 160 se muestra el detalle de la probeta D1435-02.

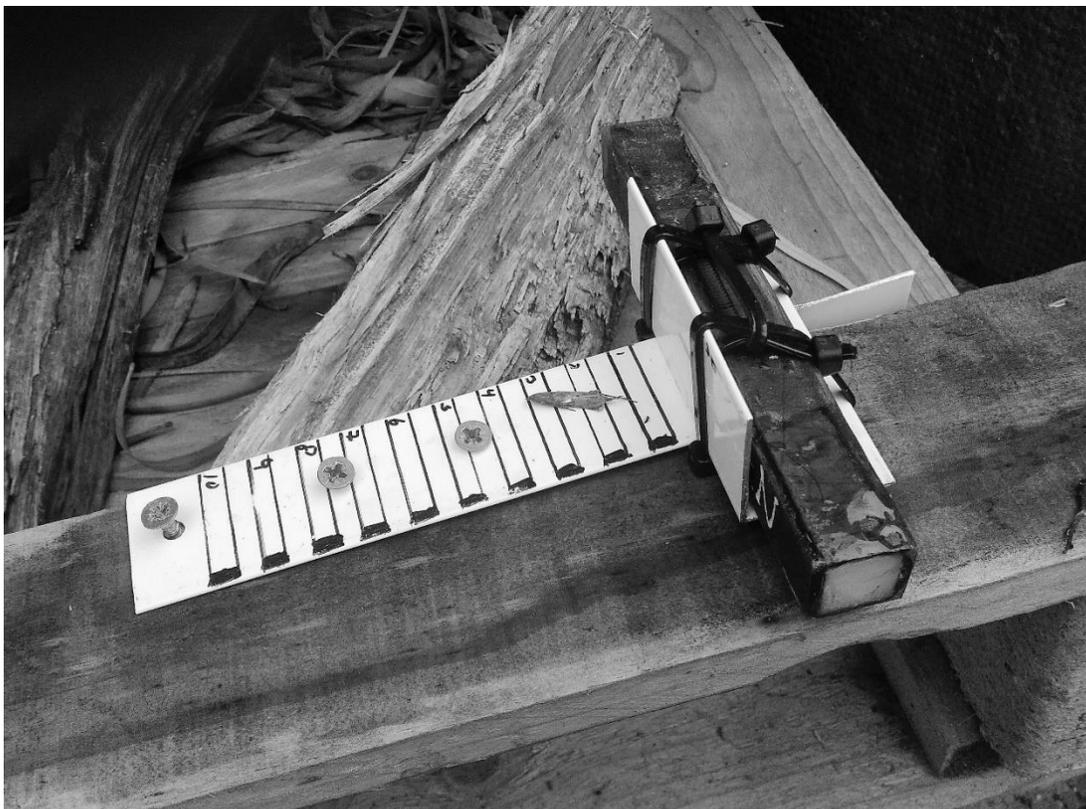


FIGURA 157 PROBETA D1435-02, 24/10/2016, TERRASSA, CLIMA FRIO. Fotografia tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).



FIGURA 158 PROBETA D1435-02, 14/11/2016, TERRASSA, CLIMA FRIO. Ídem.



FIGURA 159 PROBETA D1435-02, ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE.



FIGURA 160 PROBETA D1435-02, DETALLE ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE.

En la figura 160 se observa que la humedad absorbida por la matriz causo en ella separaciones de resina epóxica a modo de películas con un grosor aproximado de 0.05-0.12mm, lo que indica la profundidad de la penetración de humedad; sin embargo ninguna de estas capas se desprendió del material y únicamente la zona descrita manifiesta el daño, el resto de la probeta no muestra ningún daño perceptible en la matriz por lo que se considera intacta en su integridad estructural.

En el caso de la Ciudad de México, en la gráfica 17 se observa que la temperatura presento variaciones de 15°C – 25°C con lluvias abundantes y cielo parcialmente nublado (según la hora del día) lo que indica que la probeta D1435-01 estuvo expuesta tanto a humedad como a radiación constante. En las figuras 161 y 162 se muestra a la probeta en distintas fechas de exposición. Esta probeta manifiesta una decoloración en la superficie, aristas y costados, la cual es producto de la fotodegradación por la exposición a la luz natural (radiación UV), en las figuras 163 y 164 se muestra el detalle de la probeta D1435-01.



FIGURA 161 PROBETA D1435-01, 20/10/2016, CIUDAD DE MÉXICO, CLIMA FRESCO - FRÍO. Fotografía del equipo tomada en la Unidad de Posgrado con permiso de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



FIGURA 162 PROBETA D1435-01, 17/11/2016, CIUDAD DE MÉXICO, CLIMA FRESCO - FRÍO. Ídem.



FIGURA 163 PROBETA D1435-01, ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE.



FIGURA 164 PROBETA D1435-01, DETALLE ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE.

En las figuras 163 y 164 se observa que el envejecimiento de la pieza se debe a la radiación UV, ya que esta misma evaporó la humedad que la lluvia pudo haber depositado en la superficie de la matriz y evitó la absorción de agua. Pero, los cambios de temperatura durante la evaporación de la humedad provocaron separaciones de capas de resina en los extremos de la pieza, aunque por su pequeño tamaño no se consideraron relevantes en cuanto a la integridad estructural de la probeta, la cual se aprecia intacta.

CONCLUSIONES

La probeta D1435-01 manifestó el envejecimiento relativamente severo debido a la intensidad de la radiación UV durante el periodo comprendido de Septiembre a Diciembre en la Ciudad de México. No obstante que el daño por la fotodegradación es mayor al de la probeta de expuesta en Terrssa, Barcelona, la pieza de CDMX no presenta ningún daño estructural observable a simple vista, que pueda afectar su rendimiento. Sin embargo si se considera un periodo de mayor exposición, la incidencia de los rayos UV podría tener un efecto considerable en la estabilidad estructural del compuesto. Por otro lado, el envejecimiento de la probeta D1435-02 es prácticamente imperceptible salvo por una zona en la que hubo absorción de humedad constante. Esta condición manifiesta una aceptable resistencia a temperaturas de 8°C – 15°C y deja ver que la resina es susceptible de leves separaciones de capas en un entorno húmedo.

En general el desempeño del material en un clima frio y uno cálido es aceptable, aunque con reservas en ambos. La posible implementación del material como una estructura sería apropiada para entornos con climas relativamente húmedos en los que los metales son sensibles a la corrosión y se puede aumentar la resistencia química de los compuestos a través de aditivos especiales. En correspondencia con el texto anterior, se establecen las siguientes conclusiones de los ensayos de envejecimiento a la intemperie:

- El compuesto de ABS + FC presenta un envejecimiento acelerado en climas cálido/húmedos.
- El compuesto de BS + FC presenta una aceptable resistencia en climas frío/seco.
- Con base en el periodo de prueba, el compuesto manifiesta un nivel de fotodegradación bajo en un periodo de 2 – 3 meses.

8.0

CONCLUSIONES

Para finalizar esta investigación se presentan las conclusiones finales, realizadas a través de la revisión de los datos obtenidos y comparando estos con las propiedades mecánicas de otros materiales para establecer las características físicas y mecánicas del compuesto ABS+FC, así como definir los tipos de sistemas estructurales que pueden reforzarse o realizarse con él. Se mencionan los objetivos y metas presentados al inicio de la investigación que lograron alcanzarse; y las condicionantes - determinantes que podrían beneficiar o retrasar la implementación de compuestos estructurales en la industria constructora en México.

8.1 TRAYECTORIA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se basó en la hipótesis de que si se refuerza una estructura de ABS con capas de fibras de carbón orientadas paralelas al eje y capas orientadas de forma perpendicular, el compuesto superaría el umbral de servicio del concreto armado y podría competir estructuralmente con él; los resultados obtenidos en los ensayos comprobaron que la hipótesis es correcta para el caso de algunos tipos de concretos.

TENSIÓN

Con base en la capacidad de carga a tensión que ofrecen las fibras de carbón, se planteó la posibilidad de superar el umbral de servicio del acero en paralelo, sin embargo los datos de los ensayos comprobaron que el compuesto no puede superar la capacidad de carga de un acero A36. No obstante el rendimiento del material exhibe propiedades mecánicas muy similares a las del aluminio y un desempeño aceptable para trabajo ligero, cargas de 800 – 1,000 Kg/cm²; por lo que se puede considerar como un refuerzo estructural admisible.

Los resultados del ensayo consideran por debajo de los esperados, debido a la ubicación de la fractura de las probetas solo se puede considerar como una aproximación a él verdadero valor de resistencia a tensión. El sustento para esta conclusión se basa en la revisión de la ubicación de la fractura de todos los especímenes en uno de los extremos, ya que de acuerdo con las normas de ASTM debieron darse en la zona esbelta; la repetición en la ubicación evidencia que presión ejercida de las mordazas de la máquina provocó un daño en la matriz.

En conjunto con esa condición se debe tomar en cuenta que las probetas fueron realizadas de forma “artesanal” y las imperfecciones como burbujas, áreas en las que la resina no se impregno por completo en el tejido y las irregularidades en las aristas aumentaron considerablemente las posibilidades de falla por la transmisión de la carga. Por lo tanto, los valores de carga, aunque aceptables, son un precedente para continuar con la investigación de materiales compuestos por polímeros de ingeniería y fibras de alto rendimiento con la finalidad de integrarlos como estructuras en el sector constructor.

COMPRESIÓN

El comportamiento del núcleo de plástico ABS sobrepasó las expectativas de servicio en los ensayos de compresión, ya que en los ensayos de tensión quedó completamente subordinado a la matriz epóxica sirviendo únicamente como relleno (como se esperaba). En contraste, durante las pruebas de compresión se observó la influencia de la matriz sobre el ABS: las capas de FC limitaron la deformación del núcleo favoreciendo la oposición del mismo a la carga aplicada; es decir que el ABS aumentó su límite plástico puesto que el refuerzo orientado a 20° le permitió a la FC realizar trabajo de tensión eficiente para absorber esfuerzos perpendiculares al eje de la pieza: se comportó como un cincho oponiendo resistencia a la deformación del núcleo.

Otro hecho importante de los resultados obtenidos es que a pesar de la manufactura “artesanal” y la baja probabilidad de asegurar una superficie de contacto completamente horizontal de las superficies de contacto, los umbrales de servicio de las piezas largas y las cortas le permiten al compuesto ABS+FC, acorde con las gráficas y datos de esfuerzo – deformación, competir a compresión (bajo ciertas consideraciones) con concretos cuya resistencia se considere con un $f'c$ de 100 – 400 kg/cm².

El material no puede establecerse un remplazo directo del concreto armado pero exhibe una alternativa para reforzarlo o para el desarrollo de un nuevo sistema estructural con trabajo a compresión basado exclusivamente en el compuesto ABS+FC. Y como se puede constatar en las gráficas 9 y 10, el comportamiento mecánico del material muestra que se desempeña de forma más eficiente en secciones cortas, pero exhibe una resistencia aceptable en elementos esbeltos; esta condición de trabajo es susceptible a fallas por pandeo local y torsión.

Como se observó en el análisis de estos ensayos, además de las fallas por pandeo local, se detectó la vulnerabilidad del compuesto a través de las irregularidades en sus aristas. Se hace mención de una variable que podría mejorar el rendimiento de la misma combinación de materiales para un caso futuro de investigación: la geometría de la sección.

Con base en la experiencia de esta investigación se hace la hipótesis prospectiva: una sección cilíndrica del compuesto ABS+FC que combine la orientación de los tejidos de refuerzo, reducirá la transmisión de cargas excéntricas (no hay aristas) durante el ensayo de compresión si se garantizan superficies de contacto completamente horizontales entre las probetas y el equipo de pruebas durante el ensayo a compresión.

FLEXIÓN

El comportamiento a flexión se ve condicionado a la geometría de las probetas ensayadas y con base en los resultados de las pruebas se considera para ambos casos que se puede utilizar como un tipo de subestructuras para el montaje de instalaciones o cubiertas ligeras, ya que su umbral de servicio se localiza entre los $3\text{kg}/\text{cm}^2$ (piezas tipo sándwich) y $14\text{kg}/\text{cm}^2$ (sección prismática). No obstante, ya que la geometría de la sección tiene injerencia sobre el servicio que oferta. Sería necesario realizar estudios con distintas geometrías para mejorar el comportamiento mecánico ara el servicio a flexión.

Una de las premisas de esta investigación fue la creación de una sección compuesta de ABS+FC capaz de cubrir claros extraordinarios con perfiles cuyas dimensiones fueran inferiores a las que se utilizan en la actualidad pero con las particularidades que de fueran ligeras y de fácil montaje. En correspondencia con los datos obtenidos durante el ensayo a flexión se considera que la variable de la geometría, al igual que para el ensayo de compresión, podría tener suficiente injerencia para dotar al compuesto como un elemento estructural con estados de servicio superiores a los resultados exhibidos.

Basado en la eficiencia del rectángulo para resistir el cortante en elementos horizontales con esbelteces en relación $1/h < 10$ [73] (es decir a mayor peralte mejor resistencia), se hace la hipótesis prospectiva de que una sección rectangular de ABS+FC que combine la orientación de los tejidos de refuerzo será capaz de resistir estados de servicio superiores a los $50\text{kg}/\text{cm}^2$. Considerando que dicha hipótesis se comprobara y manifestara un resultado cercano al descrito, el compuesto mantendría las mismas consideraciones de uso: instalaciones y estructuras ligeras.

TASA DE ARDOR Y TIEMPO DE QUEMADO

Al exponer el compuesto a una llama con temperatura de 800°C - 1300°C por 30 segundos, se pudo constatar una relativa resistencia al fuego; la segunda matriz no alcanza a descomponerse en su totalidad durante ese periodo de tiempo. Presento pequeños agrietamientos con carbonización superficial, es decir que la resina epóxica se endureció con el aumento de temperatura hasta volverse frágil y superficialmente comenzó a descomponerse sin alcanzar el tejido de refuerzo. Sin embargo, en los extremos el núcleo ABS sufrió un proceso de licuefacción seguido de la descomposición; como era de esperarse de la exposición directa al fuego a un polímero.

En contraste con la descripción previa se puede considerar que la propagación de la llama se debió principalmente a la vulnerabilidad del núcleo expuesto. No obstante respecto a la estabilidad y resistencia del cuerpo de la probeta se puede considerar como un elemento de refuerzo que resiste breves exposiciones al fuego bajo la condición de ser remplazarlo inmediatamente sucedida dicha situación. Para el caso de siniestro, los resultados observados exponen dos hechos relevantes: cuando la pieza fue expuesta al fuego hasta la carbonización se observó que una vez que se consumió la segunda matriz, el tejido de refuerzo funcionó como aislante parcial de la temperatura para la primera matriz.

Cuando la probeta estaba completamente envuelta en llamas la pieza mantenía su estabilidad geométrica, con un punzón se le aplicó una carga para constatar si el núcleo había entrado en estado de transición vítrea o fusión, a lo cual se comprobó la rigidez parcial: por exploración física se pudo percibir un breve momento de maleabilidad (sobre todo en los extremos), sin embargo no la suficiente para deformar por completo el espécimen. Una vez consumida la segunda matriz el tejido de FC desprendió algunas partículas y comenzó a desprenderse de la primera matriz. Al extinguirse la llama se observó que la primera matriz se consumió en un 70%, ya que en las fotografías 131-133 se pueden observar secciones en las que el núcleo se fusiona con los tejidos, otras en don de la matriz sólo manifiesta agrietamientos con carbonización superficial y descomposición parcial del núcleo.

Por lo que se concluye que el compuesto es resistente a breves exposiciones al fuego que dañan con rapidez a la matriz causando un daño irreversible pero no severo y en caso de siniestro la tasa de ardor comprueba que su descomposición total requiere de una prolongada exposición y temperaturas superiores a 1300°C.

ADHERENCIA

Los ensayos de adherencia se realizaron para determinar la eficiencia mecánica de unir los materiales que componen el material a través del pulido de las superficies del plástico y de una de las matrices. Para su comprobación se realizaron tres probetas en las que se evaluó la adherencia entre polímeros (resina epóxica +ABS) y la adherencia entre los tres materiales (ABS, resina, FC) con la diferencia en la orientación del tejido de FC. El resultado de los tres casos no resultó como se esperaba debido a que la ruptura no se dio en el nodo de la unión; no obstante se puede afirmar que existe una buena capacidad adherente cada uno de los casos. Se tomaron como referencia de trabajo crítico de adherencia dos probetas de los ensayos de tensión, cuyo desempeño no logró la meta de dicho ensayo (fractura de la pieza).

Los resultados de las primeras tres probetas comprueban, además de la adherencia, el principio de acción combinada. Si se revisa la gráfica 14 se podrá constatar cómo la probeta D3163-A (unión de polímeros) exhibe un momento plástico mucho más elevado que las otras dos (ABS+FC). Esta condición comprueba que durante la unión de los materiales la fibra de carbón, ya sea a 20° o paralela al eje, y la resina epóxica transforman a un polímero dúctil en un material completamente plástico; y el caso de la unión de entre polímeros exhibe como un termoplástico también induce propiedades de ductilidad en un termofijo.

Las piezas tomadas de los ensayos de tensión sirven para establecer un precedente del comportamiento adherente con entre la matriz y la FC ante un esfuerzo crítico; estas fallas queda ponen en evidencia el daño causado por las mordazas al momento de cerrarse sobre las probetas, el impacto fue de tal magnitud que origino surcos que arrancaron la segunda matriz: sustentando la conclusión de que las

mordazas dañaron las probetas a tensión; otras fallas observadas fueron la presencia de tejidos secos y áreas de contacto sin pulir (reducción de la fuerza adherente).

No obstante para todos los casos se concluye que tuvieron una fuerza adherente aceptable y se pueden considerar como una mezcla compatible de propiedades físicas y mecánicas.

ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE

Como se mencionó en el apartado de este ensayo, el objetivo consistió en evaluar la estabilidad del compuesto ante los cambios de temperatura, humedad, radiación y contaminación en el exterior. Como parte de los parámetros del experimento se consideraron dos latitudes distintas con climas completamente diferentes para constatar la versatilidad de diseño que podría llegar a ofertar el compuesto en distintos escenarios. El contraste entre muestras fue, esencialmente, un clima cálido-húmedo (CDMX) y uno frío-seco (Terrassa, Barcelona) con periodos de exposición con una duración de tres y cuatro meses, respectivamente.

Este ensayo mantuvo una pieza de control aislada por completo de los distintos cambios de temperatura hasta el final de cada periodo. AL comparar las diferencias físicas entre los tres especímenes sólo se pueden apreciar los cambios en las matrices de forma macroscópica, en el caso de la probeta de la CDMX el cambio en la tonalidad de la matriz, de ser translúcida a ser de un tono amarillento opaco, indica la fotodegradación de la resina, considerando el registro de temperaturas entre 15°C – 25°C y la presencia de lluvias prolongadas provocaron desprendimientos de la segunda matriz (erosión) sin llegar a manifestar un daño severo.

Para la probeta de Barcelona, sólo es posible observar la descomposición superficial de la segunda matriz en una sección específica (área en contacto permanente con el bastidor. Esta pieza estuvo expuesta sobre todo a bajas temperaturas (8°C -15°C) y a lluvias muy escasas. Por lo que se establece que el desgaste del espécimen se debe sobre todo a la absorción de agua en el área de contacto permanente. Con base en que la exposición a la lluvia sólo ocurrió durante la segunda semana del primer mes de prueba, y que esta exposición se remite únicamente a un número de 4 a 5 lluvias; se

establece que el compuesto manifestó un eficiente comportamiento al clima frío. Físicamente sólo presenta descamaciones cuyo grosor es inferior a 1 mm y exclusivamente en el área dónde no pudo evaporarse el agua retenida.

Al comparar las tres probetas, visualmente no es posible determinar diferencias extraordinarias. Por lo que para determinar los efectos concretos de esta prueba en la composición del compuesto es necesario realizar estudios de la microestructura y establecer una conclusión cuya confiabilidad sea de al menos el 90%. Con base en los resultados actuales se puede establecer que el material es apto para servicio en zonas con bajas temperaturas de hasta de 8°C o para su aplicación en climas cálido-húmedos con temperaturas hasta de 20°C.

8.2 CONTRASTE DE PROPIEDADES

La propuesta del compuesto ABS+FC se basa en la producción modulada en serie de materiales ligeros capaces de soportar cargas de diseño para reforzar, o reemplazar para algunas aplicaciones, al concreto armado y al acero como elementos estructurales de la industria de la construcción.

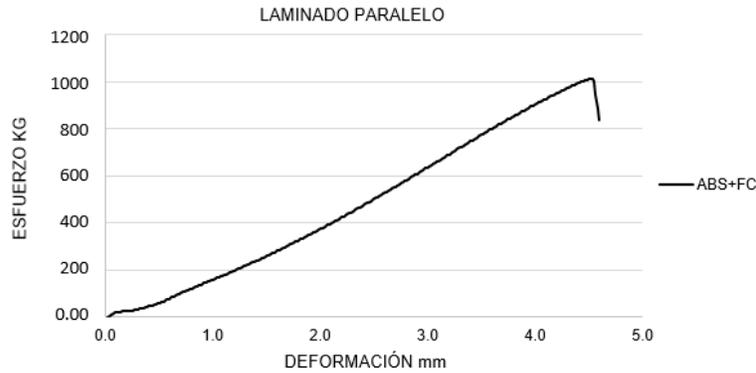
ACERO

Los resultados obtenidos en la investigación comprobaron la capacidad del compuesto para el servicio ligero; esta conclusión se sustenta comparando los datos obtenidos con las propiedades de los materiales con los que compite (concreto y acero). En la tabla 33 se comparan los valores del compuesto y el acero A-36.

	ABS+FC	Acero A36
Peso volumétrico kg/m ³	1,090	7,844
Densidad gr/cm ³	1.09	7.85
Módulo de Young kg/m ²	31,031	2,110,812
Esfuerzo unitario kg/m ²	1,089	4,000
Módulo de Poisson	0.4148	0.33

TABLA 33 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS: COMPUESTO ABS+FC - ACERO A-36. Tabla realizada con datos y cálculos de la investigación, Callister y Fitzgerald.

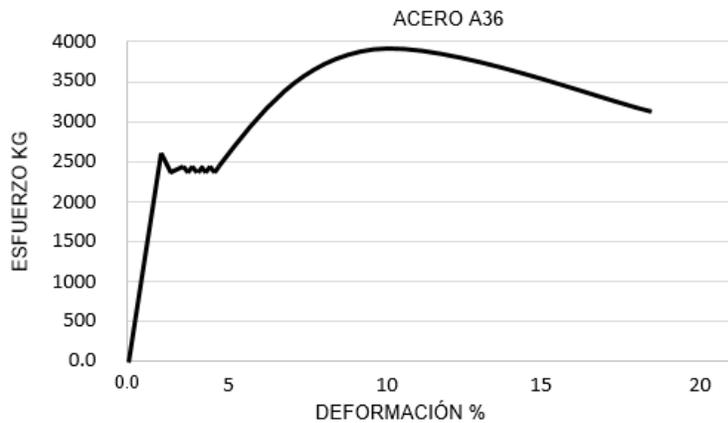
En la gráfica 40 se puede constatar que el valor la masa y la densidad del compuesto son aproximadamente de 1/10 respecto a las del acero A36. Sin embargo el compuesto no logra superar la elasticidad del acero, este dato se puede apreciar visualmente en las gráficas 18 – 20.



GRÁFICA 18 ESFUERZO /DEFORMACIÓN PROBETAS ABS+FC LAMINADO PARALELO.



GRÁFICA 19 ESFUERZO /DEFORMACIÓN PROBETAS ABS+FC CON TEJIDOS A 20°.



GRÁFICA 20 ESFUERZO /DEFORMACIÓN ACERO A36. Gráfico basado en datos de Gerdau Corsa [74]

En las gráficas 18 y 19 se observa el comportamiento plástico del compuesto en contraste con el comportamiento dúctil del acero. El compuesto sólo presenta una ductilidad relativa si se observan los valores del módulo de Poisson; es relativa por una breve influencia del plástico ABS durante la deformación. No obstante con sustento en las gráficas el compuesto no tiene punto de fluencia y en correspondencia con la capacidad de carga a tensión exhibe una capacidad de carga equiparable con la del acero hasta en un 1/4; por lo tanto se establece que el compuesto es 100% plástico si es sometido a fuerza de tensión, con una capacidad de carga de hasta 1,000 kg/cm².

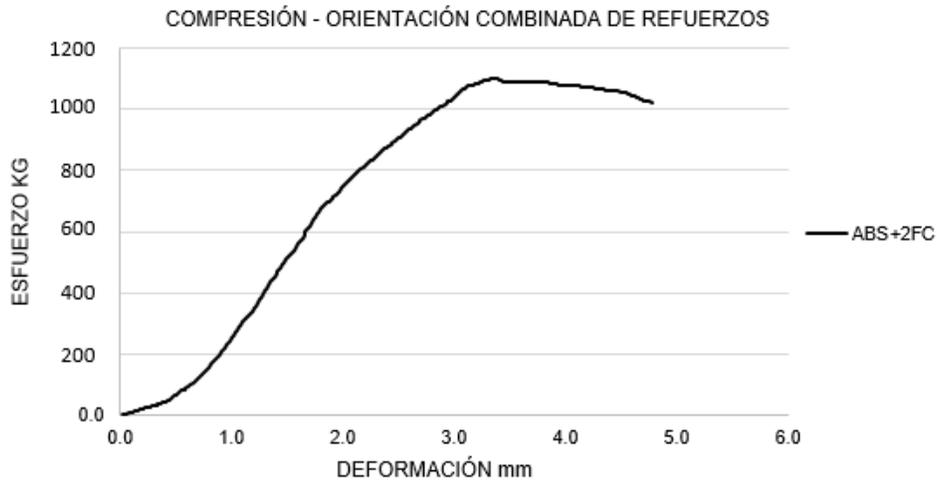
CONCRETO

Por otra parte, el contraste de propiedades del compuesto ABS+FC con las propiedades del concreto manifiesta resultados que superaron las expectativas de la hipótesis experimental, con la condición de establecer los umbrales de servicio de las diversas mezclas de concretos. En la tabla 34 se muestra la comparación de propiedades mecánicas de los materiales.

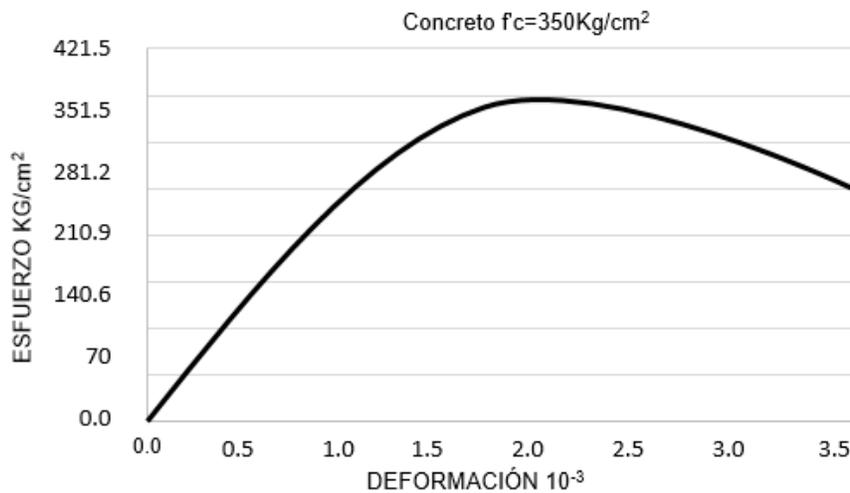
	ABS+FC	Concreto
Peso volumétrico kg/m ³	1,090	2,300
Densidad gr/cm ³	1.09	2.4
Módulo de Young kg/m ²	8,404.143	260-373
Esfuerzo unitario kg/m ²	360.5	100-700
Módulo de Poisson	0.4148	0.20

TABLA 34 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS: COMPUESTO ABS+FC – CONCRETO. Tabla realizada con datos y cálculos de la investigación, Callister y Fitzgerald.

En la tabla 34 se puede observar, al igual que en la tabla 33, que la densidad y el peso del compuesto son inferiores a los valores del concreto. Sin embargo otra característica importante es el contraste del módulo de elasticidad; en general el concreto se considera un material completamente plástico, no obstante las mezclas de concretos manifiestan una cierta elasticidad [6] pero los valores son despreciables debido a su baja magnitud. En la tabla 34 se constata una tendencia dúctil del compuesto que supera explícitamente al concreto y observa en las gráficas 21 y 22.



GRÁFICA 21 ESFUERZO /DEFORMACIÓN PROBETAS ABS+FC ORIENTACIÓN COMBINADA DEL REFUERZOS.



GRÁFICA 22 ESFUERZO /DEFORMACIÓN CONCRETO $F'C=350\text{KG/CM}^2$. Gráfico basado en datos de Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera [75]

En las gráficas 21 y 22, resalta el comportamiento de la curva esfuerzo/deformación del compuesto por la oposición a la carga aplicada respecto de la curva del concreto en la cual se observa la deformación uniforme hasta la falla. Con base en las gráficas y los resultados del esfuerzo unitario se establece que el compuesto es capaz de competir estructuralmente con mezclas de concreto hasta de 350kg/cm^2 ; y con los resultados del módulo de Poisson se comprueba la hipótesis del refuerzo de plástico a través de fibra de carbón y bajo el principio de acción combinada; a pesar de tener un módulo de

Poisson mayor que el del concreto, el compuesto es capaz de soportar cargas a compresión con deformaciones de tendencia dúctil. Por otra parte la exploración física manifiesta un comportamiento frágil (debido a la matriz epóxica) por lo que se establece que el material es al menos 80% frágil con una tendencia del 20% de ductilidad.

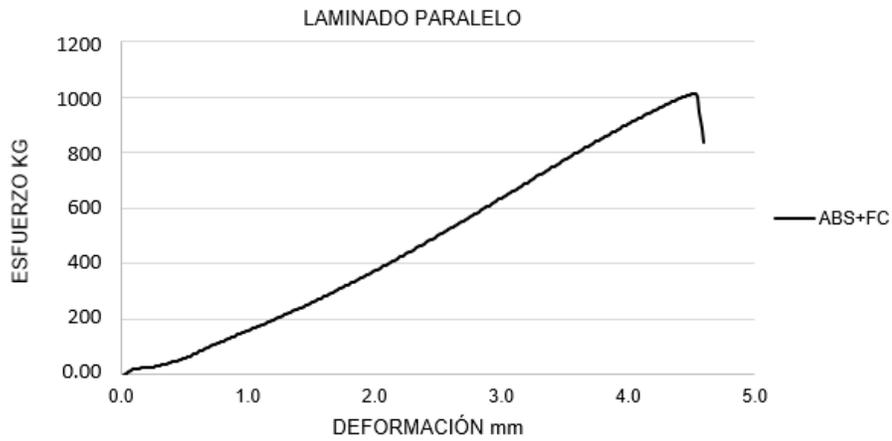
ALUMINIO

Desde que el aluminio logro conseguirse en estado metálico hacia el año 1888⁷⁶, ha formado parte esencial de la industria constructora. Principalmente por su baja densidad, resistencia a la corrosión, conductor del calor y la electricidad; es reflector de energía luminosa y radiante; es maleable y no es magnético [76]. En el sector constructor el aluminio se utiliza comúnmente para la realización de cancelerías, muros cortina y también para aplicaciones estructurales: aluminio estructural, aleación de magnesio-silicio o aleación 6061 [77]. La mención del aluminio en las conclusiones de esta investigación se realiza dado que el compuesto exhibe propiedades aproximadas a este metal, por lo que se establece que material investigado es capaz de competir directamente con aleaciones de aluminio estructural; por supuesto que al igual que con el acero y el concreto no se puede remplazar al aluminio por completo pero manifiesta un desafío prospectivo con mayores probabilidades de cumplir dicha meta: innovar en el campo de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados; se hace la comparación en la tabla 35 con aluminio estructural 6061 y en las gráficas 23-25 se comparan las curvas esfuerzo-deformación de los materiales.

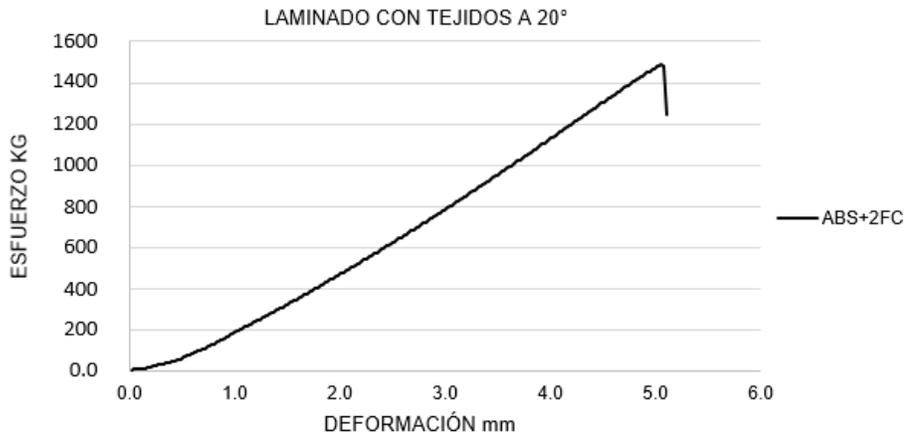
	ABS+FC	Aluminio 6061
Peso volumétrico kg/m ³	1,090	2,698
Densidad gr/cm ³	1.09	2.7
Módulo de Young kg/m ²	31,031	704,081
Esfuerzo unitario kg/m ²	1,089	2,816
Módulo de Poisson	0.4148	0.33

TABLA 35 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS: COMPUESTO ABS+FC – ALUMINIO 6061. Tabla realizada con datos y cálculos de la investigación, Callister y Fitzgerald.

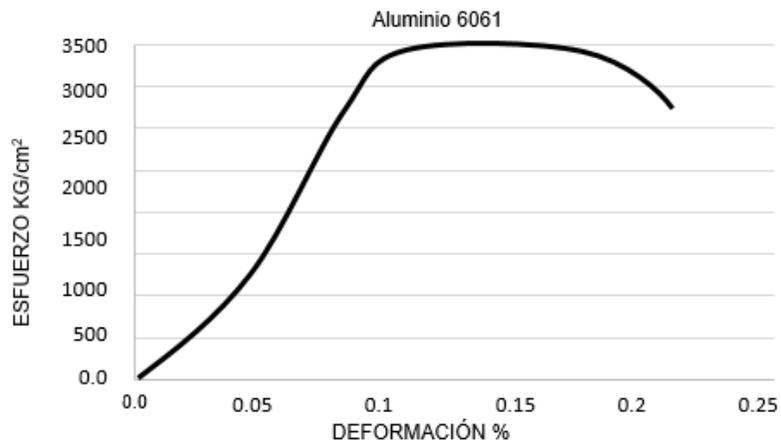
⁷⁶ Año en que el químico Karl Josef Bayer logro una patente para obtener aluminio en estado metálico mediante procedimientos electrolíticos. Revisar: "Analizando la construcción", Pons, Portales i Agustí. Pag. 83. Girona, Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.



GRÁFICA 23 ESFUERZO /DEFORMACIÓN PROBETAS ABS+FC LAMINADO PARALELO.



GRÁFICA 24 ESFUERZO /DEFORMACIÓN PROBETAS ABS+FC CON TEJIDOS A 20°.



GRÁFICA 25 ESFUERZO /DEFORMACIÓN ALUMINIO 6061. Gráfico basado en datos de C. Bohórquez A M. Sierra C., J. Lemus [78]

De forma similar a la comparación con la curva del acero A36, se observa en las gráficas del compuesto ABS+FC el comportamiento plástico respecto al comportamiento dúctil del aluminio 6061; pero en contraste con el acero, los valores de la carga resistida por las probetas pueden considerarse hasta 1/2 con respecto de las del aluminio.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas del compuesto se concluye que es un material frágil cuyo comportamiento es por completo plástico, esfuerzos de tensión, aunque su trabajo mecánico a compresión y flexión exhibe una ductilidad relativa influenciada por la geometría de las probetas.

8.3 ARQUITECTURA Y ESTRUCTURA

GEOMETRÍA TRANSVERSAL

Estas uniones son posibles gracias que las secciones son estandarizadas con geometrías, que dependiendo del esfuerzo, mantienen la estabilidad estructural, es decir; la forma estructural transversal está en relación directa con la función del elemento [79] y se le denomina como geometría transversal; cuya característica más importante es el área o superficie para determinar los momentos de 1° y 2° orden; en la Figura 165 se muestran las geometrías de secciones de acero más comunes en México de acuerdo al Manual de Construcción en Acero IMCA: ángulo, secciones OR circulares, cuadradas, rectangulares y perfiles IR; y en la tabla 36 se muestra el esquema de momentos que se pueden calcular a partir de la geometría.

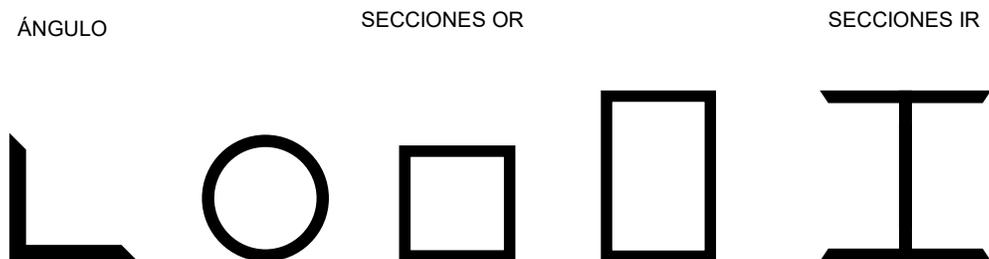


FIGURA 165 GEOMETRIAS TRANSVERSALES DE PERFILES DE ACERO. Basado en el Manual IMCA.

Momentos de primer orden	Momento estático	Baricentro
Momentos de segundo orden	Momento de inercia	Módulo resistente
		Radio de giro
	Momento centrífugo	Ejes conjugados de inercia
	Momento polar	

TABLA 36 MOMENTOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN, CARACTERÍSTICAS A PARTIR DE LA GEOMETRÍA TRANSVERSAL. Tabla elaborada con datos de Diez.

En correspondencia con el párrafo anterior y la tabla 36, para el cálculo de un elemento estructural es necesario definir la geometría del mismo. Al principio de la investigación se proponía una barra de material compuesto ABS+FC bajo el criterio de que las dimensiones transversales de las secciones que se utiliza para el diseño deben ser pequeñas en relación a su longitud para cumplir con el principio de Saint Venant⁷⁷, según el cual la carga que se aplica en un extremo de la barra tiene la misma magnitud en el extremo opuesto. Por otra parte las secciones rectas deben asegurar que las piezas tengan la suficiente rigidez estructural para permitir movimientos de muy poca magnitud [80]. En la figura 166 se ilustra un esquema del principio de Saint Venant en una barra deformada con una carga F .

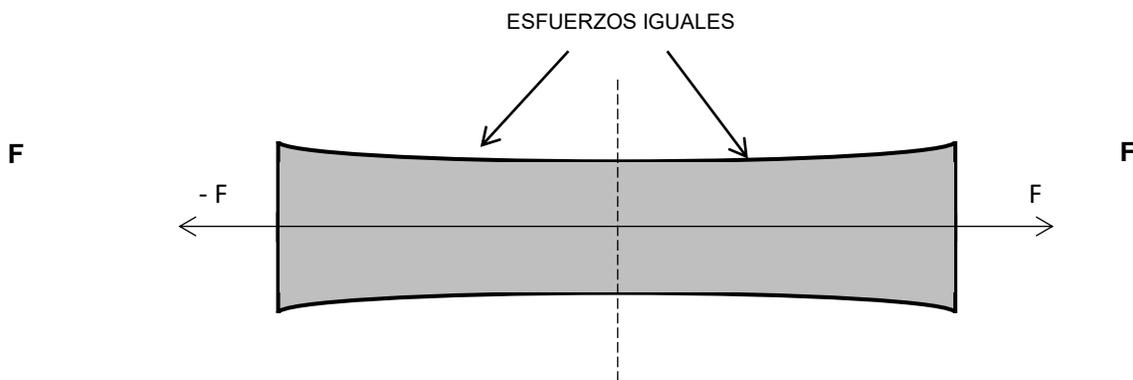


FIGURA 166 ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE SAINT VENANT. Figura basada en Hibbeler.

⁷⁷ Principio que establece: "...el esfuerzo y la deformación que se producen en los puntos de un cuerpo lo suficientemente alejados de la región de aplicación de la carga, serán iguales al esfuerzo y la deformación producidos por cualesquiera cargas aplicadas que tengan la misma resultante estáticamente equivalente y estén aplicadas al cuerpo dentro de la misma región...". Tomado de: Mecánica de Materiales, Hibbeler, pág. 121.

De modo prospectivo se plantea el uso homologado de una sección prismática cuadrada [73] de cuerpo sólido, Figura 167, que sea capaz de ser utilizada en esfuerzos de tensión y de compresión; en los cuales los resultados de las pruebas exhiben un rendimiento aceptable. Sin embargo, para la determinación de las dimensiones de dicha sección se consideran las especificaciones de las tablas del Manual de Construcción en Acero IMCA,

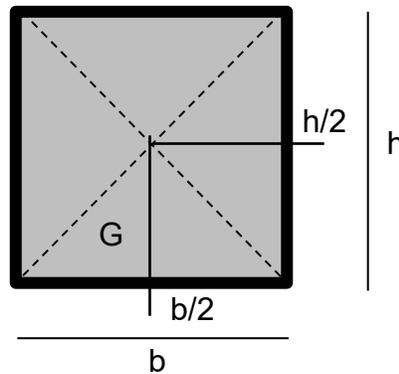


FIGURA 167 PROPUESTA SECCIÓN TRANSVERSAL PARA BARRA DE COMPUESTO ABS+FC.

Una de las aplicaciones prospectivas del compuesto es la realización de armaduras o sistemas de barras, ya que son sistemas mecánicos que se forman por la unión de secciones vinculadas mediante triangulación o vector activo [80]. Las barras lineales son elementos eficientes para la trasmisión de esfuerzos axiales de tensión y de compresión y la disposición triangular resulta la más óptima debido a la indeformabilidad del triángulo para recibir cargas que actúan en su plano y su conveniente forma para transmitir las a los apoyos [62].

En este tipo de sistemas estructurales los momentos flexionantes en cada sección se equilibran a través de los esfuerzos concentrados de tensión y compresión que se dan en las cuerdas superior e inferior y el cortante se equilibra por las fuerzas axiales en las barras verticales y diagonales [62] [63]. Los sistemas de barras realizados en acero se implementan a través del montaje de secciones que se unen mediante soldaduras, unión mecánica; y se ven obligados a incrementar el peralte de sus secciones cuando el claro a cubrir es considerablemente largo (naves industriales o patios de maniobras).

Con base en las propiedades mecánicas exhibidas por el compuesto, resistencia aceptable a tensión y compresión, y las características de los sistemas de barras se sustenta la aplicación prospectiva del compuesto para su aplicación en sistemas de armaduras o refuerzo de las mismas, añadiendo la capacidad de reducir el peralte de las secciones en grandes claros y reducir la cantidad de material empleado para su ejecución.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Este apartado se aleja un poco de los alcances de resistencia mecánica que comprobó esta investigación, sin embargo considerando las propiedades de conducción de la fibra de carbón en conjunto con las de aislamiento del ABS y la resina epóxica, se puede considerar como un elemento híbrido ente una estructura y una instalación eléctrica. En la tabla 37 se comparan los valores de resistividad eléctrica de los tres materiales.

	ABS+FC	Aluminio 6061	Acero A36
Resistividad electrica Ω - m	ABS: 3.3×10^{21} Fibra de carbón: 17×10^{-6}	2.9×10^{-8}	1.60×10^{-7}

TABLA 37 COMPARACIÓN RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMPUESTO ABS+FC/ALUMINIO/ACERO. Tabla realizada con datos de Callister y Fitzgerald.

En la tabla 37 se observa que la fibra de carbón, el aluminio y el acero tienen valores bajos (buenos conductores) y el núcleo de ABS un valor muy elevado (baja conductividad), considerando el aislamiento de los tejidos de FC por parte del núcleo y de la matriz epóxica se puede plantear al compuesto como subestructura para instalaciones eléctricas con la posibilidad del ahorro de cableados; o la iluminación de las estructuras a través de las mismas, sin tener que hacer alguna intervención posterior. La ventaja esencial del compuesto ante los otros metales es que el tejido se encuentra aislado por la matriz epóxica y el núcleo de ABS evitando el riesgo de descarga eléctrica por contacto de un usuario o trabajador en caso de instalarse en una zona de tráfico pesado.

8.4 TECNOLOGÍA DE MATERIALES

En la actualidad no es posible diseñar sin considerar la relación intrínseca entre el diseño y los sistemas estructurales desde el comienzo de un proyecto. El desarrollo de nuevos materiales brinda a los diseñadores la posibilidad de realizar proyectos complejos capaces de resistir condiciones de trabajo crítico a modo de aumentar la seguridad de los usuarios, procurando estructuras que perduren al paso del tiempo y/o ante eventos imprevisibles como los sismos y los huracanes. La investigación permanente para la creación de nuevos materiales busca revolucionar la forma en la que se diseña, no obstante esta investigación se realizó para destacar la importancia de los sistemas estructurales y como a través de la implementación de componentes avanzados en ellos es posible innovar en los procesos constructivos.

Eventualmente cualquier sistema estructural cumplirá su ciclo de vida útil, ya sea por la acción de fenómenos naturales, uso y/o envejecimiento; y según sea el caso los especialistas determinaran el destino del proyecto. Sin embargo cada investigación aporta una nueva variable o contribuye con una propuesta que logra mejorar o generar un producto que a su vez extiende dicho ciclo de vida: es necesario mantener el interés en el desarrollo progresivo de tecnologías de construcción.

Este documento presenta al lector una línea de investigación cuyo interés por parte del sector constructor de México aún es limitado; no obstante aún manifiesta abundantes variables por resolver y deja pendientes minuciosos estudios de caracterización a nivel microscópico, mediciones de calor, aislamiento térmico, aislamiento acústico, determinación del coeficiente de dilatación térmica, módulo de fluencia, tipos de unión; realización de una sección 1:1, diseño y propuesta de sistema estructural...etc. Por lo anterior se invita al lector a participar en la investigación y desarrollo de las variables pendientes o a utilizar este documento como base para una nueva propuesta de materiales compuestos con el objetivo de aproximar los componentes ligeros estructurales al sector constructor.

REFERENCIAS

- [1] C. S. Escobar, *Materiales de construcción para edificación y obra civil*, Cottolengo, España: Editorial Club Universitario, 2010.
- [2] P. Ábrego, *Rocas y minerales industriales de Iberoamérica*, Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España, 2000.
- [3] INEGI, «Resultados de la encuesta nacional de ocupación y empleo. Cifras durante el cuarto trimestre 2015,» INEGI, México, 2016.
- [4] MOP, Minvu, Minenergía y MMA, «Estrategia nacional de construcción sustentable 2013-2020,» Chile, 2013.
- [5] L. Addleson, *Materiales para la construcción, Volumen 1*, Barcelona, España: Reverté S.A., 2001.
- [6] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales*, México: Limusa / Wiley, 2009.
- [7] CEMEX, *Manual del constructor*, México: CEMEX concretos, 2015.
- [8] B. T. Åström, *Manufacturing of Polymer Composites*, United Kingdom: Nelson Thornes Ltd, 2002.
- [9] T.-W. Chou, *Microstructural Design of Fiber Composites*, New York, USA: Cambridge University Press, 1992.
- [10] Eric Greene Associates, *Marine composites*, Maryland, USA: Eric Greene Associates, 1999.
- [11] SENER Aeroespacial, «www.sener-aerospace.com,» [En línea]. Available: <http://www.ingenieria-y-construccion.sener/notas-prensa/sener-ofrece-ingenieria-de-materiales-compuestos-jec-composites>. [Último acceso: 10 Mayo 2017].
- [12] R. E. Ardanaz, «Desarrollo sostenible y globalización. Cuando el futuro influye sobre el presente.,» *Lan Harremanak /12*, pp. 185-214, 2005.
- [13] PROFEPA, «www.profepa.gob.mx,» 2016. [En línea]. Available: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/766/1/mx/glosario.html?num_letra=3&num_letra_siguiente=4.
- [14] M. G. Barrera, H. J. B. Zaragoza, L. T. Lara y M. C. Campos, *Materiales sustentables y reciclados en la construcción*, México: Omnia Science (Omnia Publisher SL), 2015.
- [15] CMIC, *Plan nacional de manejo de residuos de la construcción y la demolición.*, Distrito Federal: CMIC, 2013.
- [16] SEDEMA, «NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-007-RNAT-2013,» SEDEMA, México, 2015.
- [17] SEMARNAT, *Manual para la supervisión y control de rellenos sanitarios.*, México: SEMARNAT, 2006.
- [18] ALDF, «www.aldf.gob.mx,» 02 02 2012. [En línea]. Available: <http://www.aldf.gob.mx/comsoc-urgente-autorizacion-nuevos-tiraderos--9998.html>.
- [19] CMIC, «Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición.,» CMIC, México, 2014.

- [20] K. P. M. A. C. D. I. y. G. O. Nicolae Taranu, «Essential characteristics and applications of polymer composites in civil engineering,» *Intersections/Intersecții*, pp. 3-15, 2004.
- [21] X. R. Ramon, *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- [22] S. M. Halliwell, «Polymer composites in construction,» de *Polymer composites in construction*, Londres, Reino Unido, BR 405, 2000, pp. 1-7.
- [23] A. M. Sosa, «Los plásticos: materiales a la medida,» *¿Cómo ves?*, pp. 22-25, 2006.
- [24] American Chemistry Council Plastic division, *Plastics and Polymer Composites Technology Roadmap for Automotive Markets*, Washington, USA: American Chemistry Council, 2014.
- [25] A. y. L. J. Zhou, «virginiadot.org,» 2006. [En línea]. Available: <http://virginiadot.org/business/resources/bridge-10StateoftheArtFRPDecks.pdf>.
- [26] Creative Pultrusions, «www.creativepultrusions.com,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.creativepultrusions.com/products-solutions/flooring-products/superdeck/>.
- [27] S. M. L. y. G. d. Á. A. Paradelo, «El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio,» *MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Vol. 42, n.º 226*, pp. 65-71, 1992.
- [28] Tecnyconta, «www.tecnyconta.es,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.tecnyconta.es/index.php?sec=4&zona=795&idioma=>.
- [29] DuratiNet, «TR6.2 FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS USED IN CIVIL ENGINEERING,» DuratiNet, 2008.
- [30] Composite Solutions Int'l, «www.compositeworldwide.com,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.compositeworldwide.com/CSS.html>.
- [31] Altusprecast, «altusprecast.com,» 2013. [En línea]. Available: <http://altusprecast.com/products/>.
- [32] DuPont, «Marca Kevlar,» DuPont, México, 2016.
- [33] Sireg, «www.sireggeotech.it,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.sireggeotech.it/es/barras-y-laminas-en-fibra-de-carbonio-y-fibra-de-aramida>.
- [34] BASF, «MasterBrace®4500,» BASF, 2013.
- [35] M. A. Borque, *Materiales de última generación y materiales eficientes: Hormigón reforzado con fibras de aramida*, Madrid, España: Escuela de Arquitectura de la Ciudad de Alcalá, 2007.
- [36] S. K. Mazumdar, «Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering,» Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2002.
- [37] W. F. Smith y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V., 2006.
- [38] R. D. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales.*, México: International Tompson Editores, 2004.
- [39] C. R. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, México: Pearson Educación, 2011.
- [40] R. Mott, *Resistencia de materiales*, México: Pearson Educación, 2009.
- [41] UPV, «www.upv.es,» 2013. [En línea]. Available: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_3.html.

- [42] M. P. M. P. Virgil, Los plásticos como materiales de construcción, Madrid, España: Uiversidad Nacional de Educación a Distancia, 2002.
- [43] J. Morton, Procesamiento de Plásticos, Inyección, Moldeo, Hule, PVC, Ciudad de México: Limusa, 2014.
- [44] D. A. Besednjak, Materiales compuestos, procesos de fabricación y embarcaciones., Barcelona, España: Edicions UPC, 2005.
- [45] F. Stupenengo, Materiales y materias primas, materiales compuestos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina: Ministerio de educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica., 2011.
- [46] H. V. Águila, «Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010.
- [47] T. Wallenberger, C. Watson y H. Li, «Glass fibers,» ASM International, 2011.
- [48] M. Zoghi, «The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering,» Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2014.
- [49] P. Morgan, Carbon fibers and their composites, Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group, 2005.
- [50] D. Hull, Materiales compuestos, España: Editorial Reverté, 2010.
- [51] S. M. S. y. F. J. Mota, Mechanics of composite materials and structures, Lisboa, Portugal: Springer-Science+Business Media B.V., 1999.
- [52] T. B. E. y. L. A. Thomsen, Sandwich structures 7: advancing with sandwich structures and materials, Dordrecht, Nederland: Springer, 2005.
- [53] A. y. K. A. Carlsson, Structural and failature mechanics of sandwich composites., Springer, 2011.
- [54] American Chemistry Counsil, «Plastic and polimer composites in light Vehicles,» Economics & Statistics Department, American Chemistry Counsil, 2015.
- [55] D. B. R. C. W. E. y. D. S. M. E. Adams, Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymers, Rapra Technology LTD, 1993.
- [56] G. Wypych, Handbook of Polymers, Ontario, Canadá: ChemTec publishing, 2011.
- [57] P. A. Schweitzer, Corrosion of Polymers and Elastomers, Boca Raton, USA.: Taylor & Francis Group, 2007.
- [58] C. B. Lawrence, Composites for construction. Estructural design with FRP materials, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc, 2006.
- [59] Fiberline Composites A/S, Fiberline Design Manual, Kolding, Dinamarca: Fiberline Composites A/S, 2002.
- [60] Eurograte, «Perfiles y estructuras en PRFV,» Tcomm & Promaco, Italia, 2016.
- [61] Fibergrate, «Perfiles estructurales Dynaform,» 2013.
- [62] G. Diez, Diseño estructural en Arquitectura: Introducción, Buenos Aires, Argentina: Nobuko, 2005.

- [63] BASF, «Terluran® HI-10 BK10009,» Styrolution USA LLC, Florham Park, NJ 07932, Estados Unidos, 2016.
- [64] Quintum, «Fibra de Carbono,» Quintum, México, 2015.
- [65] W. R. Fitzgerald, *Meánica de Materiales*, Ciudad de México: Alfaomega, 2015.
- [66] B. E. Mode, *Elementos de probabilidad y estadística*, España: Editorial Reverté S. A., 2005.
- [67] ASTM, *Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position.*, ASTM, 2014.
- [68] ASTM, «Determining Strenght of Adhesively Bonded Rigid Plastics Lap-Shear Joints in Shear By Tension Loading.,» ASTM, 2004.
- [69] astroradio, «astroradio.com,» 2017. [En línea]. Available: <http://meteo.ea3kz.com/history.html>.
- [70] R. J. Bernal, *Hormigón armado: Vigas*, Buenos Aires, Argentina: Nobuko, 2005.
- [71] Gerdau Corsa, «El Acero hoy: Elección del tipo de acero para estructuras,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.gerdau.com/gerdaucorsa/es/productsservices/products/Document%20Gallery/eleccion-tipo-de-acero.pdf>.
- [72] I. R. E. G. CABRERA, «CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE VIGAS PRETENSADAS SIMPLEMENTE APOYADAS, CON UNA LUZ DE 6.15 METROS,» MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS., Guatemala, Junio 2011.
- [73] P. i. A. Pons, *Analizando la construcción*, Girona, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [74] R. A. Martínez, *Criterios fundamentales para resolver problemas de resistencia de materiales. Volumen II*, Venezuela: Equinoccio, 2004.
- [75] C. B. A, M. S. C y J. Lemus, «NFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ALUMINIOS 6061 T6 Y 6063 T5,» IBEROMET XII, X CONAMET//, Chile, 2010.
- [76] G. Diez, *Nociones practicas de diseño estructural*, Argentina: Nobuko, 2008.
- [77] R. M. y. B. D. E. Cervera, *Mecánica de estructuras. Libro 1. Resistencia de materiales.*, Barcelona, España.: Ediciones UPC, 2001.
- [78] P. R. Meli, *Diseño Estructural*, México: Limusa, 2008.
- [79] IMCA, *Manual de construcción en acero*, México: Limusa, 2014.
- [80] R. J. Bernal, *Hormigon armado: Estructuras: Introducción*, Buenos Aires, Argentina: Nobuko, 2005.
- [81] Sika, «SikaWrap®-530 C,» Sika Mexicana, México, 2015.
- [82] Sika, «Sikadur 330 US,» Sika México, México, 2010.
- [83] RCDF, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México: Trillas, 2007.
- [84] AHMSA, «Manual de Diseño para la Construcción con Acero,» AHMSA, México, 2013.
- [85] P. J. Arroyo, *Guía de diseño del sistema de refuerzo estructural con fibra de carbono Replark*, Drizoro, 2003.

- [86] C. Ocáriz, «Momentos estáticos,» UNAM, FI, México, 2014.
- [87] C. M. L. y. M. G. Croxton, Resistencia de materiales. Curso programado, México: Pax México, 2007.
- [88] D. Fliess, Estabilidad. Primer curso., Argentina: Kapelusz, 1970.
- [89] LABI, «www.alumlabi.es,» 2016. [En línea]. Available:
<http://www.alumlabi.es/cubrimientos/panel-sandwich-no-autoportante-agropur.html>.
- [90] ASTM, «Standard Classification System for Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) Plastics and Alloys Molding and Extrusion Materials,» ASTM.
- [91] ASTM, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,» ASTM.
- [92] ASTM, «Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics,» ASTM.
- [93] N. J. Salkind, Métodos de investigación, México: Prentice Hall, 1999.
- [94] V. J. A. Barrientos, La Administración y planificación como procesos, San José, Costa Rica.: EUNED, 2006.
- [95] C. J. McCormac, Análisis de estructuras - métodos clásico y matricial, Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 2010.
- [96] J. C. Carbonell, Pinturas y recubrimientos.: Introduccion a su tecnología, Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A., 2009, pp. 70-72.

GLOSARIO

Aducto: unión directa de dos moléculas sin que se modifiquen la estructura en sus tipologías.

Carbonización: proceso para la obtención de residuos carbonosos mediante **pirólisis** o la aplicación de un agente corrosivo.

Constricción: acción de constreñir; apretar u oprimir algo; aplicación de fuerza hasta causar una fractura.

Delaminación: falla por adherencia; deslizamiento o desprendimiento de capas en un compuesto laminado.

Elasticidad: Propiedad mecánica que presenta un material para deformarse y posteriormente recuperar su forma original.

Elongación: alargamiento de un material que es estirado de forma constante.

Fluencia: cedencia; deformación irreversible.

Fotodegradación: descomposición o rotura de la estructura molecular de un material por efecto de la luz (espectro electromagnético), condicionado por la intensidad de la radiación UV, época del año, latitud, etc.

Pirólisis: descomposición química de materiales a por calentamiento a altas temperaturas sin la presencia de oxígeno.

Plasticidad: Propiedad mecánica que presenta un material para deformarse, de manera irreversible, hasta alcanzar la rotura.

UNIDADES DE MEDIDA

Para esta investigación se utilizó el Sistema Internacional (SI) o sistema métrico, a continuación se muestran las unidades del SI que se utilizaran:

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO
MASA	GRAMO	gr
	KILOGRAMO	kg
VOLUMEN	CENTÍMETRO CUBICO	cm ³
	METRO CUBICO	m ³
	LITRO	L
ÁREA	MILÍMETRO CUADRADO	mm ²
	CENTÍMETRO CUADRADO	cm ²
	METRO CUADRADO	m ²
FUERZA	NEWTON	N
	KILONEWTON	KN
PRESIÓN	PASCAL	Pa
	MEGAPASCAL	MPa
	GIGAPASCAL	GPa
LONGITUD	MILÍMETRO	mm
	CENTÍMETRO	cm
	METRO	m
TIEMPO	SEGUNDO	s
	MINUTO	min
	HORA	hrs
TEMPERATURA	GRADOS CELSIUS	°C

Todas las gráficas, tablas e imágenes fueron realizadas y/o tomadas por el autor; los casos que se basan en referencias bibliográficas se mencionan la fuente en el pie de foto. Debido al tamaño de algunas tablas, no fue posible importarlas desde su formato original en .x/sx, por lo que se convirtieron en imágenes en formato *png* o *jpg* para insertarse al texto.

Apéndice A

TENSIÓN ABS

De forma comparativa se optó por ensayar dos piezas de plástico ABS sin ningún tipo de refuerzo. Con este parámetro se pudo evaluar el aporte del refuerzo en sus dos etapas a las propiedades del plástico así como evaluar el comportamiento mecánico de las probetas, en la figura 168 se muestra el montaje de esta probeta y en la figura 169 se muestra la probeta después del ensayo.



FIGURA 168 PROBETA D638 SIN REFUERZO. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

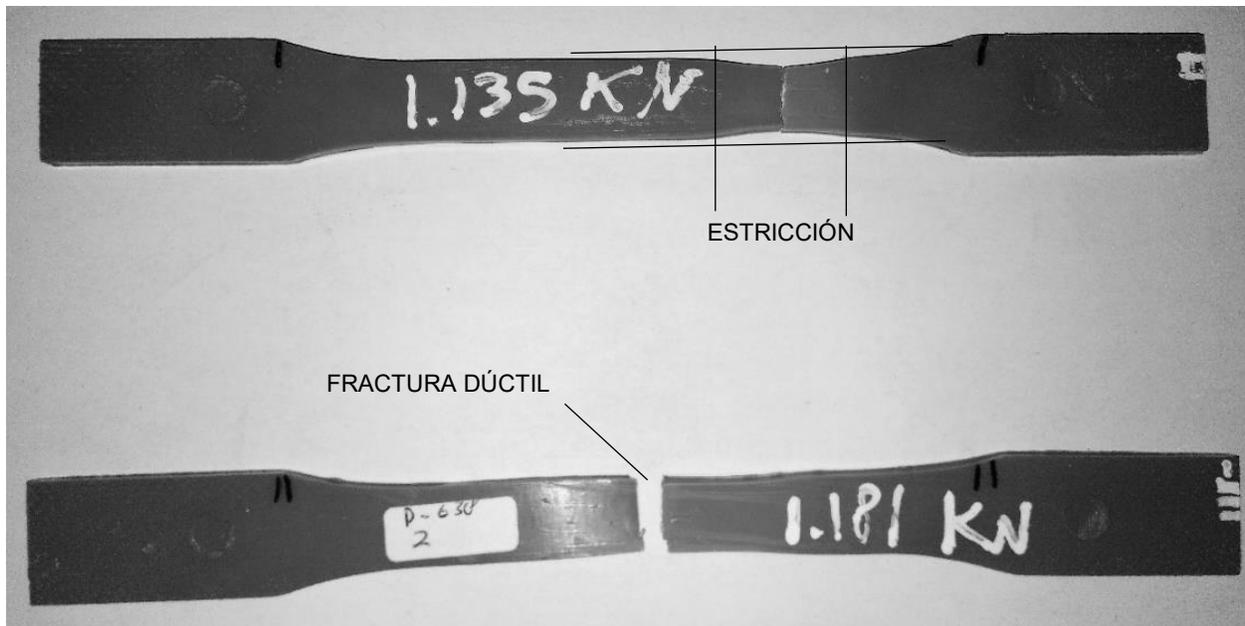
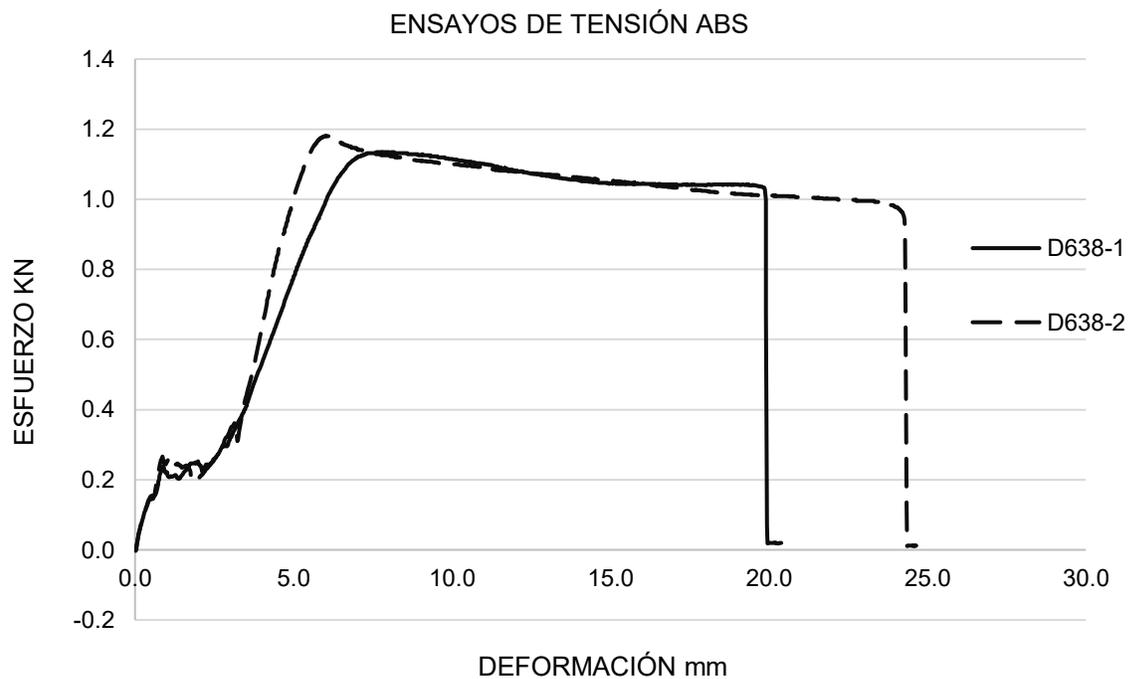


FIGURA 169 FRACTURA DÚCTIL, PROBETAS ABS SIN REFUERZO.

En la figura 169 se puede constatar que las fracturas de las probetas no pueden catalogarse como dúctiles por completo, en cualquier caso se denominarían de ductilidad relativa. Otro aspecto a resaltar es su resistencia a tensión la cual se encontró entre los 1.18Kn y los 1.35KN, que es inferior en contraste de los dos tipos de probetas ensayadas antes.

Físicamente se han realizado el análisis de las condiciones de servicio a través de la exploración visual de las probetas, a continuación se presentan los datos obtenidos mediante el software de la máquina universal de ensayos para poder observar el comportamiento gráfico de las probetas. En la gráfica en la gráfica 26 se muestra el comportamiento de las probetas sin refuerzo (comportamiento dúctil); y en la tabla 38 se muestran los valores obtenidos.



GRÁFICA 26 COMPORTAMIENTO DÚCTIL, ESFUERZO/DEFORMACIÓN DE PROBETAS D638 SIN REFUERZO (ABS).

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D638-1	1.135	115.74	7.820	93.8
D638-2	1.181	120.43	6.040	72.4
D638-01	11.922	1,215.69	5.230	62.6

TABLA 38 VALORES DE LAS PROBETAS D638.

Apéndice B

COMPRESIÓN ABS

Al igual que en los ensayos de las probetas D638, se ensayaron tres piezas cortas del núcleo de ABS con la finalidad de comparar el trabajo mecánico de una pieza reforzada y una que no lo está. Pero, para este caso estos resultados complementan el estudio de la matriz reforzada sin núcleo en la determinación del impacto del núcleo en la constitución del material. Los parámetros de calibración del equipo y del montaje fueron los mismos de las piezas anteriores, en la figura 170 se muestra el espécimen montado.



FIGURA 170 MONTAJE NÚCLEO DE ABS PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC).

Durante las pruebas se observó que las probetas tendían a fallar por pandeo local y para el caso de la probeta D695-202 se observó una torsión cuya causa probable es un giro perpendicular a su eje durante la aplicación de la carga causado por una superficie de contacto irregular, en la figura 103 se muestra a la probeta descrita durante el ensayo.

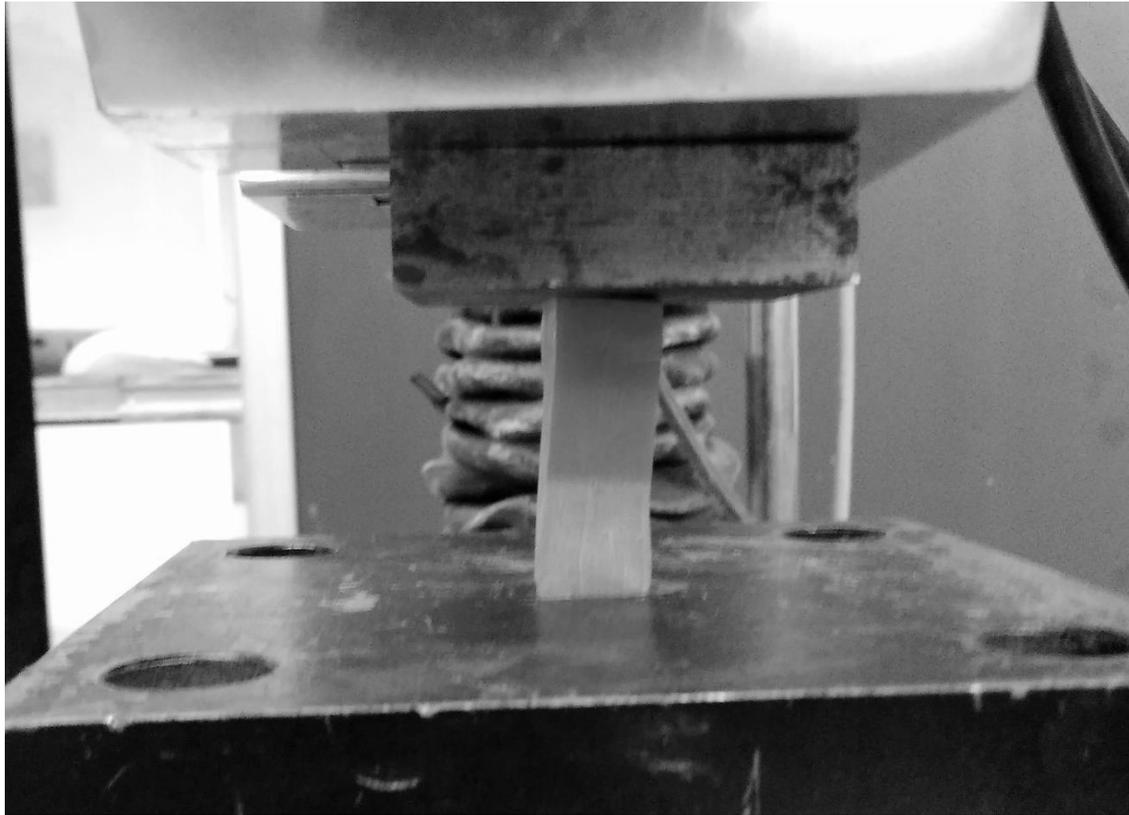


FIGURA 171 PROBETA D695-202 PANDEO Y TORSIÓN DURANTE ENSAYO DE COMPRESIÓN. Ídem.

Durante los ensayos la magnitud de carga aplicada alcanzó valores en los cuales transcurrido el tiempo de ensayo no mostraron ningún cambio; cada pieza sufrió una deformación irreversible (deformación plástica) la cual, debido a las propiedades moleculares de los polímeros, pudo prolongarse por largos periodos de tiempo hasta obtener el límite plástico de cada una: en el ensayo de compresión las moléculas se apilan de forma que al ser comprimidas rellenan los huecos existentes en su microestructura, lo que significa que la pieza debe ser comprimida hasta que las moléculas no tengan espacio para ordenarse y comiencen a generar abultamientos (deformación) en los cuales la tensión en la cumbre del bulto fracturaría al espécimen.

Sin embargo, debido al riesgo de que la pieza se proyectara si se continuaba con la aplicación de fuerza se tomó la decisión de suspender los ensayos una vez que las lecturas de datos de cada espécimen fueran constantes. Las magnitudes obtenidas fueron de 4 – 5.7KN. En la figura 173 se muestran las probetas ensayadas y en la figura 174 el detalle de las deformaciones de la probeta D695-201.

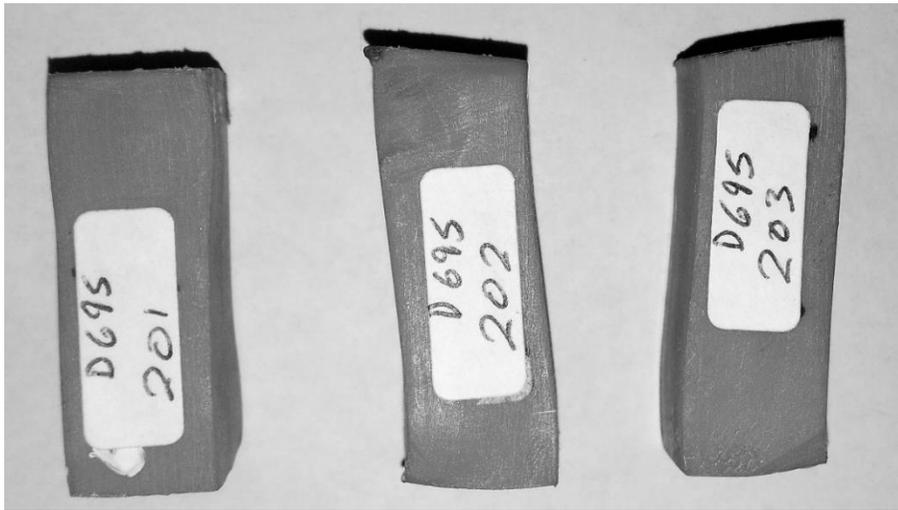


FIGURA 172 PROBETAS D695 DE ABS CORTAS ENSAYADAS.

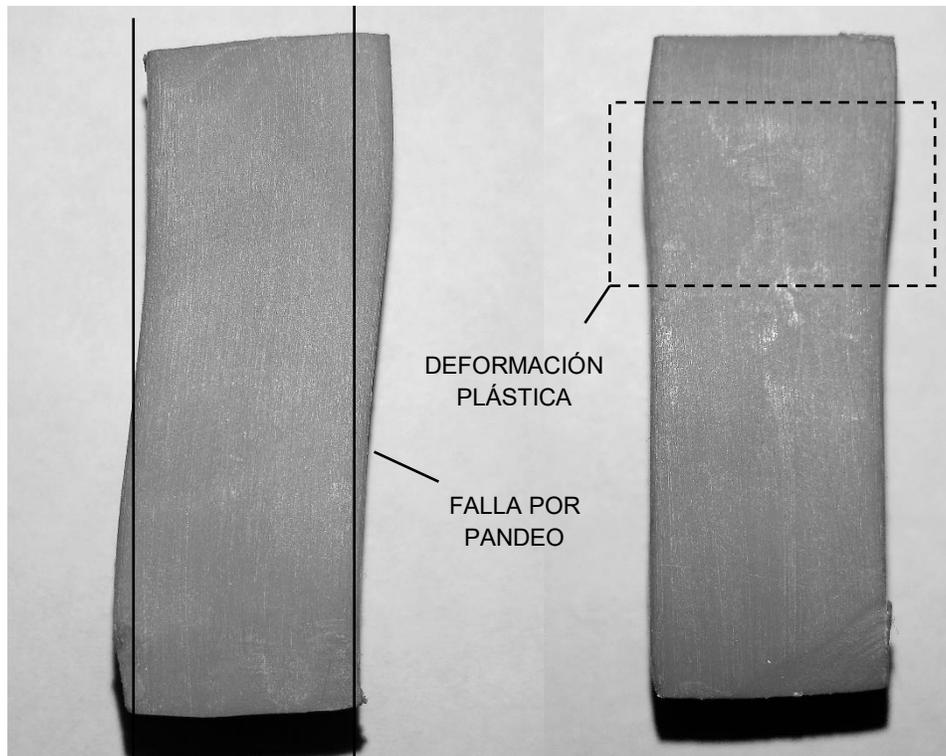
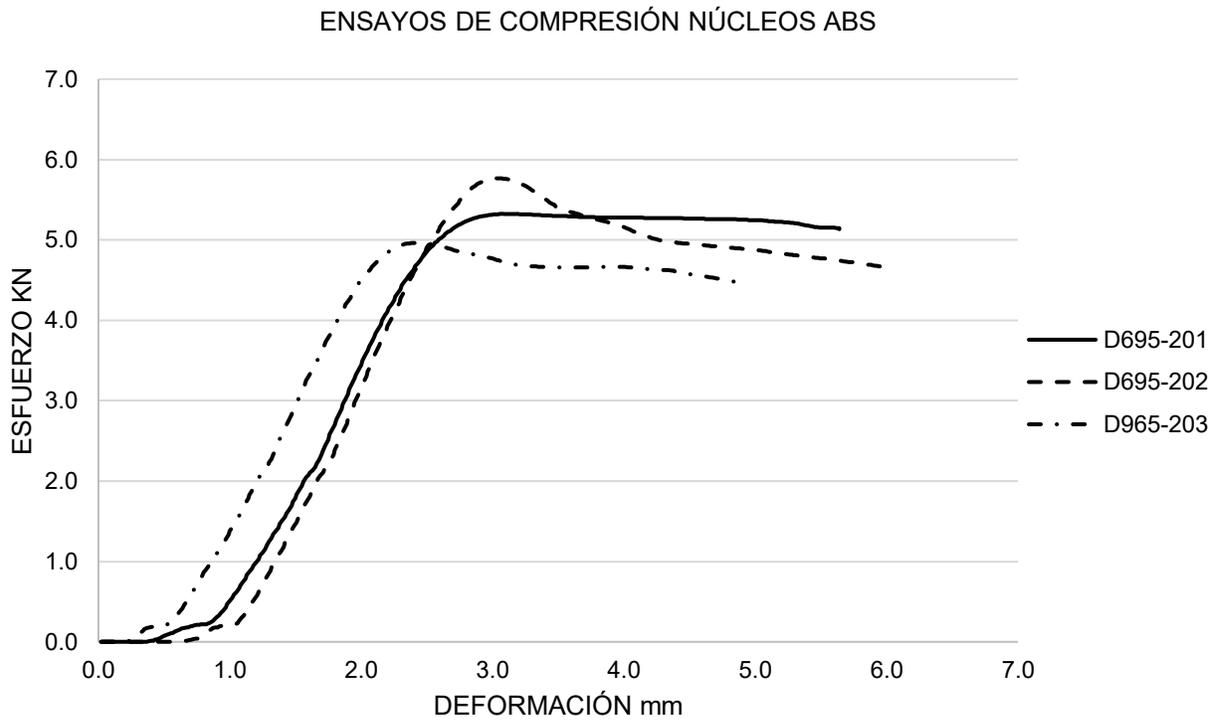


FIGURA 173 DETALLE PROBETA D695-201.

En la gráfica 27 se presenta el comportamiento mecánico de los tres núcleos cortos de ABS y en la tabla 39 se muestran los valores máximos obtenidos mediante la máquina de pruebas universales.



GRÁFICA 27 COMPORTAMIENTO DÚCTIL, RELACIÓN ESFUERZO/DEFORMACIÓN PROBETAS NÚCLEOS DE ABS.

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D695-201	5.322	532.2	5.64	67.80
D695-202	5.766	576.6	5.98	71.60
D695-203	4.962	496.2	4.85	58.20

TABLA 39 CARGA MÁXIMA REGISTRADA POR LAS PROBETAS D695.

Apéndice C

COMPRESIÓN FC SIN NÚCLEO

Se realizó un muestreo de probetas de fibra de carbón sin núcleo de ABS con el objetivo de comparar la magnitud en la que el núcleo influye el desempeño de los especímenes que si tienen el relleno de plástico. El procedimiento de calibración del equipo para los ensayos de las probetas sin núcleo es el mismo que se utilizó para las mediciones de las piezas largas y cortas con núcleo. Sin embargo se retiró la mordaza inferior de la máquina de pruebas universales a modo de colocar una base con mayor estabilidad, esta base fue un cubo de granito de 20 x 20cm. En lo que respecta a la mordaza que aplica la carga se utilizó una pequeña placa de acero de 13mm de grosor. En la figura 174 se muestra el montaje de una probeta sin núcleo y en la figura 175 las piezas después de los ensayos, cuyos valores de carga son de 4 – 8.5KN.



FIGURA 174 MONTAJE PROBETA SIN NÚCLEO DE ABS. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).



FIGURA 175 PROBETAS D695 SIN NÚCLEO DESPUÉS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN.

La causa de falla de estas probetas apunta a una fractura perpendicular al eje que se dio durante el pandeo de las piezas debido a la transmisión irregular de la carga en las paredes de la sección, las cuales presentan huecos que evitan la distribución homogénea de fuerzas y producen excentricidades que se transforman en fuerzas cortantes durante el pandeo.

En la fractura no se observa delaminación entre refuerzo y matriz, la fractura fue frágil y provocó el deslizamiento de las paredes opuesta y a los costados de la falla. Las delaminaciones entre refuerzo y matriz sólo se observan en los extremos de las probetas, causadas por la compresión, y se puede identificar tejidos secos; otra causa de la falla es la existencia fibras de refuerzo que no se encuentran unidas de forma homogénea con la matriz.

En la figura 176 se muestra la probeta D695-1002 con detalle de las fracturas y en la figura 177 se muestra la probeta D695-1005 con el detalle de matrices delaminadas.

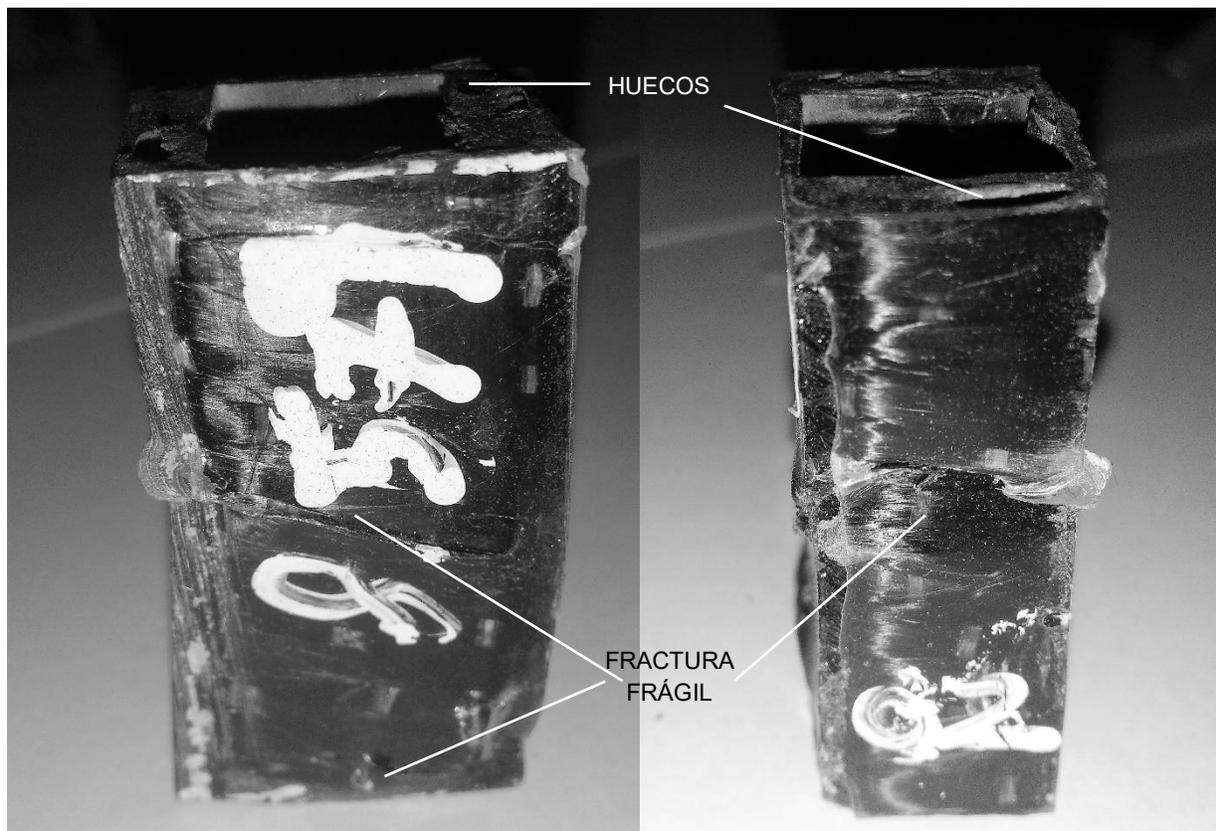


FIGURA 176 PROBETA D695-1002 FRACTURA FRÁGIL POR PANDEO.

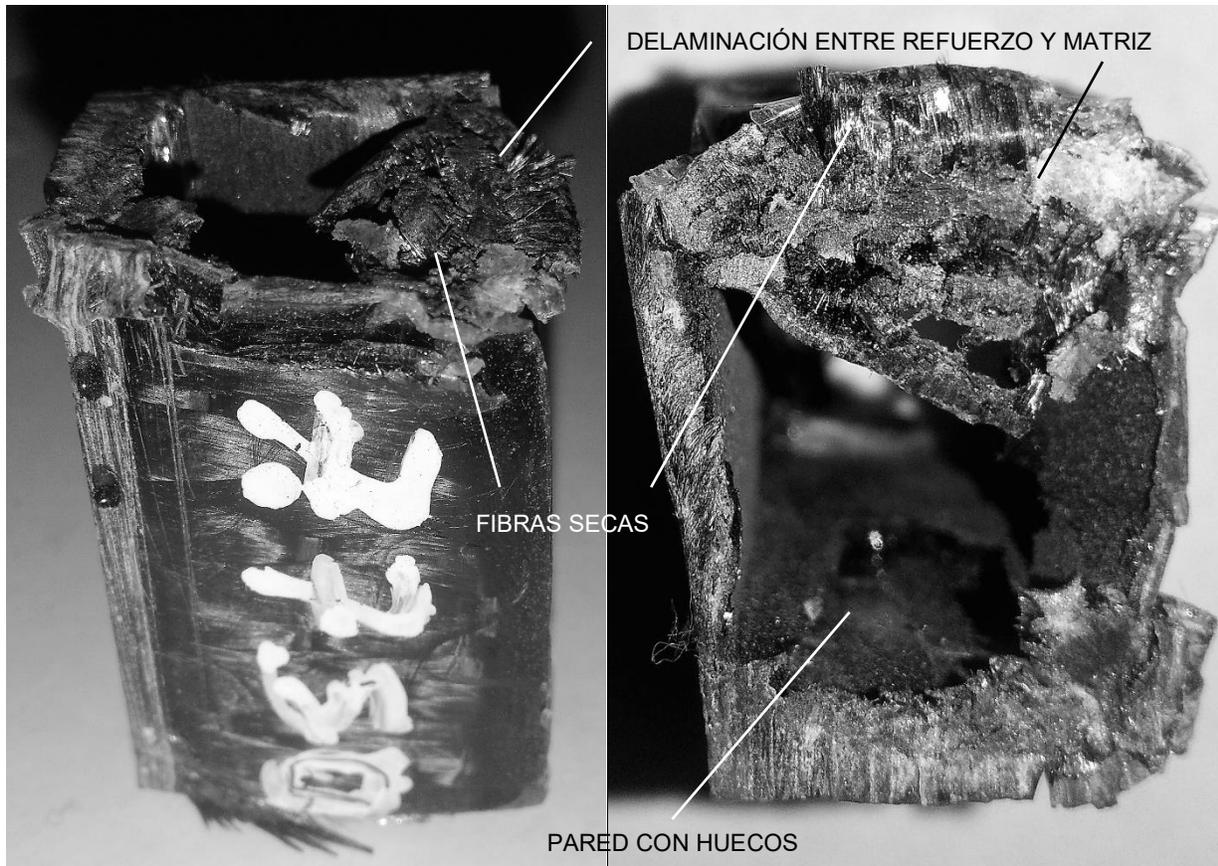
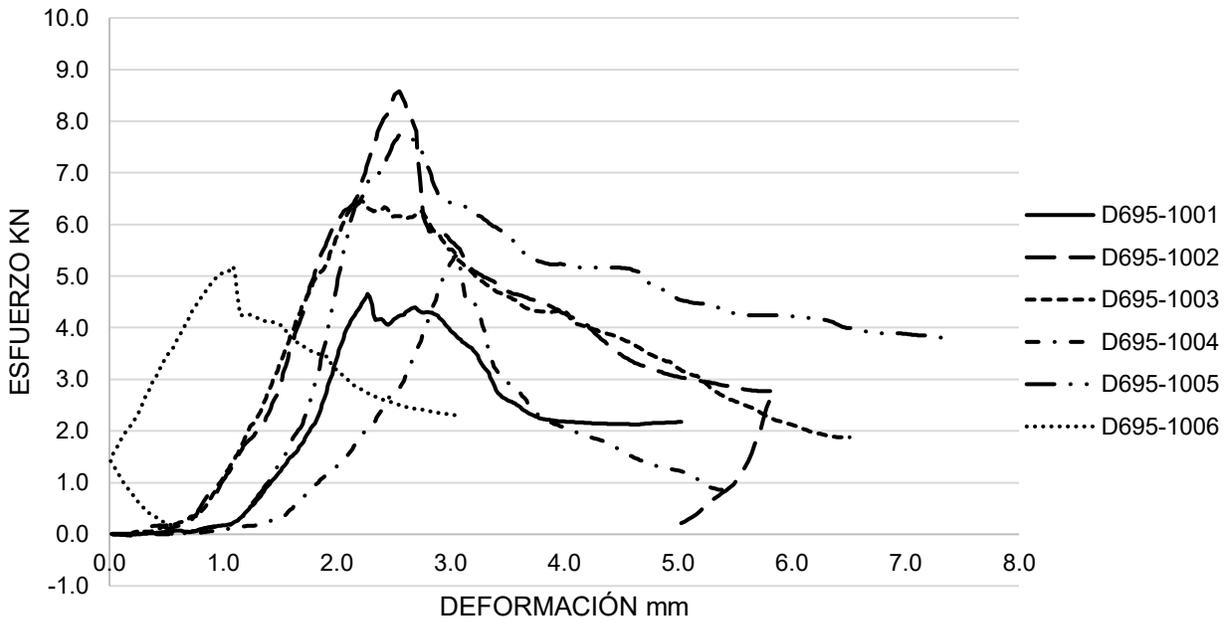


FIGURA 177 PROBETA D695-1005 DESLIZAMIENTO DE REFUERZOS Y MATRICES.

Aquí concluye el análisis mediante la observación de las probetas y a continuación se presentan los resultados obtenidos a través de la base de datos de la máquina de pruebas universales, en los cuales se puede constatar el comportamiento gráfico de cada grupo de prueba descrito en el apartado de compresión. En la gráfica 28 se presentan los resultados de las seis probetas cortas sin núcleo y en la tabla 40 se muestran los valores máximos obtenidos.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN PROBETAS CORTAS SIN NÚCLEO



GRÁFICA 28 COMPORTAMIENTO DÚCTIL, RELACIÓN ESFUERZO/DEFORMACIÓN PROBETAS CORTAS SIN NÚCLEO.

Probeta	Carga máxima KN	Carga máxima Kg	Recorrido mm	Tiempo seg
D695-1001	4.656	465.6	5.03	60.20
D695-1002	8.579	857.9	5.85	107.80
D695-1003	6.464	646.4	6.51	78.00
D695-1004	5.405	540.5	5.39	64.60
D695-1005	7.750	775.0	7.42	89.20
D695-1006	5.191	519.1	3.05	54.40

Tabla 40 CARGA MÁXIMA REGISTRADA POR LAS PROBETAS D695.

Anexo 1

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTICIA REFORZADOS CON FIBRA DE BASALTO

REPORTE: ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN SEPTIEMBRE – DICIEMBRE 2016

Arq. García Garduño Juan Manuel

Tutor: Dr. Christian Escrig

PRIMERA PARTE

1.0 PROYECTO	1
1.1 MARCO TEÓRICO	1

SEGUNDA PARTE

2.0 PROBETAS	4
2.1 MANUFACTURA – PRETENSADO DE TEJIDOS.....	5
2.2 MANUFACTURA – APLICACIÓN DE MATRIZ CEMENICIA	12
2.3 MANUFACTURA – CORTE DE PROBETAS.	19

TERCERA PARTE

3.0 CONCLUSIONES	22
3.1 APORTACIONES	22
REFERENCIAS	23

INTRODUCCIÓN

Esta investigación da continuidad a los planteamientos de la tesis desarrollada por *Tomas Bhose* la cual lleva por nombre: “*Experimental study of the influence of prestressing the mesh on the mechanical properties of TRM*” y de la cual se toman la mayor parte de los contenidos en este documento. En dicha investigación se exponen los resultados de pretensar los tejidos de la fibra de basalto antes de la elaboración y aplicación del mortero, bajo la consideración de la alta compatibilidad del tejido el cual es completamente inorgánico.

Durante la estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), campus Terrassa, se me invitó a formar parte de la realización de probetas de mortero reforzado con fibras de basalto a partir de un nuevo planteamiento en el modo de aplicar el tejido en la matriz con base en los resultados de la tesis de *Tomas Bhose*. Sin embargo debido a la disponibilidad de tiempos de trabajo sólo se exponen a modo general los alcances logrados durante la cooperación con el equipo de trabajo, los cuales corresponden únicamente a la manufactura de los especímenes.

1.0 PROYECTO

OBJETIVOS

Principal:

Evaluar la influencia de tejidos de fibra de basalto pretensados que se han dejado alcanzar su curva de relajación máxima, insertados en una matriz de mortero.

General:

Reducir los agrietamientos en estructuras con morteros de obra civil.

HIPÓTESIS

Si se deja reposar a los tejidos de basalto pretensados hasta atenuar la deformación impuesta, la fibra de refuerzo no sufrirá ninguna deformación durante el tiempo de curado de la matriz cementicia.

1.1 MARCO TEÓRICO

Considerando como base de investigación a los materiales compuestos, o *composites*, son materiales que combinan las propiedades de uno o más componentes para crear un nuevo material [1]. El refuerzo textil de morteros o TRM (*Textile Reinforced Mortar*) combina la matriz (mortero) con fibras inorgánicas para crear un compuesto resistente a reacciones alcalinas, permeable al vapor de agua, resistente al fuego, no tóxico y además aplicable en superficies complejas [2].

La selección de la fibra de basalto sobre otras utilizadas en la construcción (carbón, vidrio, polipropileno...) se debe al origen volcánico, a través de las rocas formadas por la lava y las cuales son abundantes en la tierra lo que garantiza el abastecimiento; y por su desempeño elástico hasta el punto de rotura, similitud con las propiedades de la fibra de vidrio (aunque el basalto las supera) y resistencia química [2] [3].

En contraste con los FRPC (*Fiber Reinforced Polymer Composites*) los cuales se utilizan para la reducción de peso y por su resistencia a la corrosión, los morteros reforzados ofertan una opción de material que cubre las desventajas de los FRPC, tales como capacidad de carga y resistencia al fuego. No obstante el refuerzo de estructuras con fibra de basalto se ha utilizado con resultados favorables en muros ladrillo y vigas de concreto [2].

MÉTODOS DE PRUEBA

Se han desarrollado diversos métodos para la aplicación de fuerza de tensión en las probetas: sistemas de agarre y conexión, y de forma simultánea se han propuesto diferentes geometrías y para asegurar la fuerza unidireccional sin que la pieza sufra flexiones durante la transmisión de fuerzas. Todas estas condiciones sumadas a la manufactura y propiedades de los materiales influyen sobre el registro de la capacidad de carga del compuesto. La razón para definir la forma óptima de la probeta es tener control sobre el área de fractura y de esa forma asegurar la unión matriz – tejido y asegurar la correcta colocación de los instrumentos de medición de la deformación [2].

La geometría definida para los ensayos fueron placas de mortero de 40cm de largo, 5cm de ancho y 1cm de grosor a las cuales se les colocó un par de placas metálicas en cada extremo mediante un adhesivo epóxico. Cada par de placas tiene un agujero por el que se corre un tornillo del cual se sujetan a la máquina de pruebas universales a través de ganchos. En las figuras 1 y 2 se muestra un esquema de las probetas y el sistema de sujeción.

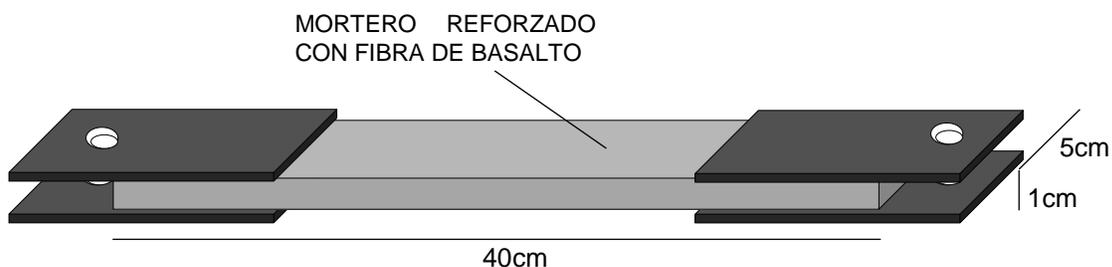


FIGURA 1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS PROBETAS DE MORTEROS REFORZADOS.

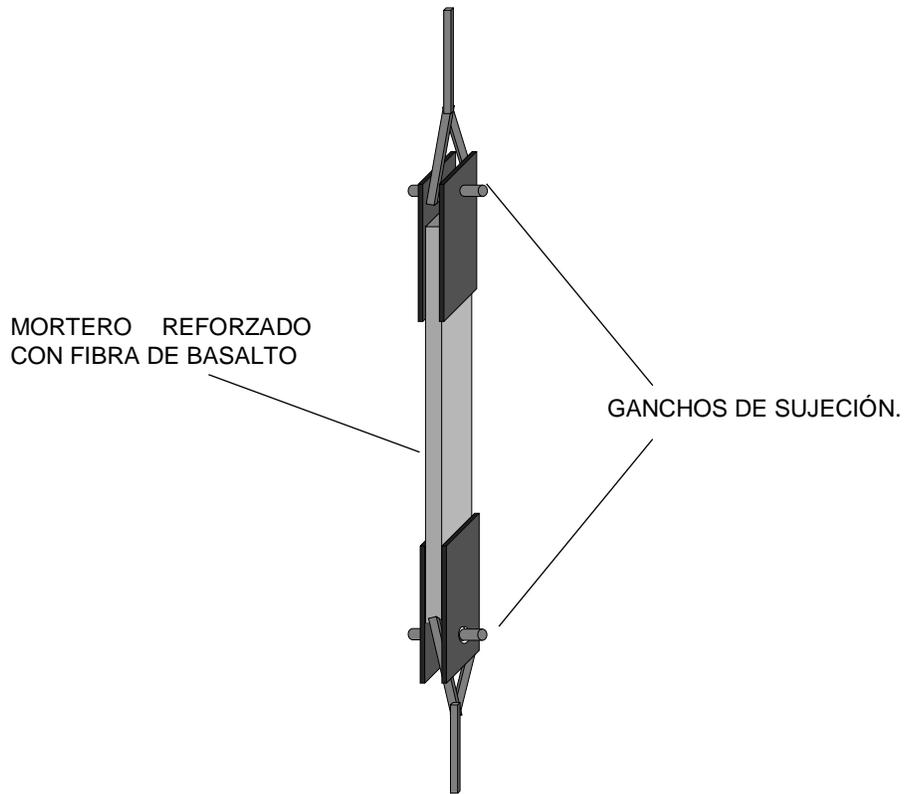


FIGURA 2 SISTEMA DE MONTAJE DE PROBETAS EN MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSALES.

Otros factores que se debe considerar es las piezas no sean rectas y sus irregularidades provoquen excentricidades durante la distribución del esfuerzo o que el refuerzo no se encuentre en el centro de la pieza durante el ensayo, en la figura 3 se muestran algunos de los efectos de los fenómenos descritos.

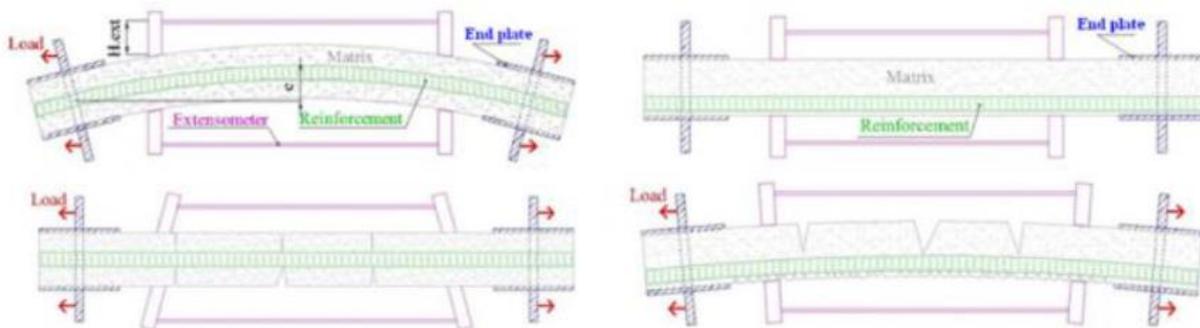


FIGURA 3 FLEXIONES INDESEADAS SEGÚN CONTAMINE, R., SI LARBI, A., & HAMELIN. Tomado de la tesis de Tomas Bhose.

2.0 PROBETAS

MATERIALES

Mortero *Sika Monotop*, tejido de fibra de Basalto y desmoldante, figura 4.



FIGURA 4 MATERIALES: FIBRA DE BASALTO Y CORTADOR. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

EQUIPO Y HERRAMIENTA

Mesa de trabajo, molde de madera, estructura para pretensado, cortador circular, taladro con mezclador, esmeril, computadora portátil con software de especializado “*catman AP*”, equipo *data recorder* “*HBM*”, báscula, cuñas metálicas, llaves españolas, ropa protectora, guantes, goggles y cubre bocas.

2.1 MANUFACTURA – PRETENSADO DE TEJIDOS

La primera etapa de la fabricación de las probetas comprende cortar el tejido de basalto en tiras de 5cm de ancho, acorde al molde que se utilizó, para colocarlas en la estructura y proceder a tensarlas. Esta estructura está constituida por perfiles de acero “I” que forman un bastidor rectangular en el que se colocaron en los extremos dos perfiles “C” a los cuales se les adaptó para sujetar una serie de placas de acero en las que se montan los tejidos de basalto. Uno de estos perfiles “C” se encuentra fijo y el otro es móvil a través de la combinación de ganchos y tensores con horquillas, en la figura 5 se muestra la estructura para tensar y el detalle de los tejidos montados.



FIGURA 5 ESTRUCTURA PARA TENSAR Y DETALLE MONTAJE FIBRA DE BASALTO. Ídem.

Para sujetar la fibra a la placa metálica se fijó a la placa una pieza de madera con tornillos, sin embargo al colocar la fibra esta se deshilaba o deslizaba hasta el punto de dañar el tejido. El montaje de la fibra de basalto requirió de un sistema combinado de madera y caucho para evitar el deshilamiento del tejido durante la colocación; y para evitar el deslizamiento de la tira de basalto una vez que se encuentra montada.

Se utilizó un trozo de caucho en cada superficie de contacto de la fibra a modo de sándwich; para sujetarla se fijó un extremo y se envolvió en 360° alrededor de la pieza de madera. En la figura 6 se muestra el detalle una tira durante el montaje y una tira sujeta en ambos extremos de la estructura, y en la figura 7 se muestra un esquema del montaje de la fibra de basalto en las placas metálicas.



FIGURA 6 DETALLE DE MONTAJE FIBRA DE BASALTO EN ESTRUCTURA METÁLICA. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

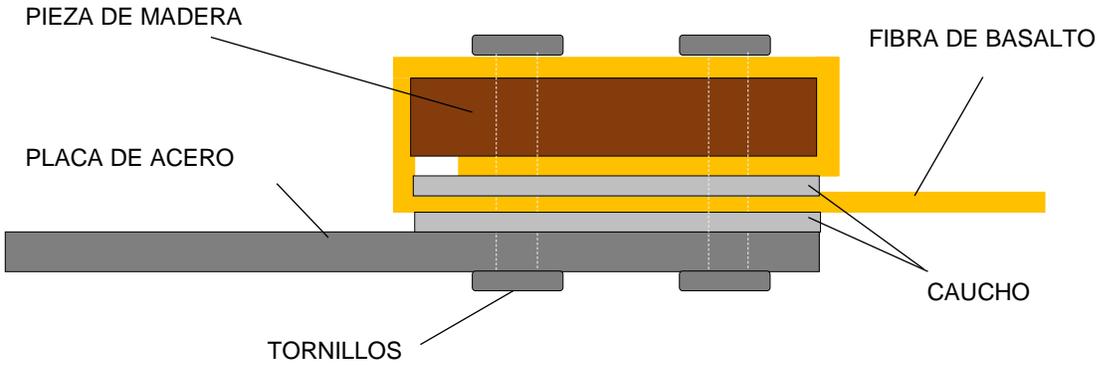


FIGURA 7 DETALLE MONTAJE FIBRA DE BASALTO.

Una vez montadas todas las tiras el siguiente paso es tensar y calibrar la fuerza de tensión en los tejidos, para lo cual se utilizó una sub-estructura de aluminio. El trabajo de este sub-sistema es proveer de una nivelación horizontal relativa a las placas durante el ajuste de los tornillos niveladores: de otra forma el peso propio de placa en suma con el de los componentes de la unión y ocasiona un desnivel respecto de las otras placas. El ajuste consiste en atar al extremo opuesto de las placas con un hilo hacia una pesa de 1kg, mediante un bastidor de aluminio el hilo jala la placa para mantenerla en posición relativamente horizontal durante el ajuste de los tornillos, el esquema de ajuste se muestra en la figura 8.

Una vez que todas las placas fueron niveladas, se procedió a apretar las tuercas de los tornillos hasta que las placas estuvieron fijas, inmediatamente se retiraron las pesas y la estructura de aluminio. Es importante mencionar que este sistema de alineamiento ha sido perfeccionado a través de la reinterpretación de datos provistos de ensayos anteriores, por lo que este método de ajuste no se realizó de manera empírica. En la figura 9 se muestra la estructura de ajuste de aluminio y en las figuras 10 y 11 la colocación de pesas y el ajuste de tornillos de nivelación.

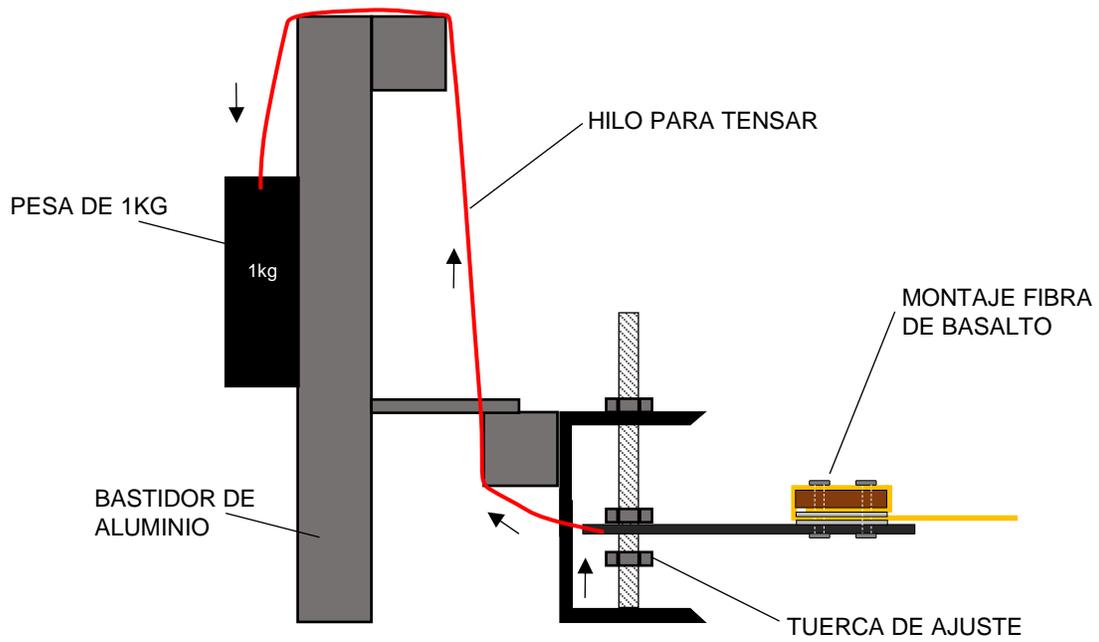


FIGURA 8 ESQUEMA NIVELACIÓN DE PLACAS DE MONTAJE.

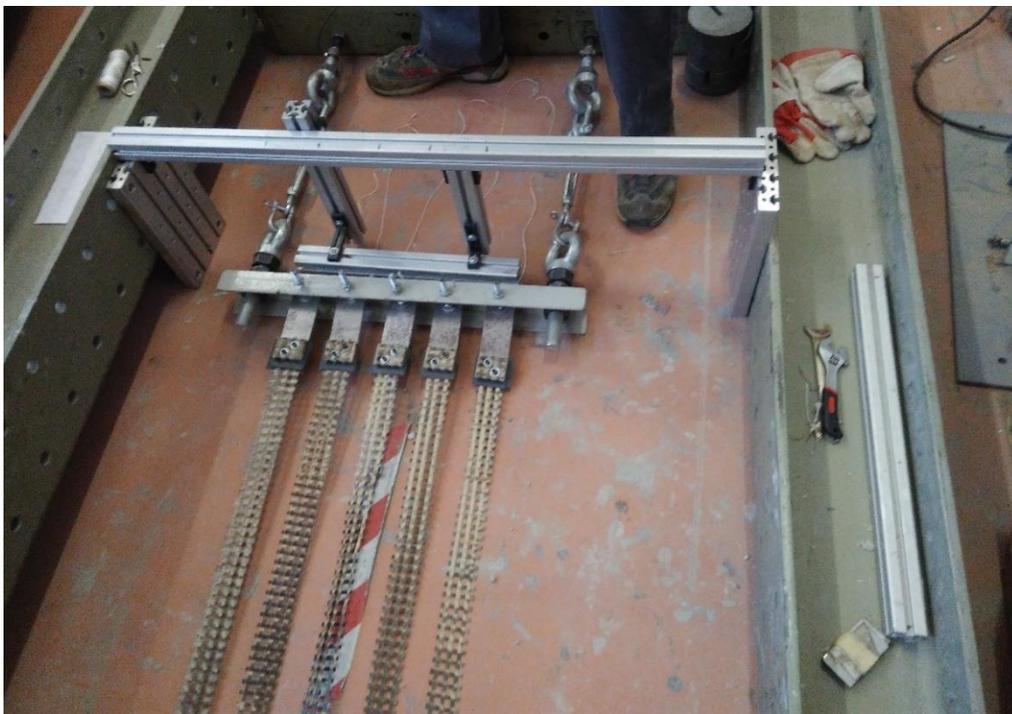


FIGURA 9 SUBESTRUCTURA NIVELADORA DE ALUMINIO. Fotografía del equipo tomada con permiso del Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) y la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC).



FIGURA 10 COLOCACIÓN DE PESOS NIVELADORES DE PLACAS. Ídem.



FIGURA 11 AJUSTE DE TORNILLOS DE NIVELACIÓN. Ídem.

Terminado el ajuste de los tornillos, se procedió con la calibración de la fuerza de tensión mediante los sensores con horquillas; para conocer los valores se utilizó una computadora portátil con software especializado “catman AP” y un equipo para captura de datos data recorder “HBM”. El procedimiento consistió en conectar los sensores de presión (previamente instalados) en la unión de los ganchos con el tensor de horquilla al equipo de captura y este a la computadora; después se procedió a tensar a mano las horquillas hasta los valores de fuerza en ambas fueran similares, que en este caso fueron de 866.916N y 869.02N. En la figura 12 se muestra el equipo de captura, en la figura 13 la conexión de la estructura al equipo, en la figura 14 el detalle de conexión y en la figura 15 el software con los valores de la fuerza de tensión.



FIGURA 12 COMPUTADORA CON SOFTWARE CATMAN AP Y DATA RECORDER HBM. Ídem.

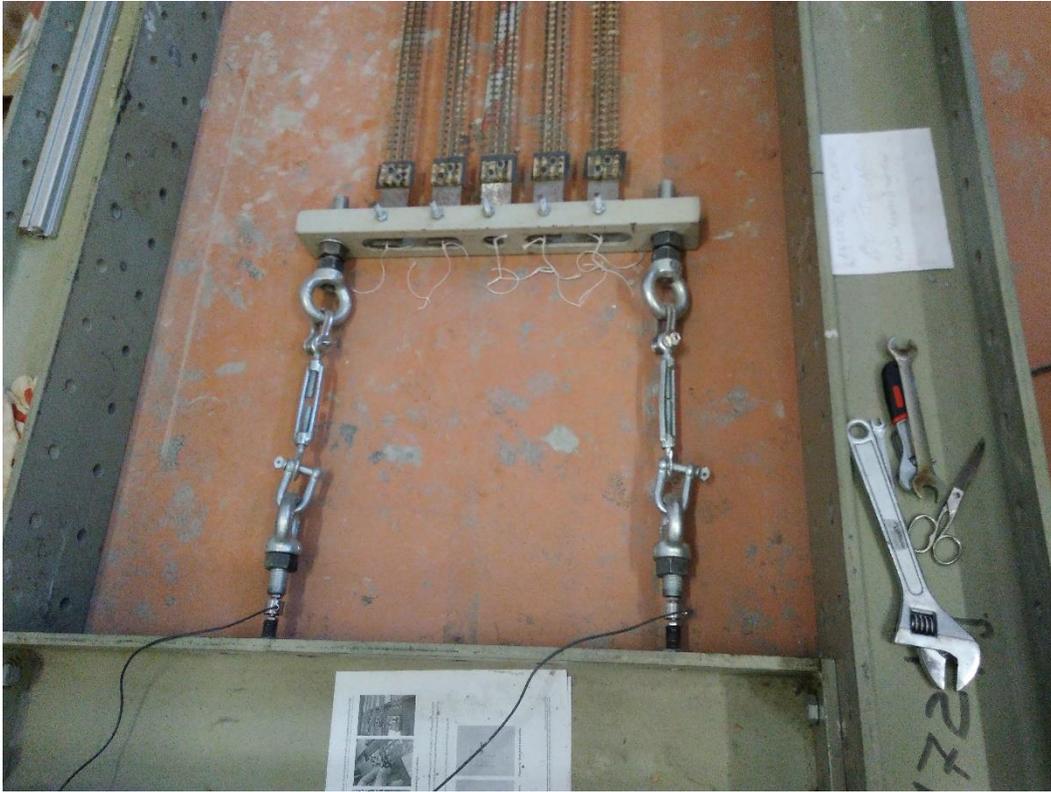


FIGURA 13 SENSORES DE PRESIÓN CONECTADOS A TENSORES. Ídem.



FIGURA 14 DETALLE CONEXIÓN SENSOR DE PRESIÓN. Ídem.

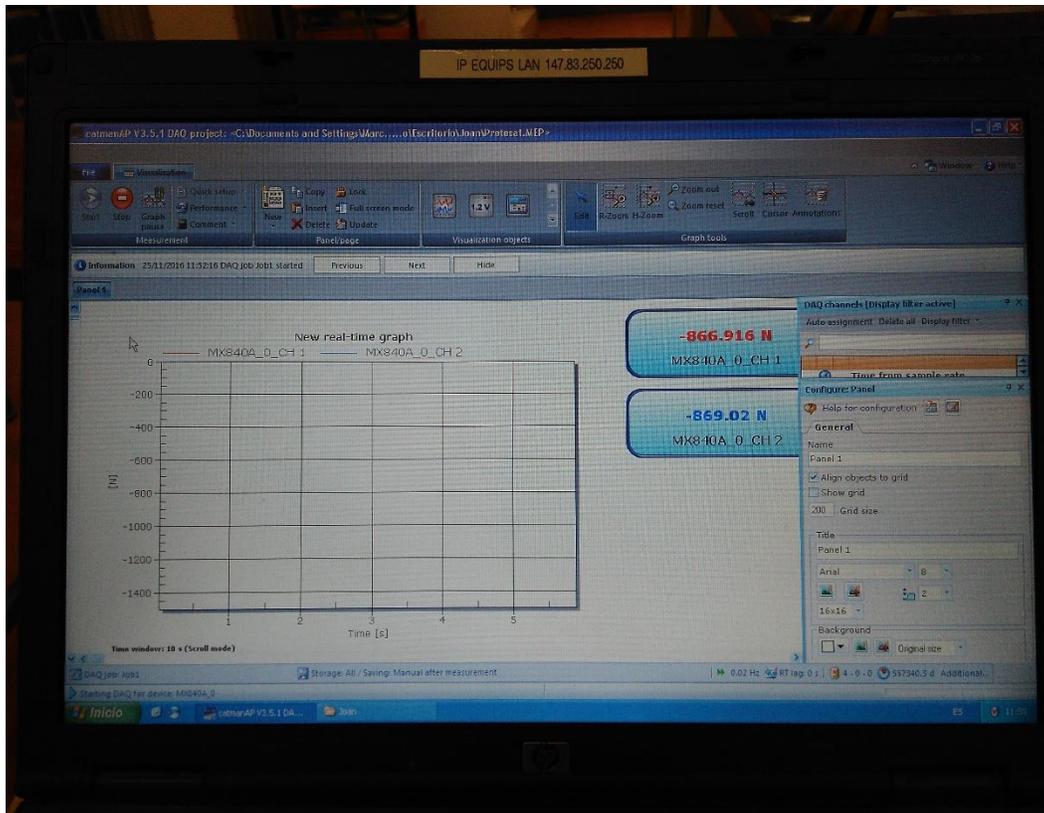


FIGURA 15 CALIBRACIÓN DE LA FUERZA DE TENSIÓN EN TEJIDOS DE BASALTO 25/11/2016. Ídem.

2.2 MANUFACTURA – APLICACIÓN DE MATRIZ CEMENICIA

Los tejidos pretensados se dejaron reposar por cuatro días hasta la aplicación de la matriz de mortero, durante ese lapso de tiempo se pudo apreciar un cambio en los valores de fuerza aplicados en los tejidos: las fibras se relajaron, sin embargo acorde a los datos registrados a los cuatro días uno de los tensores paso de 866.19N a 814.73N: disminuyo 52N y el otro presento un aumento de 869N a 870.9: aumentó 1.9N; lo que indica que los tejidos tuvieron un deslizamiento en un costado. En la figura 16 se muestran los datos de la fuerza de tensión en cada tensor.

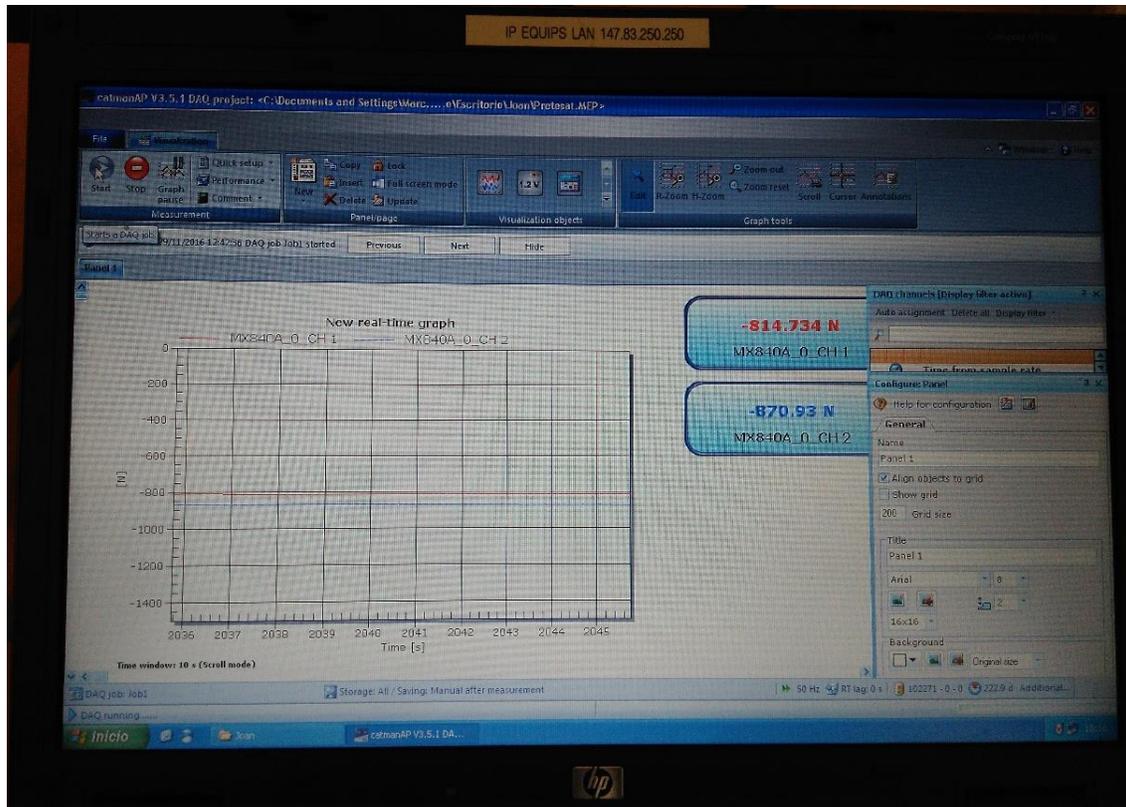


FIGURA 16 FUERZA DE TENSION EN LOS TENSORES DE LA FIBRA DE BASALTO 29/11/2016.Ídem.

A pesar de ese registro de fuerzas se decidió continuar con la realización de las probetas. Para lo cual se tomaron en cuenta los parámetros de las realizadas en la tesis de *Tomas Bhoze*, comenzando por la preparación del molde de madera con cinco superficies cóncavas cuyo ancho y separación entre si es el mismo que el de las tiras pretensadas.

A dicho molde se le debe aplicar al menos tres capas de desmoldante para curarlo y reducir el riesgo de fracturas durante el retiro de las piezas. De manera simultánea al curado del molde se inició la dosificación de mortero y agua para la mezcla de la matriz con la relación del 16% de agua por mezcla de mortero [2], se concentraron los materiales en una tina de plástico y se procedió al batido de la mezcla con el taladro eléctrico. En las figura 17 se muestra el curado del molde, en la figura 18 la dosificación de materiales y en la figura 19 el batido del mortero.



FIGURA 17 CURADO DE MOLDES PARA PROBETAS DE MORTERO REFORZADO CON FIBRAS DE BASALTO. Ídem.



FIGURA 18 DOSIFICACIÓN DE MORTERO Y AGUA. Ídem.



FIGURA 19 BATIDO DE MEZCLA DE MORTERO. Ídem.

Una vez terminada de batir, se aplicó con las manos una capa de 5mm de espesor en cada concavidad del molde y posteriormente se movió el molde hasta la estructura metálica de los pretensados. Se alinearon paralelamente las fibras y el molde a modo de que cada tira se viera insertada en uno de los huecos y después se niveló el molde de madera para que los tejidos estuvieran en contacto con el mortero. Cuando se cumplió esta condición se aplicó una segunda capa de mortero que cubriera a la capa anterior y a la fibra de basalto con 5mm de grosor. En la figura 20 se muestra la colocación del molde de madera con la primera capa de mortero y la alineación con los tejidos de basalto. En las figuras 21 se muestra la aplicación de la segunda capa de mortero y en la figura 22 la aplicación de la matriz terminada.



FIGURA 20 ALINEACIÓN DE MOLDE CON CAPA DE MORTERO Y LAS FIBRAS DE BASALTO. Ídem.



FIGURA 21 APLICACIÓN DE SEGUNDA CAPA DE MORTERO. Ídem.



FIGURA 22 APLICACIÓN DE MATRIZ DE MORTERO EN FASE FINAL/TERMINADA. Ídem.

Al terminar de aplicar la mezcla de mortero y retirar el excedente se procedió a hidratar y proteger las probetas hasta el desmolde y se tomaron tres muestras del mortero para su análisis posterior. En la figura 23 se muestra el curado de las probetas y la protección con hule y en la figura 24 la toma de muestras de mortero.



FIGURA 23 CURADO DE PROBETAS DE MORTERO Y PROTECCIÓN. Ídem.



FIGURA 24 MUESTRAS DE MORTERO. Ídem.

2.3 MANUFACTURA – CORTE DE PROBETAS.

El desmolde de las probetas se llevó a cabo con extrema precaución después de ocho días dado que el tiempo de secado mínimo para materiales de esta clase es de 28 días y existían altas probabilidades de fracturar las piezas si se golpeaba el molde con exceso de fuerza o si al desprender las probetas se tiraba de ellas muy rápido. Para retirar cada tita de mortero se comenzó por quitar las separaciones de madera laterales y con ayuda de un par de cinceles se rasgó sobre la arista de las probetas hasta crear un surco para despegar la pieza. En la figura 25 se muestra el desmolde de las probetas.



FIGURA 25 DESMOLDE DE PROBETAS DE MORTERO REFORZADAS CON FIBRAS DE BASALTO 07/12/2016. Ídem.

Las tiras de mortero no podían levantarse ya que esto implicaba otro riesgo de ruptura por la longitud del compuesto, así que para trasladarlas hacia la zona de corte se colocó una tabla junto al molde a hueso y se deslizaron las probetas del molde a la tabla. Se sujetaron las probetas a la tabla con prensas y se procedió a marcar las zonas de corte a cada 40cm. Durante los cortes se observaron algunos defectos en las probetas; una de ellas presentaba un momento flexioante bastante severo y dicha zona tuvo que desecharse. Sin embargo la mayoría de los especímenes resultaron apropiados, esto se debió a que el procedimiento, como ya ha dicho, ha ido mejorándose en cada ensayo. En la figura 26 se muestra una probeta preparada para corte, en la figura 27 una probeta durante el corte y en la figura 28 tres especímenes terminados.



FIGURA 26 PROBETA DE MORTERO REFORZADO PREPARADA PARA CORTE. Ídem.



FIGURA 27 CORTE DE PROBETA DE MORTERO REFORZADO. Ídem.



FIGURA 28 PROBETAS DE MORTERO REFORZADO CON FIBRA TERMINADAS. Ídem.

Las probetas terminadas fueron marcadas con la fecha de realización de la matriz y se guardaron hasta alcanzar el curado mínimo a hasta pasar 28 días y posteriormente se realizaría la ejecución de los ensayos de resistencia a tensión.

TERCERA PARTE

3.0 CONCLUSIONES

3.1 APORTACIONES

Debido a que el tiempo de estancia terminó antes de la realización de los ensayos, no se presenta ningún resultado o conclusión de las pruebas realizadas en la UPC.

En cuanto a la experiencia adquirida enriquece mi investigación actual en materiales compuestos y aporta una perspectiva distinta de los materiales cementicios y su potencialidad para encaminar la arquitectura hacia entornos sustentables. Otro aporte significativo es el material, la fibra de basalto no es común entre los constructores de México ni para los desarrolladores de materiales. Esto crea una oportunidad para integrar dicho material a un mercado nuevo y que además demanda con urgencia compuestos de bajo impacto y al alcance del poder adquisitivo de los ciudadanos, en especial los que autoconstruyen.

REFERENCIAS

- [1] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales*, México: Limusa / Wiley, 2009.
- [2] T. Bhoose, "Experimental study of the influence of pre-stressing the mesh on the mechanical properties of TRM," Universidad Politécnica de Cataluña., Terrassa, Barcelona, 2016.
- [3] D. García, A. Pello and J.-T. S.-J. y. L. Garmendia, "Confinement of medium strength concrete cylinders with basalt Textile Reinforced Mortar.," LABEIN-Tecnalia, Bilbao, Spain.
- [4] ASTM, *Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position.*, ASTM, 2014.
- [5] ASTM, "Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastics Lap-Shear Joints in Shear By Tension Loading.," ASTM, 2004.
- [6] astroradio, "astroradio.com," 2017. [Online]. Available: <http://meteo.ea3kz.com/history.html>.