

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Estudio del debonding del laminado viscoelástico en embarcaciones de
planeo sometidas al fenómeno de slamming.

INGE-2322

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Nohely Rebeca Matias Panchana

Allison Gisella Pincay Correa

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a la memoria de mi padre Pedro Matias, por creer en mí siempre y por demostrarme su amor incondicional, estoy segura de que donde estés estarás muy orgulloso. A mi mamá por su amor, valentía y fortaleza en los días difíciles, y por su apoyo durante todo este proceso. A mi hermano Bryan Matias por motivarme a seguir adelante. A mis familiares por acompañarme y alentarme a seguir adelante.

Nohely Matias Panchana.

El presente proyecto lo dedico a mi madre, Gisella Correa, que nunca se ha rendido conmigo y ha estado ahí para verme lograr mis objetivos con mucho orgullo. A mi hermana, Asareel Pincay, que ha estado ahí para darme fuerzas y no detenerme. A mi padre, Freddy Pincay, que me ha apoyado cuando lo he necesitado. A mis abuelitos Panchita y Oswaldo, y a mis tíos, Lizardo, Johanna y Cristian, que me han permitido continuar sin detenerme con sus sabios consejos. A Paul, por ser especial e incondicional desde el momento uno.

Allison Pincay Correa.

Agradecimientos

Gracias a nuestros profesores de la carrera que impartieron sus conocimientos y ayudaron a que logremos lo que hemos hecho hasta hoy. A la MSc. Tadea Quintuña, excelente profesional que nos motivó hasta el final. Al Dr. Patrick Townsend, por su tiempo, paciencia y guía durante el desarrollo de este proyecto. Al Ing. Arian Briones por hacer posible la materialización de nuestro experimento. A nuestros amigos, Ronny y Tais, que se han convertido en unos hermanos para nosotras y la mejor compañía a lo largo de esta travesía con varias amanecidas. A nuestros compañeros de la carrera y ahora colegas.

Nohely Matías Panchana.

Allison Pincay Correa.

Declaración Expresa

Nosotros Nohely Rebeca Matias Panchana y Allison Gisella Pincay Correa acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 26 de enero del 2024.

Nohely Matias

Allison Pincay

Evaluadores

M.Sc. Tadea Quintuña

Profesor de Materia

PhD Patrick Townsend

Tutor de proyecto

Resumen

El slamming es uno de los principales problemas a los que se enfrentan las embarcaciones de alta velocidad, este fenómeno se asocia al movimiento extremo de estos navíos en olas, cuando la proa del barco sale del agua y cae verticalmente impactando en el fondo del casco, que luego de un tiempo provoca daños en su estructura. Por esto, se pretende implementar el uso de viscoelásticos en la construcción de estas lanchas, de manera que aumente su resistencia y durabilidad.

Se realizó el análisis del debonding, para esto se elaboraron seis probetas solo de GFRP y seis modificadas viscoelásticamente, que luego fueron sometidas a ensayos de tracción. Los resultados obtenidos fueron gráficas de fuerza y desplazamiento, donde se determinó la fuerza máxima que soporta el material (fuerza del debonding), que a su vez permitió encontrar la tasa de crecimiento de grietas, la relación de esfuerzos y la razón de falla de cada probeta. Se obtuvo que las grietas se dan en menor cantidad en las probetas modificadas, y que tienen una mayor resistencia cuando va a fallar. Por ende, se considera que el uso de este material previene el daño producido por el slamming y que se encuentra listo para ser usado en la construcción.

Palabras Clave: Slamming, Debonding, Viscoelástico, PFRV

Abstract

Slamming is one of the main problems faced by high speed vessels, this phenomenon is associated with the extreme movement of these vessels in waves, when the bow of the ship comes out of the water and falls vertically impacting the bottom of the hull, which after a while causes damage to its structure. For this reason, it is intended to implement the use of viscoelastic materials in the construction of these boats, in order to increase their strength and durability.

Debonding analysis was performed, for which six non-modified and six viscoelastically modified specimens were prepared and then subjected to tensile tests. The results obtained were force and displacement graphs, where the maximum force supported by the material (debonding force) was determined, which in turn allowed finding the crack growth rate, the stress ratio and the failure ratio of each specimen. It was found that cracks occur in less quantity in the modified specimens, and that they have a higher resistance when it is going to fail. Therefore, it is considered that the use of this material prevents the damage produced by slamming and that it is ready to be used in construction.

Keywords: slamming, debonding, viscoelastic, GFRP

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema.....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Materiales compuestos.....	5
1.5.2 Construcción de embarcaciones en fibra de vidrio	6
1.5.3 Fenómeno de slamming	8
1.5.4 Mecánica de fractura	8
1.5.5 Modo de carga o fractura	8
1.5.6 Modelo de zona cohesiva	9
1.5.7 Delaminación de materiales compuestos.....	10
1.5.8 Desprendimiento o Debonding	11
Capítulo 2	13
2.1 Metodología.....	14
2.1.1 Flujograma	15

2.2	Descripción de equipos.....	16
2.2.1	<i>Equipo SHIMADZU UH-X/FX Series</i>	16
2.2.2	<i>Equipo SHIMADZU UH-X/FX Series</i>	17
2.3	Descripción de los especímenes	17
2.3.1	<i>Diseño del espécimen</i>	17
2.3.2	<i>Dimensión del espécimen</i>	18
2.3.3	<i>Dimensión del viscoelástico (2da generación)</i>	18
2.3.4	<i>Laminado del espécimen</i>	19
2.3.5	<i>Laminado del espécimen sin modificar</i>	19
2.3.6	<i>Laminado del espécimen modificado</i>	20
2.4	Descripción del ensayo de tracción	21
2.4.1	<i>Obtención de datos</i>	24
2.5	Cálculos desarrollados	24
Capítulo 3		27
2.6	Resultados y análisis.....	28
2.7	Resultados del ensayo de tracción	28
2.7.1	<i>Fuerza vs. Desplazamiento</i>	28
2.7.2	<i>Desplazamiento vs. Tiempo</i>	31
2.7.3	<i>Tasa de crecimiento de grietas</i>	32
2.7.4	<i>Razón de falla</i>	33
2.8	Análisis de resultados	34
2.8.1	<i>Fuerza del Debonding</i>	34
2.8.2	<i>Tasa de crecimiento de grietas</i>	34
2.8.3	<i>Relación de esfuerzos (Strength ratio)</i>	35
2.8.4	<i>Razón de fallo</i>	35
Capítulo 4		37
3.1	Conclusiones y recomendaciones.....	38

3.2	Conclusiones.....	38
3.3	Recomendaciones	39
	Referencias	40

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

GFRP Glass Fiber Reinforced Polymer

Simbología

cm	Centímetro
mm	Milímetro
min	Mínimo
max	Máximo
F	Fuerza
σ	Esfuerzo
s	Segundo

Índice de figuras

Figura 1 Estructura del material compuesto.....	6
Figura 2 <i>Proceso manual de capas para producir material compuesto GFRP.....</i>	<i>7</i>
Figura 3 Modos de carga	9
Figura 4 Representación del Modelo de Zona Cohesiva.....	10
Figura 5 Representación de la delaminación en vista transversal.....	11
Figura 6 Observación del fenómeno de debonding	12
Figura 7 Flujograma que detalla la metodología	15
Figura 8 Máquina SHIMADZU UH-FX.....	16
Figura 9 Máquina SHIMADZU UH-X	17
Figura 10 Dimensiones de cada espécimen antes de la unión	18
Figura 11 Dimensión del espécimen final	18
Figura 12 Dimensión del viscoelástico.....	19
Figura 13 Especimen sin modificar.....	19
Figura 14 Especimen modificado viscoelásticamente	20
Figura 15 Probeta con sección variable	21
Figura 16 Ubicación de extensómetros	22
Figura 17 Probetas listas para realizar los ensayos de tracción.....	23
Figura 18 Ensayo de tracción.....	23
Figura 19 Fuerza vs deformación	24
Figura 20 Curvas de fuerzas vs desplazamiento para las probetas sin modificar.....	29
Figura 21 Curvas de fuerzas vs desplazamiento para las probetas modificadas viscoelásticamente.....	29
Figura 22 Curvas de fuerza vs desplazamiento para probeta de sección variable.....	30
Figura 23 Curvas de desplazamiento vs tiempo para las probetas sin modificar.....	31
Figura 24 Curvas de desplazamiento vs tiempo para probetas modificadas viscoelásticamente.....	32
Figura 25 Tasa de crecimiento de grietas en probetas sin modificar	32
Figura 26 Tasa de crecimiento de grietas en probetas modificadas viscoelásticamente..	33
Figura 27 Razón de fallo de las probetas modificadas con viscoelástico y sin modificar....	33
Figura 28 Proceso de fabricación de las probetas.....	43
Figura 29 Fotos de microscopía óptica del espécimen tomadas con un aumento de x150	43

Figura 30 <i>Probetas luego del ensayo de tracción</i>	44
Figura 31 <i>Límites de fuerzas del debonding la probeta 1</i>	50
Figura 32 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 2</i>	50
Figura 33 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 3</i>	50
Figura 34 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 4</i>	51
Figura 35 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 5</i>	51
Figura 36 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 6</i>	51
Figura 37 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 1V</i>	52
Figura 38 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 2V</i>	52
Figura 39 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 3V</i>	52
Figura 40 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 4V</i>	53
Figura 41 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 5V</i>	53
Figura 42 <i>Límites de fuerzas del debonding de la probeta 6V</i>	53

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Dimensiones principales del espécimen de cada ensayo</i>	18
Tabla 2 <i>Configuración del laminado del espécimen sin modificar</i>	20
Tabla 3 <i>Configuración del laminado del espécimen modificado viscoelásticamente</i>	21
Tabla 4 <i>Relación de esfuerzos de las probetas sin modificar y modificadas viscoelásticamente</i>	35
Tabla 5 <i>Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 1, 2 y 3</i>	45
Tabla 6 <i>Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 4, 5 y 6</i>	46
Tabla 7 <i>Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 1V, 2V y 3V</i>	47
Tabla 8 <i>Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 4V, 5V y 6V</i>	48
Tabla 9 <i>Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU de las probetas de sección reducida</i>	49
Tabla 10 <i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 1</i>	54
Tabla 11 <i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 2</i>	55
Tabla 12 <i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 3</i>	56

Tabla 13	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 4</i>57
Tabla 14	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 5</i>58
Tabla 15	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 6</i>59
Tabla 16	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 1V</i>	...60
Tabla 17	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 2V</i>	...61
Tabla 18	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 3V</i>	...62
Tabla 19	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 4V</i>	...63
Tabla 20	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 5V</i>	...64
Tabla 21	<i>Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 6V</i>	...65
Tabla 22	<i>Resultados del análisis de la razón de falla y relación de esfuerzos probetas sin modificar</i>66
Tabla 23	<i>Resultados del análisis de la razón de falla y relación de esfuerzos probetas modificadas</i>66

Capítulo 1

1.1 Introducción

Uno de los principales problemas que sufren las embarcaciones de altas velocidades como patrulleras, embarcaciones militares y rescate, es el impacto que ocasiona la superficie libre en el casco de la embarcación, este fenómeno es conocido como “slamming”. Este es uno de los fenómenos más preocupantes en la navegación marítima, ya que está asociado al movimiento extremo de vehículos marinos en olas. Ocurre cuando la proa del barco sale del agua debido a una combinación de movimientos de levantamiento y cabeceo, (BENAMEUR HAMOUDI, 1995) y, por efecto de la superficie libre, planea sobre el agua, y al romperse el equilibrio cae verticalmente, afectando a su integridad estructural (Townsend D. P., 2018). Este fenómeno, es una fuente constante de grietas en los espacios vacíos de proa del casco de las embarcaciones (BENAMEUR HAMOUDI, 1995). Por esta razón, durante la construcción de estos navíos se requiere un proceso de manufactura que permita aumentar la resistencia y durabilidad del casco.

En Ecuador, las lanchas rápidas han tenido una gran acogida en los últimos años, debido a las distintas actividades que se pueden realizar, tales como transporte, pesca y vigilancia, que en su mayoría están construidas de manera artesanal con fibra de vidrio. En un estudio técnico realizado en un taller de la parroquia Anconcito del Cantón Salinas, provincia de Santa Elena, se obtuvo que el 93% de las personas que construyen estas lanchas no cuentan con ningún tipo de capacitación, por lo que estas construcciones las realizan de forma empírica y basándose en observaciones de empleados más antiguos del taller, provocando fallos en la calidad del producto final (REYES, 2018). El uso indebido de los componentes y sustancias que conforman las mezclas alteran las especificaciones técnicas de calidad necesarias para llegar a un resultado óptimo de lancha, por lo que desperdician y mal usan la cantidad adecuada de material. Adicionalmente hay más puntos a contemplar, como la falta de herramientas y maquinarias, el espacio no ventilado, el almacenamiento inadecuado de material, no utilizar el equipo de protección adecuado, entre otros

(REYES, 2018). Considerando que mejorar las condiciones de trabajo debe realizarse de forma progresiva, se busca implementar una solución inmediata a las lanchas existentes.

La evolución de la construcción naval se destaca siempre por la innovación de herramientas, métodos de construcción y desarrollo de componentes, con la finalidad de encontrar nuevos materiales que reduzcan el peso del buque, y que simultáneamente mejore su resistencia y vida útil (Fernández, 2021). Townsend propone crear láminas viscoelásticas que pueden ser colocadas al momento de laminar el casco, de manera que absorban la energía que produce el golpe de las olas contra el casco y eviten que los paneles del fondo sufran daños (Townsend P. , 2018). La colocación de estos viscoelásticos en el casco debe ser en los puntos donde exista mayor presión de slamming, que de acuerdo con la sociedad clasificadora America Berau of Shipping (ABS, 2021), se produce en la región del fondo plano, a 0.25 de la eslora medida desde la perpendicular de proa. Townsend muestra en su investigación el caso de una embarcación que tras un año de servicio presenta daños en el fondo del casco, existiendo delaminaciones en la zona crítica de la astilla muerta (Townsend D. P., 2018). Debido a esto, se espera que implementando estos viscoelásticos en las lanchas construidas, disminuya la energía de impacto en el fondo del casco.

El propósito de este proyecto es estudiar la capacidad de adherencia del viscoelástico en el laminado de GFRP, la cual es una de las varias características del material, que aún no ha sido estudiada, conocida como "debonding". Este estudio se hará mediante la elaboración de probetas de fibra de vidrio modificadas viscoelásticamente para luego someterlas a tensión, y con los resultados obtenidos observar la evolución de daño en las probetas sin modificar y modificadas, y analizar si el uso de estos viscoelásticos ayudaría a disminuir el grado de daño estructural. El motivo es promover el uso de paneles modificados viscoelásticamente, permitiendo el aumento de la vida útil de las lanchas rápidas ya construidas, tomando en cuenta las deficiencias para su construcción y óptimo funcionamiento.

1.2 Descripción del Problema

El slamming está asociado al movimiento extremo de embarcaciones, a una cierta velocidad la proa sale del agua y al romperse el equilibrio cae, generando golpe en el fondo del casco, que progresivamente provoca un desgaste y puede llevar a que falle (Benameur, 1995). Este fenómeno afecta especialmente a embarcaciones de alta velocidad, lo que hace posible que la instalación de estos viscoelásticos pueda ofrecerse a varias empresas.

En Ecuador, el uso de embarcaciones de alta velocidad ha tenido una gran acogida los últimos años, por este motivo FAMORSA S.A., empresa dedicada a la construcción y reparación de buques en Ecuador, busca implementar láminas de viscoelásticos en la construcción de sus embarcaciones de manera que se tenga mayor resistencia en el fondo del casco. Para lograr esto, se necesita que previamente se estudie el “debonding”, el cual es un mecanismo de falla al que este material puede estar expuesto cuando la embarcación se encuentre en condiciones normales de operación. El debonding se convierte en una característica o propiedad del material, que requiere ser estudiado para completar la ficha técnica del viscoelástico.

1.3 Justificación del Problema

En la actualidad no se ha realizado un estudio previo del fenómeno de “debonding” en láminas de fibras de vidrio modificadas viscoelásticamente, por esta razón en este proyecto se pretende analizar la capacidad de adherencia del viscoelástico a las láminas fabricadas con fibra de vidrio, y poder dar a conocer a la empresa FAMORSA S.A. que estos viscoelásticos ayudarán a disminuir el grado de daño estructural del casco de las embarcaciones.

La inserción de estas láminas viscoelásticas en las embarcaciones permite absorber los daños del casco cuando el navío es sometido al fenómeno de slamming. Pero, además de mitigar el daño del casco, se espera que con el uso de este material las empresas dueñas de este tipo de embarcaciones puedan reducir el costo de lo que conlleva dar mantenimiento, aumentando su vida útil.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la capacidad de adherencia de los viscoelásticos en laminados de fibra de vidrio GFRP, mediante ensayos de laboratorio con probetas sometidas a tensión de tracción, para poder implementar este material en el fondo de las embarcaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Elaborar probetas de fibra de vidrio sin modificar y modificadas viscoelásticamente, basadas en la norma ASTM D3039 para realizar ensayos de laboratorio y establecer una comparación de resultados.
2. Determinar la capacidad de adherencia del viscoelástico mediante ensayos de tensión para añadir esta característica a la ficha técnica del material.
3. Obtener las deformaciones mediante la ubicación de dos extensómetros en la zona cohesiva, para luego con el desarrollo de una formulación matemática encontrar la tasa de crecimiento de grietas en la delaminación que servirá para futuros diseños.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Materiales compuestos

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales químicamente distintos e insolubles, que como resultado origina un material con propiedades y rendimiento estructural superior al que tendría solo uno de los materiales (Dr. S. Selvaraju, 2011). Están compuestos por dos fases: la matriz como fase continua que actúa como ligante, y los refuerzos como fase discontinua que es el elemento resistente (Alonso, 2016).

Una de las características de los materiales compuestos es su ligereza, obteniendo así ventajas económicas, facilitando su transporte y puesta en obra. Presentan también propiedades no corrosivas, lo que es una gran ventaja en las aplicaciones marinas. Además, tiene buenas

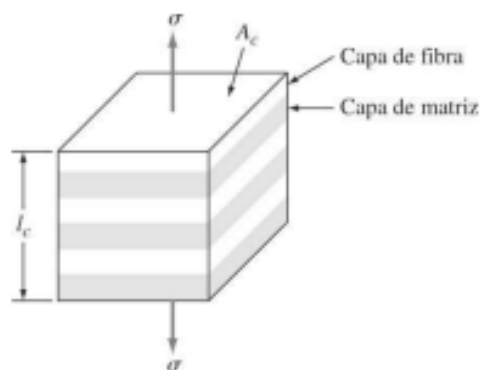
características mecánicas cuando el material es sometido a tracción o compresión (Recuero & Gutiérrez, 1997).

Según su matriz se clasifican en:

- Materiales compuestos de matriz metálica
- Materiales compuestos de matriz cerámica
- Materiales compuestos de matriz polimérica.

En la presente investigación el material compuesto a utilizar es de matriz polimérica, la cual está formada por un polímero y el refuerzo es de fibra sintética o inorgánica. Es resistente a la corrosión y agentes químicos, y puede ser moldeado a diferentes formas (Besednjak, 2005).

Figura 1 Estructura del material compuesto



Nota: Ilustración tomada de Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, por (Smith, 2006)

1.5.2 Construcción de embarcaciones en fibra de vidrio

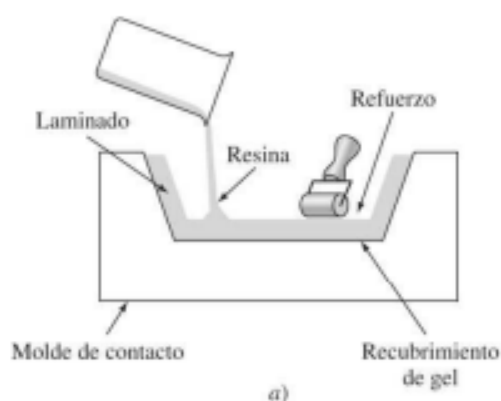
A finales de los años cincuenta, el uso de materiales compuestos de matriz polimérica incrementó masivamente en la construcción naval, ya que con su uso se redujo el costo de materia prima y permitió el desarrollo de nuevos procesos de construcción. Sin embargo, de todas las fibras de refuerzo existentes, las más usadas en la construcción de embarcaciones es la fibra de vidrio (Besednjak, 2005).

Según (Smith, 2006) los materiales compuestos de plástico con fibra de vidrio presentan las siguientes características:

- Alta relación entre resistencia y peso
- Estabilidad dimensional
- Resistencia al calor y al frío
- Resistencia a la humedad y a la corrosión
- Propiedades de aislamiento eléctrico
- Facilidad de producción
- Costo parcialmente bajo

Para producir plásticos reforzados con fibra de vidrio existen varios métodos, como el proceso de colocación manual de capas, proceso de aspersión y proceso de bolsa de vacío en autoclave (Smith, 2006). El proceso que se aplicará en este proyecto será de colocación manual de capas, el cual según (Smith, 2006) consiste en colocar de forma manual la tela de refuerzo de fibra de vidrio, luego aplicar resina la cual está mezclada con catalizadores y aceleradores. Posteriormente, se humedece la resina con la fibra de vidrio, y se vuelve a agregar capas de fibra de vidrio para aumentar el espesor de la pieza.

Figura 2 Proceso manual de capas para producir material compuesto GFRP



Nota: Ilustración tomada de Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, por (Smith, 2006)

1.5.3 Fenómeno de slamming

El fenómeno de slamming ocurre cuando en mar agitado, el casco del buque emerge por momentos y cae con un fuerte impacto, experimentando cargas de impulso durante el impacto entre el casco y el agua (ABS, 2021).

El efecto de las cargas de slamming puede clasificarse como la carga secundaria más significativa que se impone a la estructura local dando lugar a la deformación plástica en la estructura del fondo del buque (Benameur, 1995).

La presión máxima producida en la zona de impacto y la frecuencia con la que se tienen estos impactos depende de la velocidad de la embarcación, del ángulo de ataque medido desde la superficie libre del agua a la superficie del casco y de las dimensiones del panel del fondo (J.C. Suárez, 2003).

1.5.4 Mecánica de fractura

Es la ciencia que estudia el comportamiento de un material en presencia de una grieta, permite determinar el máximo esfuerzo que puede soportar un material si contiene una grieta con dimensiones conocidas. También permite conocer la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material con grietas, sometido a cierta tensión.

A partir de los trabajos de Griffith (1921, 1924) nace la Mecánica de Fractura Lineal, la cual indica que la propagación de grietas en sólidos se da por una transformación de energía elástica a energía de superficie (Alvarez, 2004).

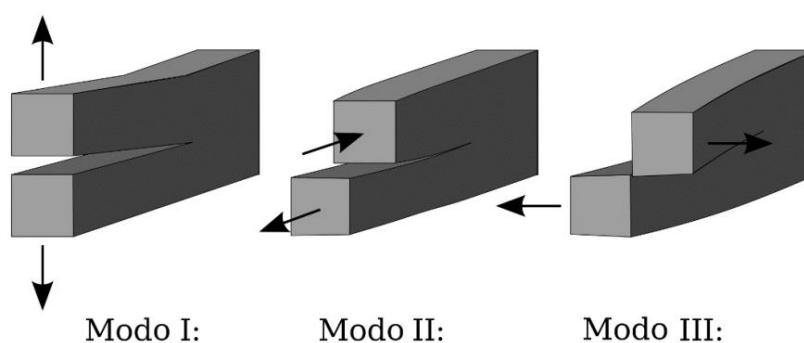
1.5.5 Modo de carga o fractura

Según Broek (1986), las grietas sometidas a tensión se dan de tres modos diferentes, que determinan la dirección en que estas fuerzas se propagan. (LASERNA, 2017)

- Modo I: También llamado “modo de apertura”, ocasionado cuando al aplicar fuerzas normales al plano, la grieta se abre.

- Modo II: También llamado “modo deslizante”, ocurre cuando se aplican fuerzas paralelas opuestas en sentido longitudinal al plano.
- Modo II: También llamado “modo de ruptura”, provocado por fuerzas paralelas opuestas, pero en sentido transversal al plano. (LASERNA, 2017)

Figura 3 *Modos de carga*



Nota: Ilustración tomada del proyecto de grado de (LASERNA, 2017) en el estudio de la delaminación de un compuesto de fibra de vidrio sometido a cargas cuasiestáticas y a fatiga por impacto en modo I de carga.

En el caso de este proyecto, se trabajará con un modo II de carga o fractura.

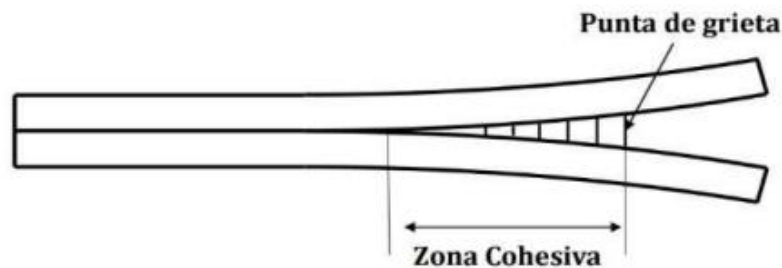
1.5.6 *Modelo de zona cohesiva*

Es un modelo de la Mecánica de Fracturas, que considera que las fisuras se producen de forma gradual. Los modelos de zona cohesiva (“Cohesive Zone Models”, CZM), fueron introducidos por Barenblatt (1962) y Dugdale (1960) y fueron de utilidad para aproximar en la zona de fractura o plástica el proceso no lineal ubicado frente a una grieta existente. Después de años, con ayuda de Hillerborg (1976), se pudo obtener un uso más generalizado del modelo de fisura cohesiva, analizando la fractura de materiales cuasi-frágiles.

Este modelo representa las fuerzas de cohesión que se producen cuando los materiales se separan. Cuando esto sucede, la fuerza de tracción aumenta hasta alcanzar un valor máximo y

luego disminuye hasta cero, lo que resulta en una separación completa. Los cambios de empuje y desplazamiento se trazan en una curva llamada “empuje-desplazamiento”, donde el área bajo esta curva es la energía requerida para la separación (Gonzalez, 2014).

Figura 4 Representación del Modelo de Zona Cohesiva



Nota: Ilustración tomada de Simulación numérica de la delaminación en materiales compuestos usando esquemas cohesivos, por (Aquim, Vianello, & Castelló, 2022)

1.5.7 Delaminación de materiales compuestos

La delaminación es la forma de rotura más común en materiales compuestos laminados, y es considerado uno de los mecanismos de falla más estudiado en el campo de la investigación, ya que existe una gran cantidad de autores que han desarrollado teorías y formulaciones para caracterizarlo. Esta característica es crucial en los materiales compuestos, debido a la disminución de las propiedades mecánicas del mismo, que incluso puede llegar a un posible fallo (Martinez, Oller, & E. Barbero, 2011).

Según (LASERNA, 2017), las posibles causas de la delaminación de un material son:

- Defectos de fabricación
- Cargas cíclicas
- Cargas de impacto

Esta rotura ocurre cuando existe una falla en la región de contacto entre dos laminados, dando como resultado una redistribución de fuerzas internas debido a su separación.

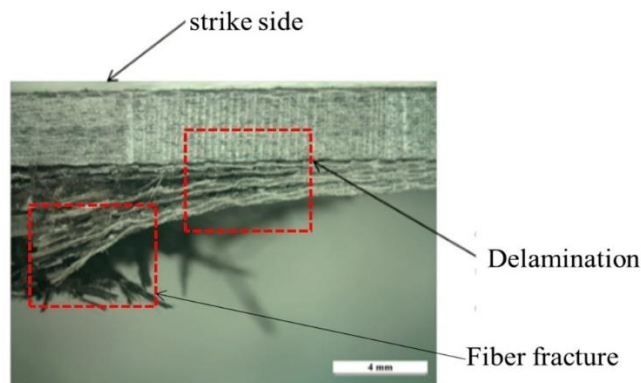
Consecuentemente, la rigidez a la flexión del laminado y la resistencia total de la junta se reducen, la integridad estructural se pierde, y conduce gradualmente a su colapso repentino que se da por debajo del nivel de carga crítica del diseño (Aquim, Vianello, & Castelló, 2022).

Existen varios tipos de delaminación, entre los principales se encuentran:

- Fractura en el adhesivo o resina
- Fractura dentro del refuerzo
- Desprendimiento (Debonding) de la resina del refuerzo

En el último caso, es el desprendimiento (debonding) lo que provoca la delaminación. (TWI, 2023).

Figura 5 Representación de la delaminación en vista transversal

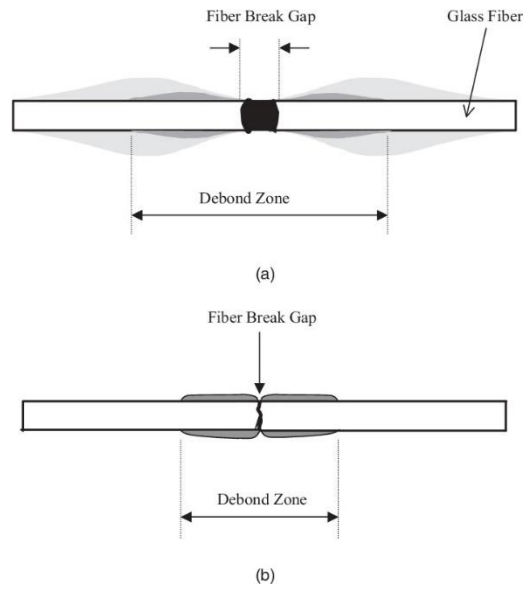


Nota: Ilustración tomada del estudio de Falla de un laminado metálico de polipropileno reforzado con fibra de vidrio sometido a una explosión a corta distancia, por (Bassiri Nia, y otros, 2020)

1.5.8 Desprendimiento o Debonding

El debonding se produce cuando un adhesivo deja de adherirse a un material adherente o sustrato. El despegado puede producirse si las fuerzas físicas, químicas o mecánicas que mantienen unida la unión se rompen, por una fuerza o un ataque ambiental (TWI, 2023).

Figura 6 Observación del fenómeno de debonding



Nota: Ilustración tomada del estudio de Observaciones de fenómenos de fractura de fibra y desunión interfacial mediante la prueba

Capítulo 2

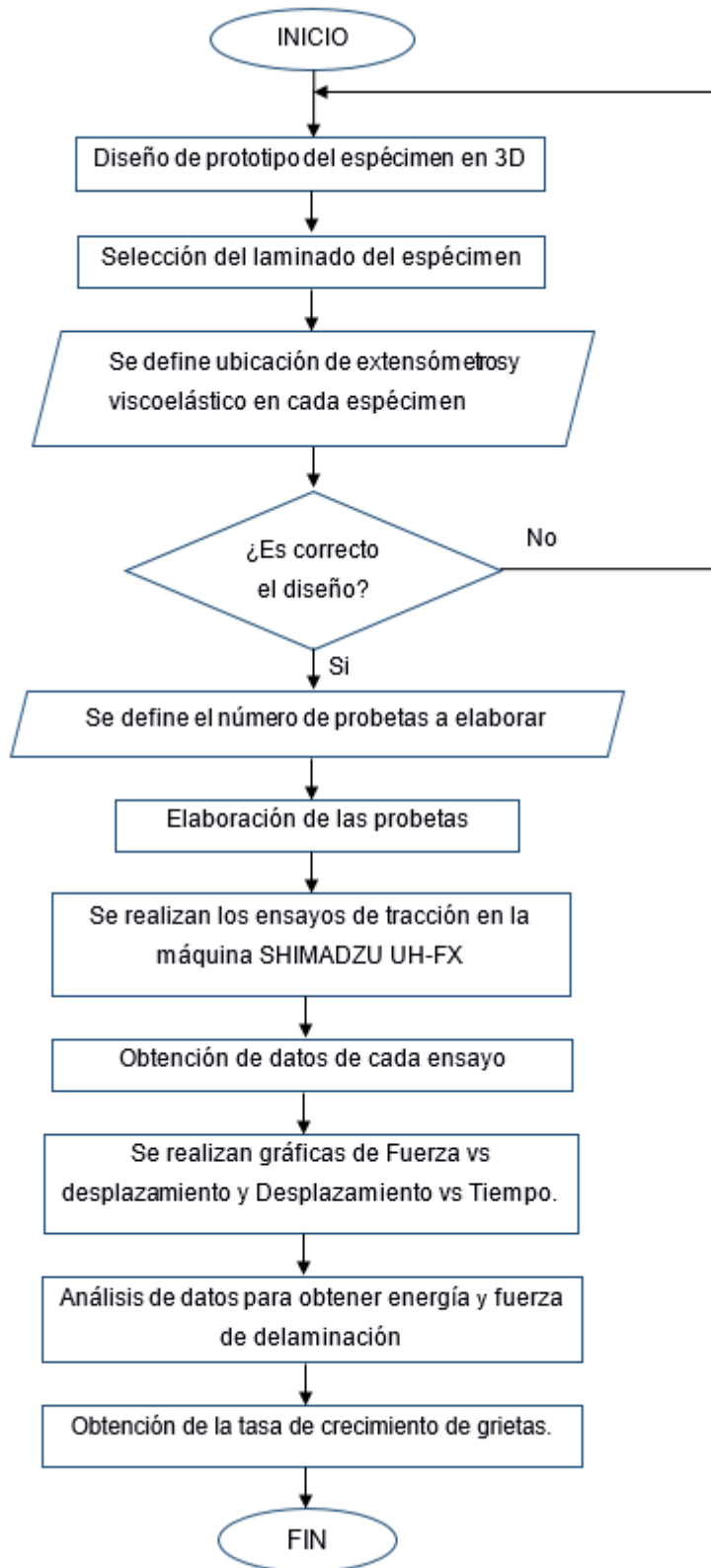
2.1 Metodología.

La metodología para este proyecto es de investigación de tipo cuantitativa. Para llevar a cabo el análisis del debonding del viscoelástico en laminados de fibra de vidrio GFRP, se diseñaron probetas que posteriormente fueron sometidas a ensayos de tensión, el cual es un ensayo que permite determinar el comportamiento de un material cuando es sometido a fuerzas de tracción. Se construyeron doce probetas de forma rectangular con cuatro capas de fibra de vidrio, de las cuales seis se modificaron viscoelásticamente y las otras seis no. Adicionalmente, se construyó una probeta sólida de sección no constante, para poder someterla a tensión hasta llegar a la rotura y estimar la capacidad de carga del material GFRP. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) en la máquina SHIMADZU UH-F500kNX, y al mismo tiempo se utilizó el equipo National Instruments - NI 9235 del Laboratorio Simar de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM).

Los ensayos realizados permitieron estudiar la capacidad de adherencia del viscoelástico, mediante la obtención de deformaciones y fuerzas de fallo, por lo tanto, con los datos recopilados en ambas máquinas se plantea realizar las gráficas de Deformación vs. Tiempo y Fuerza vs. Desplazamiento para cada probeta. La máquina SHIMADZU UH-F500kNX proporciona datos de fuerza y desplazamiento, y el equipo National Instruments - NI 9235 proporciona datos de deformación y tiempo. Con la interpretación de estos gráficos se observa el comportamiento de cada probeta, y con la ayuda de las formulaciones desarrolladas se obtiene la energía y fuerza de delaminación, para finalmente encontrar la tasa de crecimiento de grietas de laminación de cada probeta. Las variables dependientes son Fuerza [kN], Esfuerzo [Pa] y Energía [J], mientras que las independientes son Tiempo [s], Desplazamiento [mm] y Deformación [mm].

2.1.1 Flujograma

Figura 7 Flujograma que detalla la metodología



Nota. Elaboración propia

2.2 Descripción de equipos

Para llevar a cabo los ensayos de tracción a cada una de las probetas, se usaron los siguientes equipos:

2.2.1 Equipo SHIMADZU UH-X/FX Series

Es una maquina prueba universal de fácil operación que permite un control de tensión y de deformación de alta precisión, ya que cuenta con la función de muestreo de velocidad rápida permitiendo así que no se pierdan variaciones repentinas de fuerza cuando se realizan los ensayos.

De este equipo existen 3 presentaciones: 200kN, 300kN y 500kN. El laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT cuenta con el modelo de 500kN, que fue la máquina que se utilizó para desarrollar los ensayos de este proyecto, y que incluye control por desplazamiento [mm/min], Fuerza/Tiempo [KN/s] y Esfuerzo/Tiempo [MPa/min] mediante una computadora a través de un servo hidráulico.

Figura 8 Máquina SHIMADZU UH-FX



Nota. Obtenido del catálogo de equipos (SHIMADZU,2023)

2.2.2 Equipo SHIMADZU UH-X/FX Series

Este equipo se lo denomina indicador analógico, el cual tiene un diámetro de 450 mm, y se lo ubica junto al equipo SHIMADZU UH-FX para observar los pequeños cambios en la fuerza durante los diferentes ensayos.

Figura 9 Máquina SHIMADZU UH-X



Nota. Obtenido del catálogo de equipos (SHIMADZU,2023)

2.3 Descripción de los especímenes

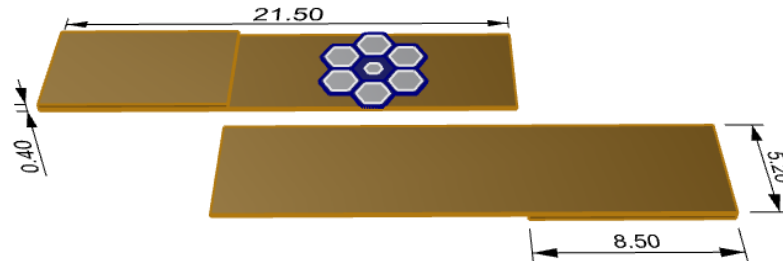
2.3.1 Diseño del espécimen

Para definir las dimensiones de los especímenes, se siguió las normas ASTM D3039. Este es un método de prueba que está diseñado para determinar las propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica esforzados con fibras de alto módulo. (ASTM INTERNATIONAL)

El bosquejo de las probetas sin modificar y modificadas viscoelásticamente se realizó en el software Rhinoceros, donde cada probeta estuvo compuesta por dos especímenes, y en el caso de la probeta modificada viscoelásticamente, el viscoelástico se colocó en la zona de unión.

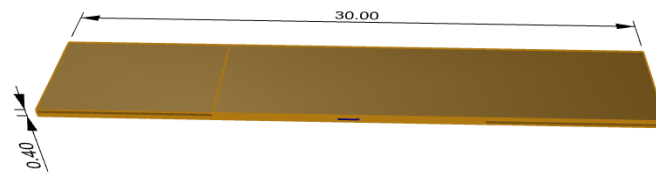
2.3.2 Dimensión del espécimen

Figura 10 Dimensiones de cada espécimen antes de la unión



Nota. Elaboración propia

Figura 11 Dimensión del espécimen final



Nota. Elaboración propia

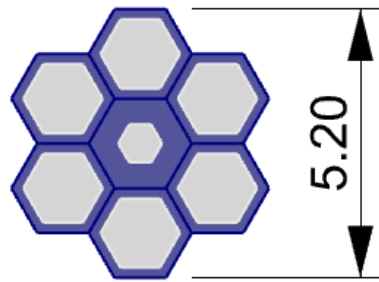
Tabla 1 Dimensiones principales del espécimen de cada ensayo

Característica	Dimensión
Longitud total del espécimen	30 cm
Ancho	5.20 cm
Espesor	0.40 cm
Material	GFRP modificado viscoelásticamente
Longitud del área de unión	13 cm

2.3.3 Dimensión del viscoelástico (2da generación)

El viscoelástico que se usó para fabricación de las probetas es de segunda generación, y está compuesto por celdas hexagonales acopladas entre sí. Cada celda viscoelástica está compuesta por acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) de 3mm y un elastómero. (Townsend D. P., 2018)

Figura 12 *Dimensión del viscoelástico*



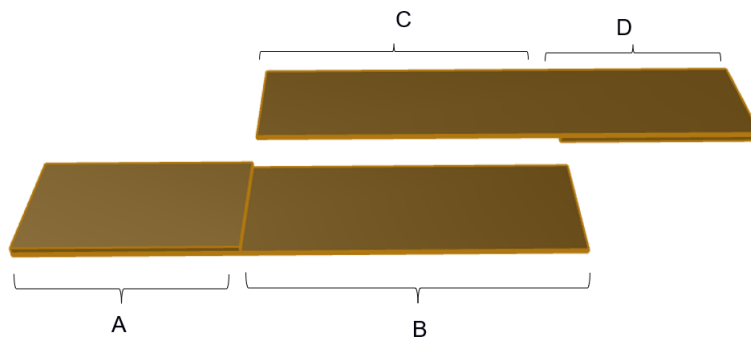
Nota. Elaboración propia

2.3.4 *Laminado del espécimen*

Para la realización de los ensayos de tracción se elaboraron 12 probetas, las cuales 6 fueron elaboradas solo de fibra de vidrio y resina, mientras que las otras 6 fueron elaboradas con fibra de vidrio, resina y el viscoelástico, que es el material estudiado. El laminado de cada probeta se detalla a continuación.

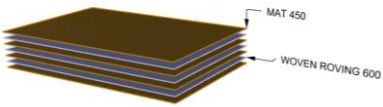
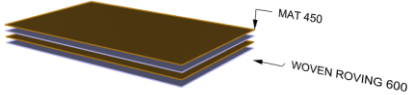
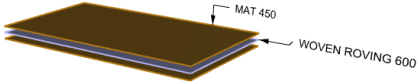
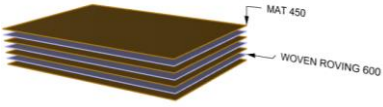
2.3.5 *Laminado del espécimen sin modificar*

Figura 13 *Espécimen sin modificar*

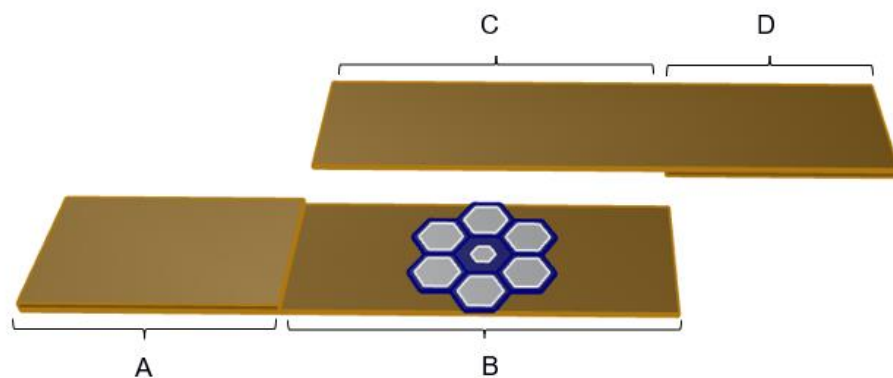


Nota. Elaboración propia

Tabla 2 Configuración del laminado del espécimen sin modificar

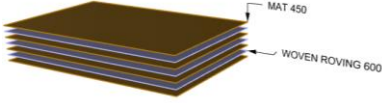
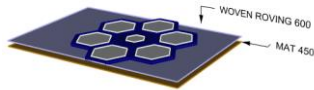
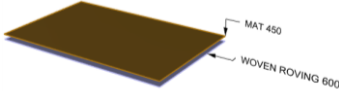
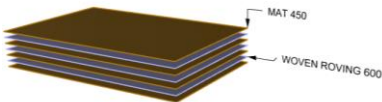
Área	Configuración del laminado	Número de capas
A		<ul style="list-style-type: none"> • 4 MAT 450 • 3 WOVEN ROVING 600
B		<ul style="list-style-type: none"> • 2 MAT 450 • 2 WOVEN ROVING 600
C		<ul style="list-style-type: none"> • 2 MAT 450 • 1 WOVEN ROVING 600
D		<ul style="list-style-type: none"> • 4 MAT 450 • 3 WOVEN ROVING 600

2.3.6 Laminado del espécimen modificado

Figura 14 Especimen modificado viscoelásticamente

Nota. Elaboración propia

Tabla 3 Configuración del laminado del espécimen modificado viscoelásticamente

Área	Configuración del laminado	Número de capas
A		<ul style="list-style-type: none"> • 4 MAT 450 • 3 WOVEN ROVING 600
B		<ul style="list-style-type: none"> • 1 MAT 450 • 1 WOVEN ROVING 600 • 1 VISCOELÁSTICO
C		<ul style="list-style-type: none"> • 1 WOVEN ROVING 600 • 1 MAT 450
D		<ul style="list-style-type: none"> • 4 MAT 450 • 3 WOVEN ROVING 600

2.4 Descripción del ensayo de tracción

Para empezar los ensayos, se diseñaron tres probetas de prueba para poder estimar una velocidad adecuada para la práctica, y la fuerza a la que iba a fallar la probeta. Una de estas probetas fue diseñada en base a la norma ASTM D638, sólida con sección variable en el centro, con el propósito de romperla para estimar la fuerza que soporta la fibra de vidrio por sí sola.

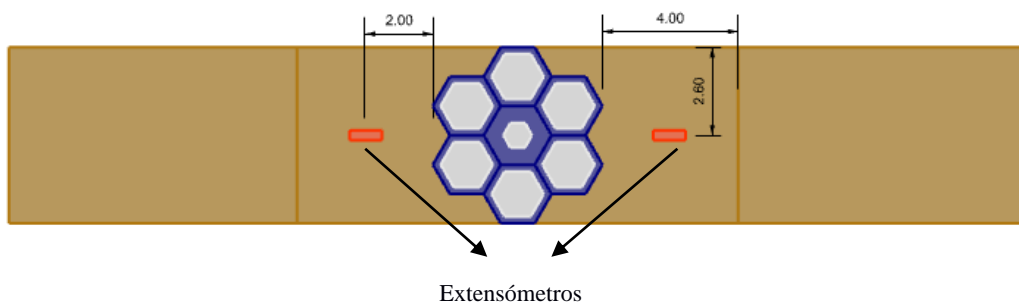
Figura 15 Probeta con sección variable

Nota. Elaboración propia

Las otras dos probetas de prueba fueron diseñadas tal cual fue descrito previamente (Sección 2.3.1), una modificada viscoelásticamente y la otra no, con la diferencia de que la zona cohesiva tenía de longitud el tamaño del viscoelástico, y las probetas definitivas tenían un espacio de 4 cm arriba y abajo del viscoelástico en esta zona. En cada una de estas probetas se utilizó una velocidad distinta para determinar la adecuada para el ensayo: 5, 1 y 0.5 mm/min. Con estas pruebas, se determinó que se harían los ensayos a 1 mm/min, debido a la cantidad de datos que se podían obtener y la duración de cada ensayo.

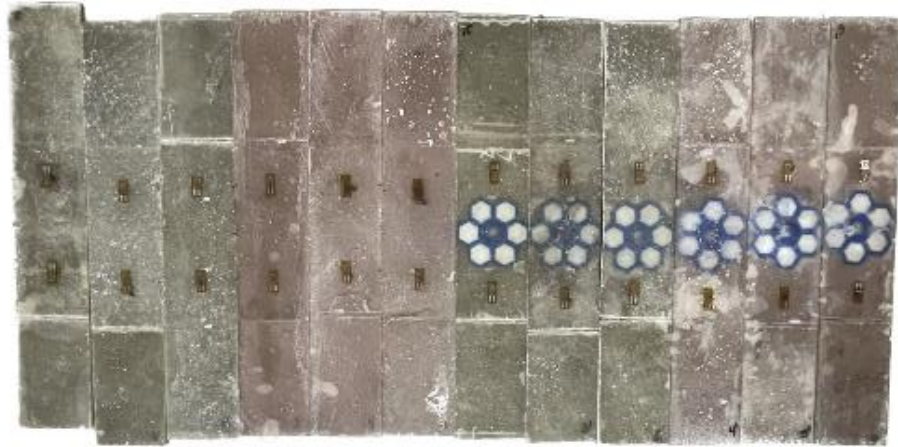
Para las probetas definitivas, se pegaron en cada una de ellas, dos extensómetros EA-13-250BB-120 en dirección axial para poder obtener las deformaciones con ayuda del equipo National Instruments - NI 9235. Para lograr esto, en cada probeta se tomó en cuenta la distancia desde el viscoelástico hasta la unión, tanto en la parte superior como inferior y también el ancho, para ubicar el extensómetro justo en el centro de ese espacio. Una vez ubicados los extensómetros o galgas extensométricas, se soldaron cables de 2 metros en cada uno, para que no existiera problema con la toma de datos durante los ensayos de tracción, ya que estos cables estaban conectados desde cada extensómetro hasta el equipo NI 9235.

Figura 16 *Ubicación de extensómetros*



Nota. Elaboración propia

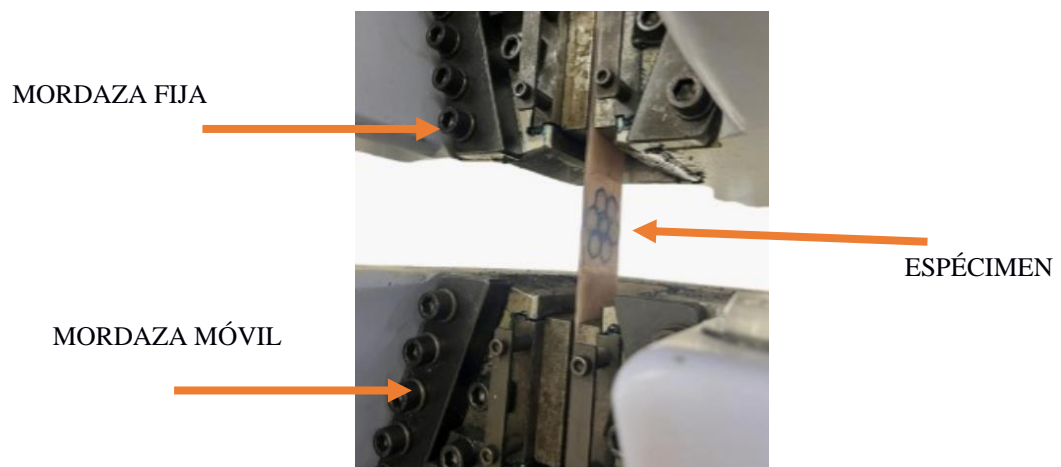
Figura 17 *Probetas listas para realizar los ensayos de tracción*



Nota. Elaboración propia

Finalmente, para cada probeta, se tomó en cuenta la posición para ser ubicada en las mordazas de la máquina, de tal manera que no toquen la unión. Luego, se ubicaron los cables en el equipo NI 9235 conectado al CPU y monitor del Laboratorio Simar de la FIMCM para tomar los datos en el programa “National Instruments”. Se configuró en la máquina la velocidad y el tipo de ensayo para empezar, y a su vez se comenzó a tomar datos. Se repitió el proceso con cada probeta, y se registraron los datos necesarios para la obtención de resultados. Adicional a esto, se grabó un video para observar el momento exacto del fallo y en qué zona de la probeta se dio.

Figura 18 *Ensayo de tracción*

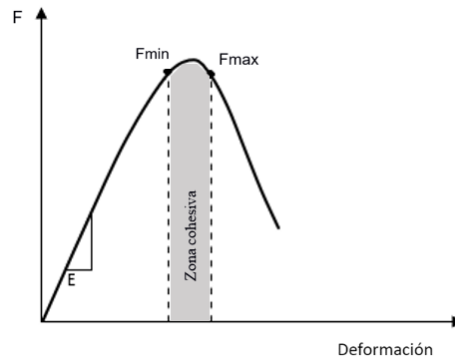


Nota. Elaboración propia

2.4.1 Obtención de datos

De los ensayos realizados se obtuvieron datos que describen como varía la fuerza a medida que la deformación aumenta en un determinado tiempo, lo que permite esperar una gráfica de Fuerza vs deformación como se muestra:

Figura 19 Fuerza vs deformación



Nota. Elaboración propia

2.5 Cálculos desarrollados

La zona de estudio para este proyecto es la zona cohesiva como se observa en la figura 19, que es la zona donde se espera que suceda el efecto del debonding. La carga mínima (F_{min}) sucede cuando ya se empieza a observar un movimiento relativo y la carga máxima (F_{max}) es donde se espera que las capas de las probetas se separen.

La información obtenida en este trabajo es un nuevo sistema de fabricación, de la cual no existen todavía datos para realizar una comparación. Sin embargo, el análisis de resultados se va a desarrollar mediante el estudio de las relaciones de energía que produce la innovación viscoelástica en el material. Para esto, se necesitó conocer el valor de carga normalizada (F_n), que se lo obtuvo de la siguiente expresión:

$$F_{n_{min}} = \frac{F_{min}}{F_u} : \text{límite inferior de la carga de fatiga} \quad (2.1)$$

$$F_{n_{max}} = \frac{F_{max}}{F_u} : \text{límite superior de la carga de fatiga} \quad (2.2)$$

Donde F_u es la capacidad de carga del material obtenida a partir de ensayos estáticos, en este caso es la capacidad de carga obtenida en el ensayo de tracción realizada a la probeta sólida de sección variable.

Luego se obtienen los niveles de carga normalizadas del ensayo:

$$\Delta F_n = \frac{F_{n_{max}} - F_{n_{min}}}{2} \quad (2.3)$$

$$\bar{F}_n = \frac{F_{n_{max}} + F_{n_{min}}}{2} \quad (2.4)$$

Para estimar la tasa de crecimiento de la grieta con el fin de registrar la evolución del daño, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{d\xi}{dN} = h(\Delta S)^j \quad (2.5)$$

Donde:

$\xi =$ largo del debonding en una frecuencia o tiempo

h, j son coeficiente que se obtienen del experimento mediante regresión lineal

$\Delta S =$ rango del esfuerzo de tensión

El rango del esfuerzo de tensión ΔS se lo obtiene de la una relación entre la fuerza y el área donde se encuentra el viscoelástico:

$$\Delta S_1 = \frac{F_{min} + 1}{xz} - \frac{F_{min}}{xz} \quad (2.6)$$

$$\Delta S_2 = \frac{F_{min} + 2}{xz} - \frac{F_{min}}{xz} \quad (2.7)$$

⋮

$$\Delta S_N = \frac{F_{max}}{xz} - \frac{F_{min}}{xz} \quad (2.8)$$

Donde:

$x =$ ancho de la probeta en la zona donde se encuentra el viscoelástico

$z =$ espesor de la probeta en la zona donde se encuentra el viscoelástico

El análisis de datos se hará mediante análisis de laboratorio matemático para obtener la fuerza de delaminación, con la finalidad de obtener la tasa de crecimiento de grietas de laminación

$$\frac{d\xi}{dN}$$

Se obtuvo la relación de esfuerzos R, mediante la relación del esfuerzo de cada probeta y el esfuerzo de la probeta de sección variable. Para obtener los esfuerzos de cada probeta, se tomó la fuerza de despegue y se dividió por su área correspondiente, en el caso de las probetas modificadas y no modificadas, el área es constante. Esta relación R debe ser un número inferior a 1 para determinar la fuerza de despegue del material.

$$R = \frac{\sigma_{debonding}}{\sigma_{ultime}} < 1 \quad (2.9)$$

Por último, se obtuvo la razón de fallo, mediante la siguiente ecuación

$$\varphi = \frac{(F_D - F_{MCR})}{\Delta T} \quad (2.10)$$

Donde:

$F_D =$ Fuerza del debonding

$F_{MCR} =$ Fuerza máxima de propagación de grietas por fatiga

$\Delta T =$ Intervalo de tiempo en el que ocurre el fallo

Capítulo 3

2.6 Resultados y análisis

En esta sección se plasman los resultados que fueron obtenidos de las reproducciones de laboratorio descritas en el capítulo 2. Los ensayos de tensión realizados en el Laboratorio de Geotecnia arrojaron resultados numéricos de fuerza y desplazamiento para cada probeta, los cuales permitieron obtener las gráficas de Fuerza vs. Desplazamiento. Por otra parte, aplicando la formulación descrita previamente en la metodología, se pudo calcular la tasa de crecimiento de grietas para cada probeta ensayada, y adicionalmente, se calculó la relación de esfuerzos y la razón de fallo.

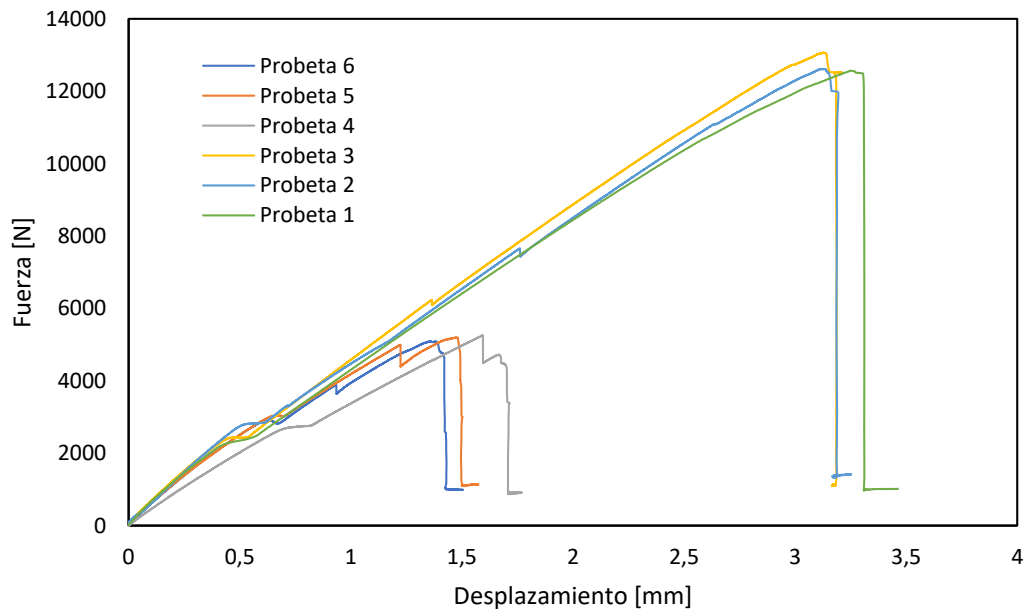
2.7 Resultados del ensayo de tracción

El ensayo de tracción fue la reproducción de laboratorio realizada para analizar el comportamiento de las probetas de fibra de vidrio bajo una fuerza axial de tensión y encontrar la fuerza del debonding. En la figura 30 de anexos se puede observar el estado de las probetas luego de realizar los ensayos.

2.7.1 Fuerza vs. Desplazamiento

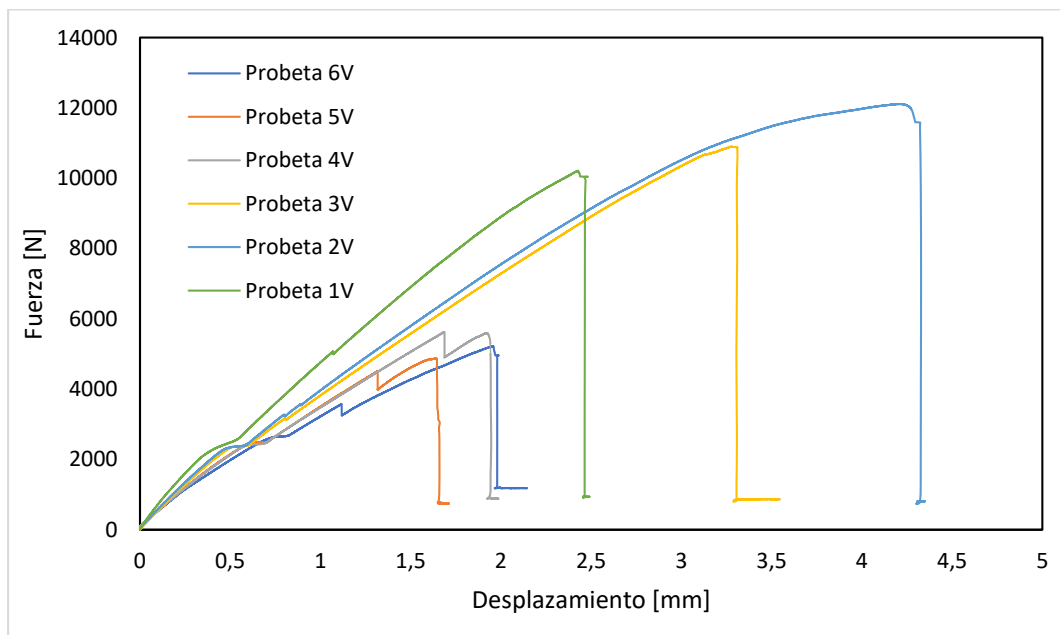
A continuación, se observa la gráfica fuerza vs. desplazamiento obtenida de los ensayos de tracción realizados en la máquina SHIMADZU UH-F500kNX a las probetas de fibra de vidrio sin modificar y modificadas viscoelásticamente. Con estas gráficas fue posible obtener la fuerza máxima que soporta el material (fuerza del debonding).

Figura 20 Curvas de fuerzas vs desplazamiento para las probetas sin modificar



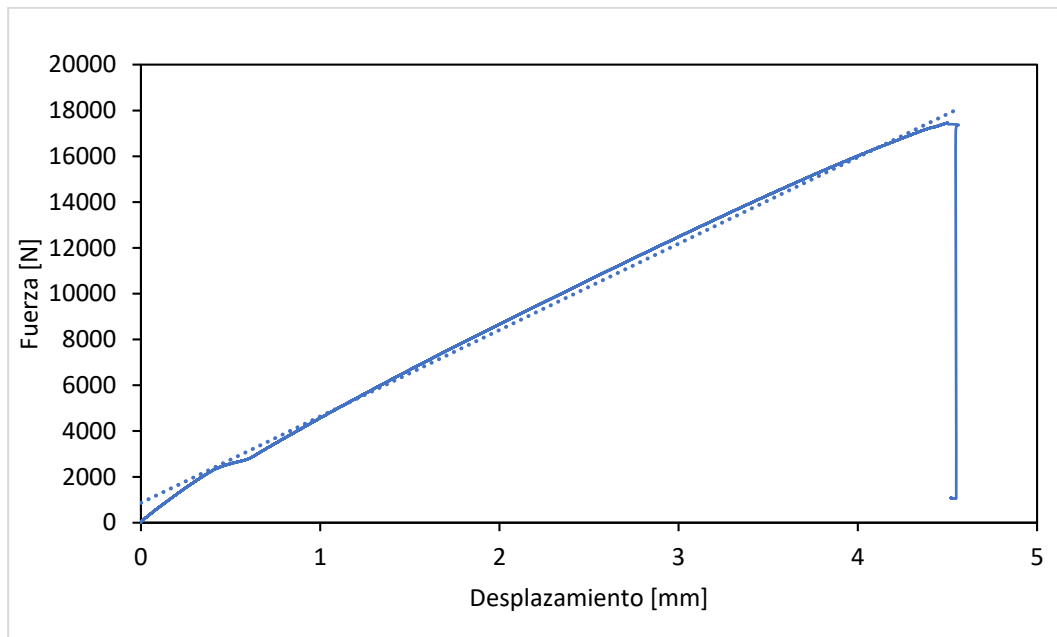
Nota. Las curvas muestran la fuerza que soporta cada probeta sin modificar durante los ensayos.

Figura 21 Curvas de fuerzas vs desplazamiento para las probetas modificadas viscoelásticamente



Nota. Las curvas muestran la fuerza que soporta cada probeta modificada viscoelásticamente durante los ensayos.

Figura 22 Curvas de fuerza vs desplazamiento para probeta de sección variable



Nota. Las curvas muestran la fuerza que soporta la probeta de sección variable durante el ensayo de tracción.

El propósito de los gráficos previamente expuestos fue determinar la fuerza máxima que soporta el material antes de despegarse o fallar. Tanto en las probetas modificadas como las sin modificar, se observa que la fuerza y el desplazamiento son directamente proporcionales linealmente, hasta que las curvas llegan a un quiebre, que es donde se produce un sutil despegue sin separar el espécimen, y continúa con el incremento hasta llegar a un punto máximo, donde la fuerza cae y se vuelve cero. Este punto, siendo el más alto de la curva, es el punto donde se produce la fuerza del debonding, de la que se hablará más adelante.

En el punto donde se provoca la fuerza del debonding, es importante destacar que la probeta se separa, pero también llega a romperse. En todos los casos de las 12 probetas, ésta se rompe en el punto donde se produce la separación, lo cual indica que el material en ese punto se encontraba más debilitado y vulnerable a un fallo.

El punto donde se generó la separación en cada probeta fue en el punto de unión de ambas partes del espécimen. Esto se pudo interpretar como que el despegue se va a dar en los puntos de unión de la embarcación, más no en el viscoelástico.

2.7.2 Desplazamiento vs. Tiempo

A continuación, se observa la gráfica obtenida de los extensómetros en los ensayos de tracción a las probetas de fibra de vidrio sin modificar y modificadas viscoelásticamente. Estos datos fueron proporcionados por la máquina National Instruments - NI 9235, donde se obtuvo las deformaciones de cada probeta en dos puntos y de forma axial. Esto permitió visualizar la tendencia de deformación que tienen las probetas al alargarse mediante el ensayo de tracción, mediante los extensómetros y cables adheridos a cada probeta que se conectaban con la máquina.

Figura 23 Curvas de desplazamiento vs tiempo para las probetas sin modificar

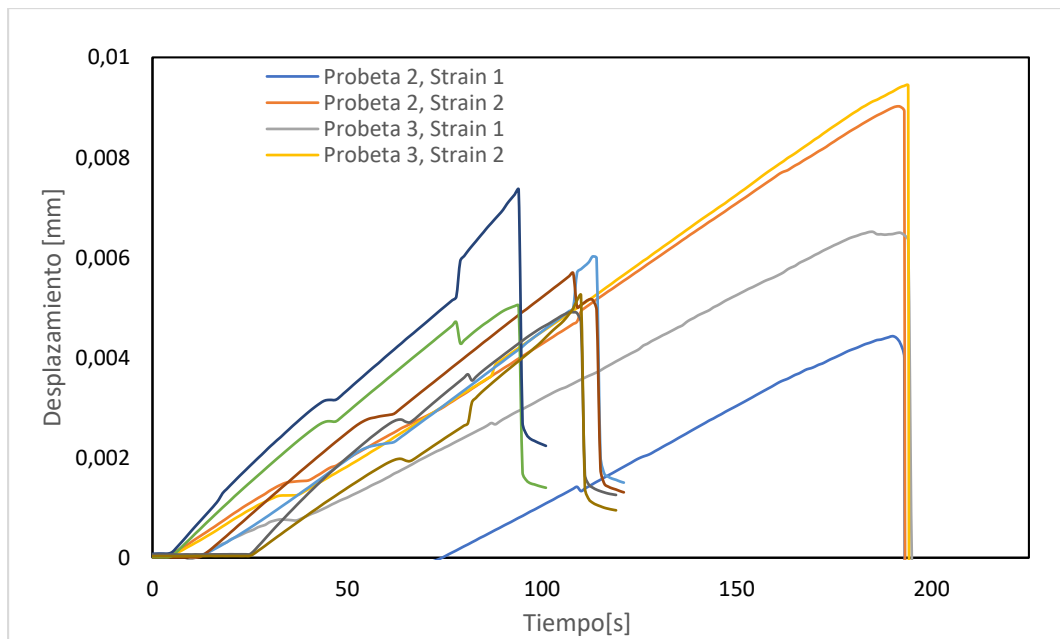
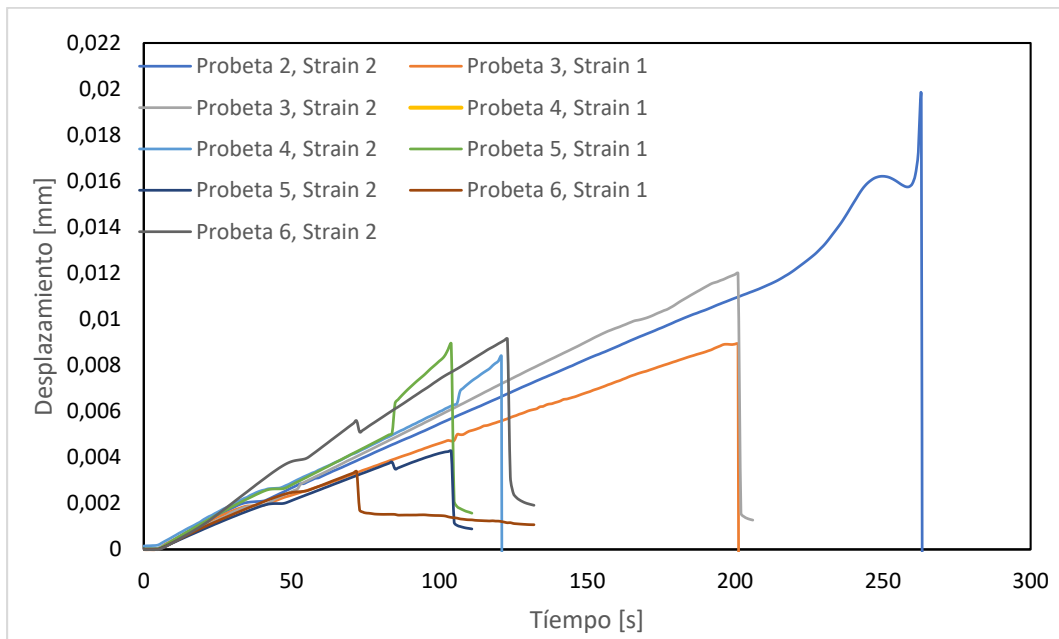


Figura 24 Curvas de desplazamiento vs tiempo para probetas modificadas viscoelásticamente



2.7.3 Tasa de crecimiento de grietas

A continuación, se presenta la tasa de evolución de las grietas de las probetas sin modificar y la tasa de grietas de los ensayos realizados a las probetas que se les incluyó la lámina viscoelástica para de esta manera mejorar el daño destructivo por slamming.

Figura 25 Tasa de crecimiento de grietas en probetas sin modificar

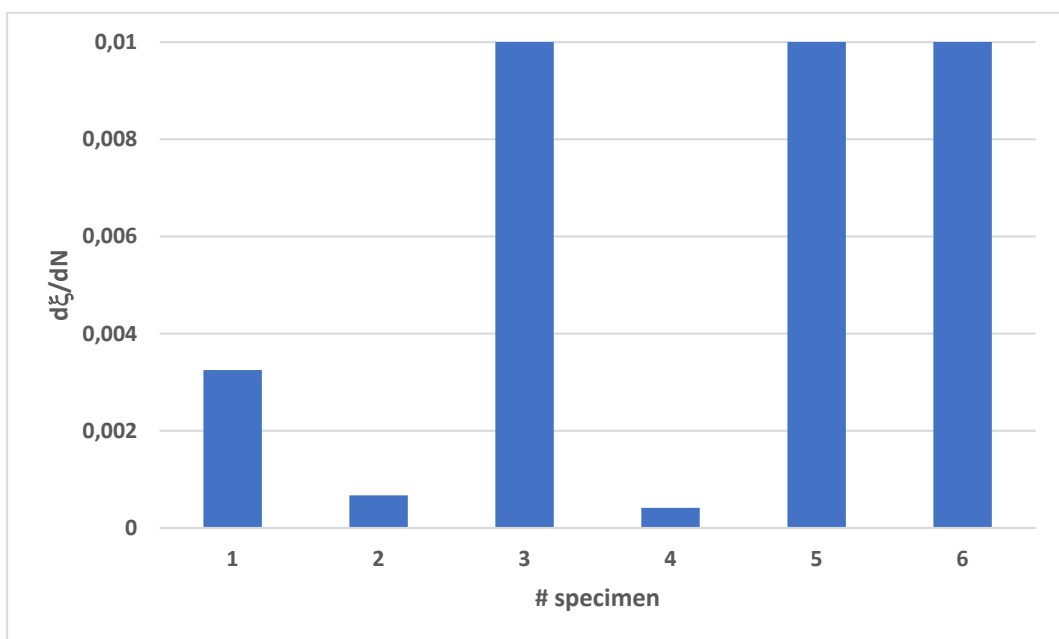
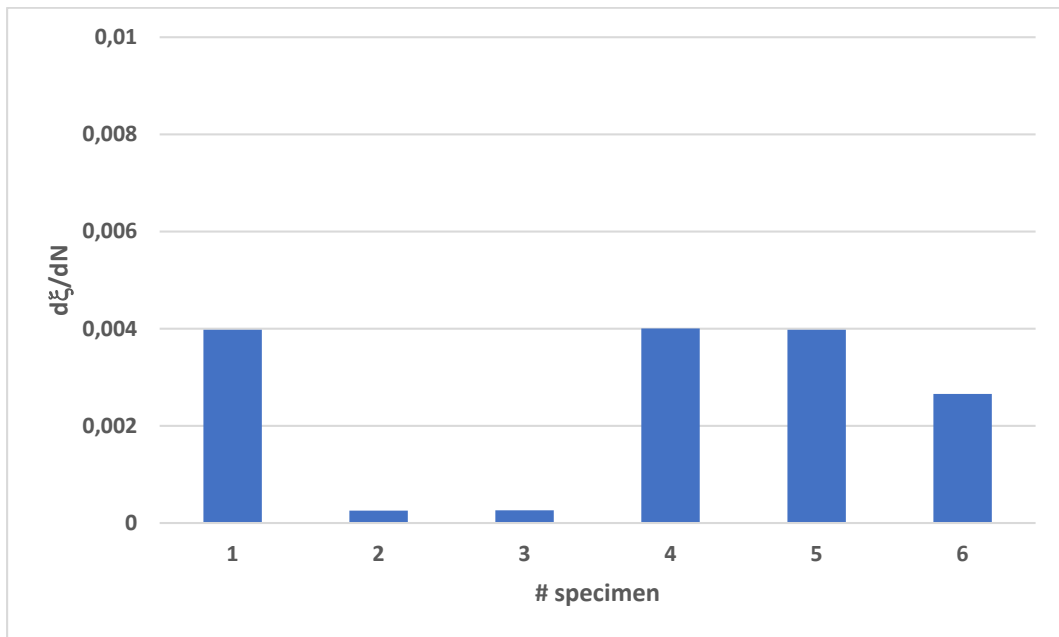


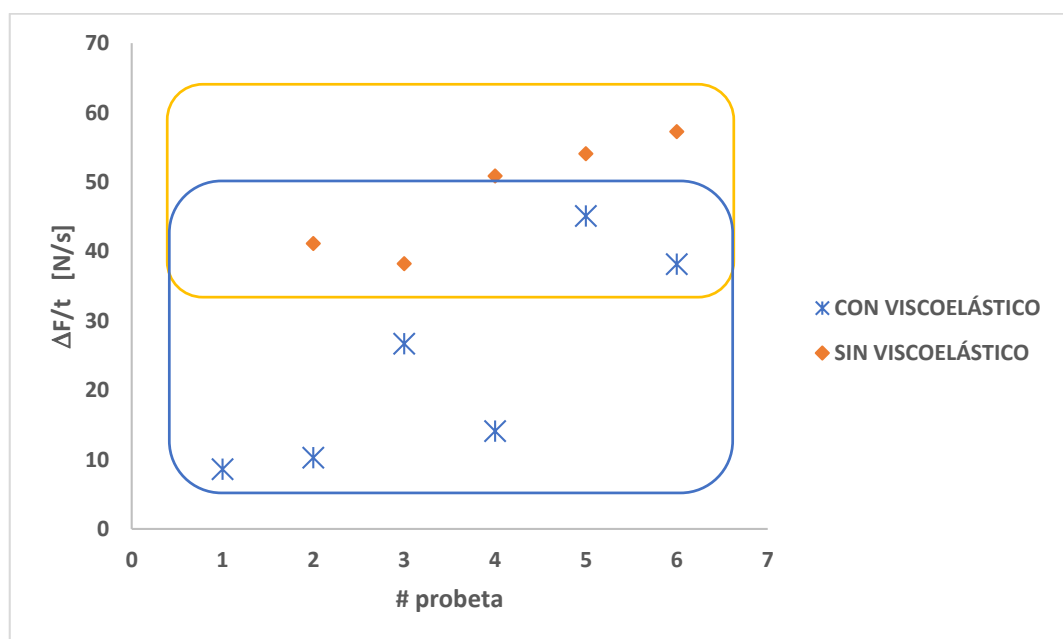
Figura 26 Tasa de crecimiento de grietas en probetas modificadas viscoelásticamente



2.7.4 Razón de fallo

A continuación, se presenta gráficamente la razón de fallo de las probetas sin modificar y modificadas viscoelásticamente, de manera que nos permita evaluar la fuerza máxima que produce la separación de la capa viscoelástica.

Figura 27 Razón de fallo de las probetas modificadas con viscoelástico y sin modificar



2.8 Análisis de resultados

2.8.1 *Fuerza del Debonding*

En las figuras 20 y 21 de Fuerza vs. Desplazamiento, se pudo observar la fuerza máxima que soportó cada probeta en el ensayo de tensión. Esta fuerza máxima, es considerada la fuerza del debonding para este proyecto, debido a que es la fuerza donde el material llega al fallo después de separarse. El debonding comienza en el momento en que la probeta comienza a separarse, y la fuerza del debonding se da al romperse.

Lo más destacado visualmente durante el experimento, fue el modo de fallo, dado que hablamos de un modo 2 de fallo, en las probetas modificadas viscoelásticamente, la rotura fue seca. Por otro lado, en las probetas sin modificar, se observó más bien una delaminación de la fibra, donde después del fallo aún quedaban unidos ciertos hilos de ambas partes de la probeta, sin llegar a separarse del todo. Se pudo notar que, la probeta con viscoelástico se parte debido a que la unión con el viscoelástico es tan fuerte que no puede llegar a separarse, por lo que la unión donde ocurre el despegue se rompe instantáneamente.

2.8.2 *Tasa de crecimiento de grietas*

En la figura 25 se presenta mediante un diagrama de barras la tasa de evolución de las grietas de los paneles sin modificar y en la figura 26 se presenta la tasa de grietas de los ensayos realizados a las probetas modificadas viscoelásticamente para reducir el daño destructivo por slamming, debido a los impactos de slamming que fueron producidos en los ensayos.

Se observa una diferencia en la evolución de las grietas debido a las horas de fabricación de las probetas, ya que variaron las condiciones ambientales durante su elaboración. Las grietas se dieron en mayor cantidad con las probetas adheridas con la matriz, mientras que las probetas modificadas con el material viscoelástico experimentaron durante la reproducción de los ensayos una mejor adherencia de las capas.

2.8.3 Relación de esfuerzos (Strength ratio)

Uno de los criterios para medir la falla del viscoelástico, y poder decidir si va a ser instalado en las embarcaciones de alta velocidad elaborados de fibra de vidrio es comparar la falla del material común al efecto de la cizalla con la fuerza de cortante o fuerza de debonding que la delamina. Por esta razón se obtiene la razón R que se lo obtiene mediante la ecuación (2.9).

Para obtener esta relación se calculó el área del viscoelástico en las probetas y también el área de la probeta de sección variable. Para obtener los esfuerzos de cada probeta, se tomó la fuerza del debonding y se la dividió para su correspondiente área, en el caso de las probetas modificadas y sin modificar, el área es constante.

Tabla 4 Relación de esfuerzos de las probetas sin modificar y modificadas viscoelásticamente

Modificada		Sin modificar	
Probeta	R	Probeta	R
1V	0,39	1	0,48
2V	0,47	2	0,49
3V	0,42	3	0,50
4V	0,22	4	0,20
5V	0,19	5	0,19
6V	0,20	6	0,20

En la tabla 4 se puede observar que efectivamente la razón R es menor a 1, y que en los paneles modificados es mucho menor la razón de aspecto, por lo tanto, el material viscoelástico tiene un factor de seguridad mucho mayor que el material GFRP.

2.8.4 Razón de fallo

Uno de los más importantes análisis que deben realizarse para evaluar la fuerza máxima que produce la separación de la capa viscoelástica, es la diferencia entre la fuerza próxima a la separación de las capas o delaminación final con la fuerza que efectivamente separa el laminado, en función del tiempo porque esto permite evaluar la cizalla y cómo se han fabricado las probetas para poder determinar una relación con la deformación producida por los impactos de slamming

que producen fuerzas axiales en el laminado de los planning hull vessel. Para obtener esta razón se consideró la siguiente ecuación (2.10).

Donde φ , es la razón de fuerza en el estado máximo del debonding, relaciona la fuerza del debonding con la fuerza cuando se puede medir la mayor evolución de relación de grietas, sobre el intervalo de tiempo en el cual ocurre. Los resultados muestran que esta relación es menor para el panel modificado viscoelásticamente, ya que en los ensayos muestra una mayor resistencia a las fuerzas internas antes mencionadas que actúan durante su deformación.

Capítulo 4

3.1 Conclusiones y recomendaciones

A lo largo de los años, y después de tantos trabajos de investigación de materiales compuestos, el uso de la fibra de vidrio en la industria marina continúa siendo un incentivo de innovación para lograr utilizar el recurso GFRP de forma que beneficie al rendimiento de las embarcaciones, pero sobre todo al bolsillo del cliente. Dado que el material tiende a delaminarse por naturaleza del golpeteo al fondo del barco, ocasionado por el slamming, se requieren estudios nuevos para utilizar estos materiales de una forma más eficiente.

Este trabajo de experimentación e investigación fue de gran utilidad para tener una idea de cómo el material se va a comportar durante el fenómeno del slamming en este tipo de embarcaciones. Los ensayos de tensión en las probetas modificadas y sin modificar, permitieron analizar el comportamiento de la fibra cuando es modificada con el viscoelástico, demostrando que este material modificado soporta una fuerza mayor que la del slamming. También se pudo notar que, al ser un trabajo netamente experimental, se obtuvieron resultados redundantes, los cuales indican que se pueden tener variaciones durante el proceso de fabricación debido a factores ambientales, medidas alteradas, espesores variados, etc., lo que provoca incertidumbres en los resultados.

Finalmente, con la información recolectada se pudo analizar el debonding del viscoelástico, a partir de tres criterios importantes en materiales compuestos. Este análisis sirve de ayuda para evaluar el debonding con otro tipo de pruebas, con ayuda de maquinaria más avanzada que lo permita, y así poder ir completando la ficha técnica del material.

3.2 Conclusiones

- El material viscoelástico tiene un factor de seguridad mayor que el material GFRP, por lo cual para su instalación en las lanchas planeadoras beneficiará al laminado. La energía superficial de los materiales empleados en la lámina modificada permite una mejor adherencia y disminuye la delaminación del compuesto instalado.

- El viscoelástico tiene una resistencia mayor cuando va a fallar. Esto indica que durante los picos de slamming que deforman en forma de curvatura o flexión, el casco de las lanchas construidas de GFRP tiene una mayor resistencia a la delaminación. Por ende, se considera con este resultado, adicionado a las anteriores investigaciones, que el viscoelástico se encuentra listo para ser empleado en la construcción de embarcaciones de este tipo.
- Las grietas se dieron en mayor cantidad con las probetas adheridas con la matriz, mientras que, en las probetas adheridas con el viscoelástico, se experimentó una mejor adherencia de las capas durante la reproducción de los ensayos. Esto suma en los resultados experimentales a las bondades que se pueden obtener con su instalación en los cascos de GFRP, para prevenir los daños destructivos del fenómeno de slamming.

3.3 Recomendaciones

- Realizar los ensayos experimentales en equipos más avanzados tecnológicamente, de manera que, permita realizar otros tipos de ensayos del material para analizar el debonding en direcciones distintas, como el modo I y III. Esto permitiría obtener una comparación del comportamiento del viscoelástico bajo diferentes pruebas de fallo.
- Realizar pruebas de tensión en más probetas, donde entre ellas, exista variación en el laminado de las capas de fibra. Esto permitiría comparar la capacidad de adherencia con diferentes laminados, y determinar cuál sería el laminado más indicado para instalar el viscoelástico.
- En los picos del slamming, en una gráfica de Presión vs. Tiempo, se puede calcular con esa presión y con un modelo de elementos finitos, la fuerza que está actuando sobre ese material compuesto conociendo el tiempo de fallo.

Referencias

- A, H., M., M., & Petersson, a. (1976). Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Meands of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782.
- ABS. (2021). *Slamming Loads And Strength Assessment For*. New York: American Bureau of Shipping.
- Alonso, C. P. (2016). *Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval*. Barcelona: Universidad Politecnica de Calalunya.
- Alvarez, G. E. (2004). *Estudio De La Retracción Y El Agrietamiento De Arcillas*. Barcelona: Universidad Politecnica De Catalunya. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6233/07Gaa07de11.pdf>
- Aquim, E., Vianello, M. A., & Castelló, W. B. (Diciembre de 2022). Simulación numérica de la delaminación en materiales compuestos usando esquemas cohesivos. *Revista Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 9(2).
- ASTM INTERNATIONAL. (s.f.). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- Barenblatt, G. (1962). The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture.”. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 100-104.
- Bassiri Nia, A., Xin, L., Yahya, M., Ayob, A., Farokhi Nejad, A., Rahimian Koloor, S., & Petru, M. (2020). Failure of Glass Fibre-Reinforced Polypropylene Metal Laminate Subjected to Close-Range Explosion. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/polym12092139>
- Benameur, B. H. (1995). *Dynamic Response Of Hull Due*. ProQuest LLC.
- Besednjak, 2. A. (2005). *Materiales compuestos Procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC.

- D.S., D. (1960). Yielding in Steel Sheets Containing Slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100-104.
- Dr. S. Selvaraju, S. I. (2011). Applications of composites in marine industry. *Journal of Engineering Research and Studies*, II, 89-91.
- Fernández, R. P. (14 de Septiembre de 2021). Construcción Naval: innovación y sostenibilidad. *MAPFRE Global Risks*, pág. 1. Obtenido de <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/construccion-naval-innovacion-y-sostenibilidad/>
- Gonzalez, S. B. (2014). *Desarrollo Y Aplicacion De Un Modelo De Fisura Cohesiva En El Método De Los Elementos Finitos*. Universidad De Oviedo. Universidad de Oviedo.
- J.C. Suárez, I. D. (2003). *Evolución Del Daño En Materiales Compuestos Por Efecto Del Slamming En Embarcaciones Rápidas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <https://gef.es/images/publicaciones/20/GEF019.pdf>
- Kim, B. W., & Nairn, J. (2022). Observations of Fiber Fracture and Interfacial Debonding Phenomena Using the Fragmentation Test in Single Fiber Composites. *Journal of Composite Materials*, 36, 1825-1858.
- LASERNA, M. J. (2017). *Delaminación De Un Compuesto De Fibra De Vidrio Sometido A Cargas Cuasiestáticas Y A Fatiga Por Impacto En Modo I De Carga*. Bogota: Universidad de los Andes.
- Martinez, X., Oller, S., & E. Barbero. (2011). Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(3), 189-199. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131511000022>
- Recuero, A., & Gutiérrez, J. P. (1997). Refuerzo De Estructuras Con Composites Avanzados. *Informes de la construcción*, 49. Obtenido de

[https://digital.csic.es/bitstream/10261/87414/1/Informes%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2049\(452\)%2039-50%20\(1997\).pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/87414/1/Informes%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2049(452)%2039-50%20(1997).pdf)

REYES, J. G. (2018). *Estudio Técnico Para Industrializar Lanchas De Fibra De Vidrio*. La Libertad: Universidad Estatal Peninsula de Santa Elena.

Smith, W. F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, 4th Edition*. Mexico: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.

Townsend, D. P. (2018). *Comportamiento A Impacto De Materiales Compuestos Sometidos A Fenómenos De Slamming En Embarcaciones De Alta Velocidad*. . Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Townsend, P. (12 de Octubre de 2018). Un politecnico es cum laude en Madrid. *Expreso*. Obtenido de <https://www.pressreader.com/ecuador/diario-expreso/20181012/281925953974260>

TWI, L. (2023). *TWI Ltd*. Obtenido de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-difference-between-debonding-and-delamination-in-adhesive-joints-coatings-and-composites-and-other-defects-found#:~:text=Debonding%20occurs%20if%20the%20physical,layers%20of%20reinforce>
eme

Apéndices

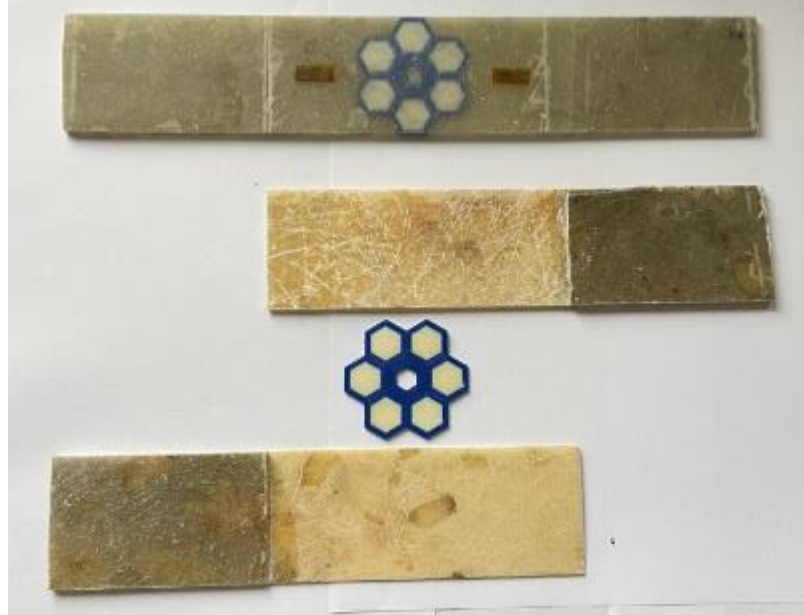
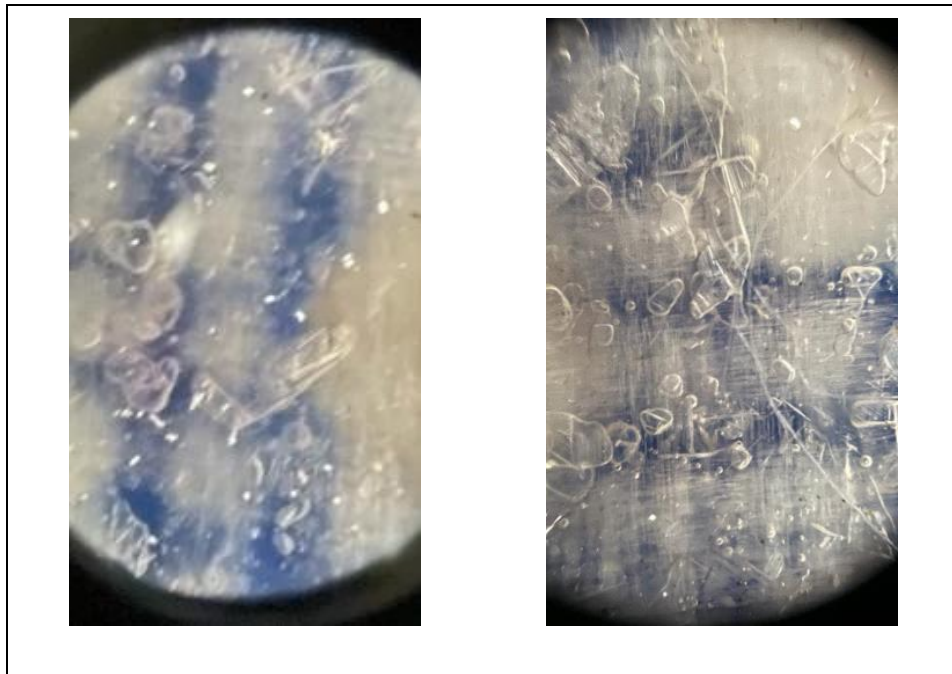
Figura 28 *Proceso de fabricación de las probetas***Figura 29** *Fotos de microscopía óptica del espécimen tomadas con un aumento de x150*

Figura 30 *Probetas luego del ensayo de tracción*

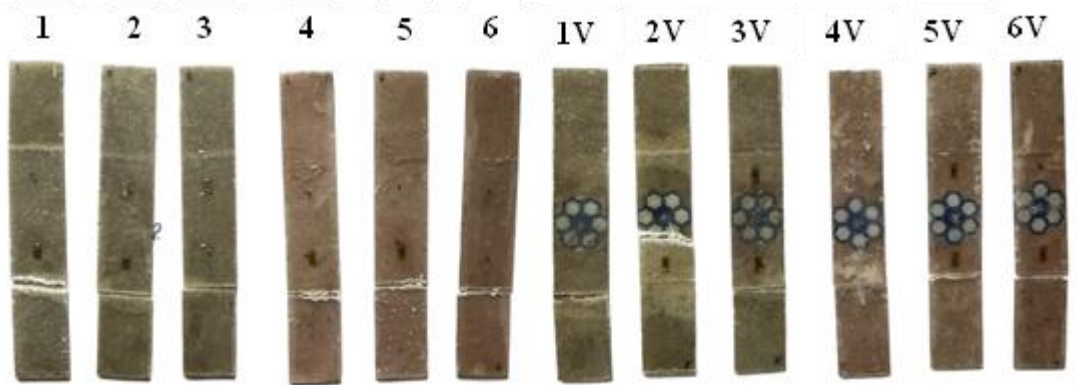


Tabla 5 Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 1, 2 y 3

PROBETA 1			PROBETA 2			PROBETA 3		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
sec	N	mm	sec	N	mm	sec	N	mm
0,00	15,89	0,00	0,00	89,49	0,00	0,00	45,06	0,00
0,01	15,26	0,00	0,01	90,44	0,00	0,01	45,38	0,00
0,02	14,46	0,00	0,02	91,47	0,00	0,02	45,86	0,00
0,03	14,23	0,00	0,03	92,11	0,00	0,03	45,62	0,00
0,04	14,94	0,00	0,04	92,03	0,00	0,04	44,90	0,00
0,05	15,66	0,00	0,05	91,39	0,00	0,05	44,11	0,00
0,06	15,50	0,00	0,06	90,20	0,00	0,06	43,87	0,00
0,07	14,54	0,00	0,07	88,85	0,00	0,07	44,50	0,00
0,08	13,51	0,00	0,08	87,82	0,00	0,08	44,98	0,00
0,09	12,95	0,00	0,09	87,58	0,00	0,09	44,27	0,00
0,10	13,11	0,00	0,10	87,90	0,00	0,10	42,92	0,00
0,11	13,51	0,00	0,11	88,29	0,00	0,11	42,28	0,00
0,12	14,07	0,00	0,12	88,85	0,00	0,12	42,84	0,00
0,13	14,46	0,00	0,13	89,80	0,00	0,13	43,39	0,00
0,14	15,10	0,00	0,14	90,60	0,00	0,14	43,71	0,00
0,15	16,13	0,00	0,15	90,44	0,00	0,15	44,11	0,00
0,16	17,25	0,00	0,16	88,77	0,00	0,16	44,98	0,00
0,17	17,96	0,00	0,17	86,47	0,00	0,17	45,54	0,00
0,18	17,72	0,00	0,18	85,19	0,00	0,18	45,62	0,00
0,19	16,77	0,00	0,19	85,83	0,00	0,19	45,22	0,00
0,20	15,97	0,00	0,20	87,34	0,00	0,20	44,58	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0,60	128,11	0,02	196,27	1410,01	3,25	192,13	1128,20	3,18
0,61	131,77	0,02	196,28	1408,42	3,25	192,14	1127,24	3,18
0,62	135,18	0,02	196,29	1408,10	3,25	192,15	1127,24	3,18
0,63	138,60	0,02	196,30	1408,82	3,25	192,16	1127,80	3,18
0,64	142,26	0,02	196,31	1409,77	3,25	192,17	1128,52	3,18
0,65	146,55	0,02	196,32	1410,88	3,25	192,18	1129,07	3,18
0,66	151,24	0,02	196,33	1411,84	3,25	192,19	1129,31	3,18
0,67	155,61	0,02	196,34	1412,23	3,25	192,20	1128,59	3,18
0,68	159,50	0,02	196,35	1412,07	3,25	192,21	1127,48	3,18
0,69	162,60	0,02	196,36	1411,76	3,25	192,22	1126,53	3,18
0,70	165,30	0,02	196,37	1411,84	3,25	192,23	1126,21	3,18
0,71	167,93	0,02	196,38	1412,55	3,25	192,24	1126,05	3,18
0,72	171,58	0,02	196,39	1413,66	3,25	192,25	1125,42	3,18
0,73	176,59	0,02	196,40	1414,38	3,25	192,26	1124,38	3,18
0,74	182,15	0,02	196,41	1415,01	3,25	192,27	1123,59	3,18
0,75	187,08	0,02	196,42	1415,57	3,25	192,28	1123,59	3,18
0,76	190,81	0,02	196,43	1416,13	3,25	192,29	1123,27	3,18
0,77	194,63	0,03	196,44	1416,21	3,25	192,30	1122,32	3,18
0,78	199,72	0,03	196,45	1415,49	3,25	192,31	1121,36	3,18
0,79	205,12	0,03	196,46	1414,38	3,25	192,32	1121,36	3,18
0,80	209,17	0,03	196,47	1412,95	3,25	192,33	1122,48	3,18
0,81	211,87	0,03	196,48	1411,60	3,25	192,34	1123,83	3,18
0,82	214,66	0,03	196,49	1410,64	3,25	192,35	1124,78	3,18
0,83	218,47	0,03	196,50	1410,64	3,25	192,36	1125,02	3,18
42,20	1013,44	3,46	196,51	1411,76	3,25	192,37	1125,02	3,18
42,21	1012,88	3,46	196,52	1412,87	3,25	192,38	1124,70	3,18
42,22	1012,64	3,46	196,53	1413,27	3,25	192,39	1124,46	3,18
42,23	1012,96	3,46	196,54	1413,19	3,25	192,40	1124,30	3,18
42,24	1013,76	3,46	196,55	1413,66	3,25	192,41	1124,14	3,18
42,25	1014,63	3,46	196,56	1414,86	3,25	192,42	1123,67	3,18
42,26	1015,11	3,46	196,57	1415,65	3,25	192,43	1123,43	3,18
42,27	1014,79	3,46	196,58	1415,41	3,25	192,44	1123,51	3,18
42,28	1012,96	3,46	196,59	1414,06	3,25	192,45	1123,43	3,18

Tabla 6 Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 4, 5 y 6

PROBETA 4			PROBETA 5			PROBETA 6		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
sec	N	mm	sec	N	mm	sec	N	mm
0,00	5,01	0,00	0,00	53,49	0,00	0,00	4,21	0,00
0,01	3,89	0,00	0,01	54,20	0,00	0,01	3,02	0,00
0,02	3,18	0,00	0,02	54,76	0,00	0,02	2,46	0,00
0,03	3,34	0,00	0,03	55,31	0,00	0,03	2,46	0,00
0,04	3,97	0,00	0,04	55,95	0,00	0,04	2,70	0,00
0,05	4,29	0,00	0,05	56,03	0,00	0,05	2,30	0,00
0,06	4,05	0,00	0,06	54,92	0,00	0,06	1,83	0,00
0,07	3,66	0,00	0,07	53,25	0,00	0,07	2,15	0,00
0,08	3,89	0,00	0,08	52,37	0,00	0,08	3,74	0,00
0,09	4,53	0,00	0,09	52,37	0,00	0,09	5,48	0,00
0,10	4,85	0,00	0,10	52,29	0,00	0,10	6,36	0,00
0,11	4,69	0,00	0,11	51,66	0,00	0,11	6,04	0,00
0,12	3,97	0,00	0,12	50,70	0,00	0,12	4,61	0,00
0,13	3,02	0,00	0,13	50,31	0,00	0,13	2,70	0,00
0,14	2,07	0,00	0,14	50,70	0,00	0,14	1,35	0,00
0,15	1,51	0,00	0,15	51,42	0,00	0,15	1,43	0,00
0,16	1,67	0,00	0,16	52,21	0,00	0,16	2,38	0,00
0,17	2,15	0,00	0,17	52,77	0,00	0,17	3,10	0,00
0,18	2,86	0,00	0,18	53,01	0,00	0,18	2,86	0,00
0,19	3,81	0,00	0,19	52,85	0,00	0,19	2,07	0,00
0,20	4,69	0,00	0,20	52,61	0,00	0,20	1,35	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
107,04	919,50	1,76	95,37	1132,57	1,57	91,13	990,31	1,50
107,05	919,02	1,76	95,38	1133,60	1,57	91,14	990,63	1,50
107,06	917,12	1,76	95,39	1134,48	1,57	91,15	989,83	1,50
107,07	913,86	1,76	95,40	1135,03	1,57	91,16	988,48	1,50
107,08	909,81	1,76	95,41	1135,11	1,57	91,17	987,93	1,50
107,09	905,43	1,76	95,42	1134,95	1,57	91,18	988,64	1,50
107,10	901,86	1,76	95,43	1134,48	1,57	91,19	988,96	1,50
107,11	899,47	1,76	95,44	1134,00	1,57	91,20	988,01	1,50
107,12	898,20	1,77	95,45	1133,36	1,57	91,21	986,74	1,50
107,13	897,88	1,77	95,46	1132,65	1,57	91,22	986,26	1,50
107,14	898,84	1,77	95,47	1131,85	1,57	91,23	986,58	1,50
107,15	901,38	1,77	95,48	1130,98	1,57	91,24	986,97	1,50
107,16	905,43	1,77	95,49	1130,34	1,57	91,25	987,77	1,50
107,17	910,44	1,77	95,50	1129,87	1,57	91,26	989,04	1,50
107,18	914,97	1,77	95,51	1129,55	1,57	91,27	990,23	1,50
107,19	917,28	1,77	95,52	1129,71	1,57	91,28	990,55	1,50
107,20	917,04	1,77	95,53	1130,34	1,57	91,29	990,31	1,50
107,21	915,45	1,77	95,54	1131,14	1,57	91,30	989,83	1,50
107,22	913,62	1,77	95,55	1131,61	1,57	91,31	989,04	1,50
107,23	911,71	1,77	95,56	1132,01	1,57	91,32	987,93	1,50
107,24	909,65	1,77	95,57	1132,65	1,57	91,33	987,53	1,50
107,25	907,42	1,77	95,58	1133,44	1,57	91,34	988,32	1,50
107,26	904,80	1,77	95,59	1133,76	1,57	91,35	989,04	1,50
107,27	902,10	1,77	95,60	1133,52	1,57	91,36	988,32	1,50
107,28	899,95	1,77	95,61	1132,89	1,57	91,37	986,42	1,50
107,29	899,08	1,77	95,62	1131,93	1,57	91,38	985,38	1,50
107,30	899,87	1,77	95,63	1131,14	1,57	91,39	985,78	1,50
107,31	901,94	1,77	95,64	1130,90	1,57	91,40	986,74	1,50
107,32	905,28	1,77	95,65	1131,22	1,57	91,41	987,45	1,50
107,33	908,69	1,77	95,66	1131,46	1,57	91,42	987,77	1,50
107,34	911,08	1,77	95,67	1130,90	1,57	91,43	987,77	1,50
107,35	912,35	1,77	95,68	1129,39	1,57	91,44	987,45	1,50
107,36	913,38	1,77	95,69	1127,96	1,57	91,45	986,89	1,50

Tabla 7 Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 1V, 2V y 3V

Probeta 1V			Probeta 2V			Probeta 3V		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
sec	N	mm	sec	N	mm	sec	N	mm
0,00	10,49	0,00	0,00	38,78	0,00	0,00	5,72	0,00
0,01	10,41	0,00	0,01	39,34	0,00	0,01	5,40	0,00
0,02	10,41	0,00	0,02	40,21	0,00	0,02	4,61	0,00
0,03	10,01	0,00	0,03	41,01	0,00	0,03	3,66	0,00
0,04	9,30	0,00	0,04	41,41	0,00	0,04	2,94	0,00
0,05	9,30	0,00	0,05	41,01	0,00	0,05	3,10	0,00
0,06	10,25	0,00	0,06	40,45	0,00	0,06	3,89	0,00
0,07	11,36	0,00	0,07	40,53	0,00	0,07	4,61	0,00
0,08	11,76	0,00	0,08	41,33	0,00	0,08	4,77	0,00
0,09	11,21	0,00	0,09	41,80	0,00	0,09	4,69	0,00
0,10	10,17	0,00	0,10	41,96	0,00	0,10	4,77	0,00
0,11	8,98	0,00	0,11	42,28	0,00	0,11	4,77	0,00
0,12	8,19	0,00	0,12	43,07	0,00	0,12	4,21	0,00
0,13	8,19	0,00	0,13	43,47	0,00	0,13	3,66	0,00
0,14	8,98	0,00	0,14	42,92	0,00	0,14	3,42	0,00
0,15	10,01	0,00	0,15	41,64	0,00	0,15	3,66	0,00
0,16	11,21	0,00	0,16	40,53	0,00	0,16	3,97	0,00
0,17	12,16	0,00	0,17	40,29	0,00	0,17	4,13	0,00
0,18	12,48	0,00	0,18	41,01	0,00	0,18	4,13	0,00
0,19	11,60	0,00	0,19	42,12	0,00	0,19	4,21	0,00
0,20	10,57	0,00	0,20	42,84	0,00	0,20	4,53	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
150,57	934,52	2,49	262,28	801,96	4,34	213,94	864,51	3,54
150,58	935,00	2,49	262,29	801,40	4,34	213,95	865,30	3,54
150,59	935,87	2,49	262,30	801,72	4,34	213,96	866,57	3,54
150,60	936,51	2,49	262,31	802,91	4,34	213,97	867,61	3,54
150,61	936,43	2,49	262,32	804,66	4,34	213,98	868,00	3,54
150,62	935,63	2,49	262,33	806,57	4,35	213,99	867,61	3,54
150,63	934,84	2,49	262,34	808,32	4,35	214,00	866,97	3,54
150,64	934,36	2,49	262,35	809,75	4,35	214,01	866,49	3,54
150,65	934,12	2,49	262,36	810,54	4,35	214,02	865,94	3,54
150,66	934,12	2,49	262,37	810,07	4,35	214,03	865,46	3,54
150,67	934,84	2,49	262,38	808,32	4,35	214,04	865,30	3,54
150,68	936,51	2,49	262,39	806,41	4,35	214,05	865,62	3,54
150,69	938,34	2,49	262,40	805,14	4,35	214,06	865,54	3,54
150,70	939,13	2,49	262,41	804,19	4,35	214,07	864,90	3,54
150,71	939,05	2,49	262,42	803,07	4,35	214,08	864,19	3,54
150,72	938,89	2,49	262,43	802,60	4,35	214,09	863,95	3,54
150,73	938,97	2,49	262,44	803,15	4,35	214,10	864,51	3,54
150,74	939,13	2,49	262,45	804,11	4,35	214,11	864,98	3,54
150,75	938,97	2,49	262,46	804,42	4,35	214,12	864,90	3,54
150,76	938,02	2,49	262,47	804,03	4,35	214,13	864,59	3,54
150,77	936,35	2,49	262,48	803,79	4,35	214,14	864,74	3,54
150,78	934,68	2,49	262,49	804,50	4,35	214,15	865,06	3,54
150,79	934,44	2,49	262,50	806,09	4,35	214,16	864,66	3,54
150,80	935,71	2,49	262,51	807,29	4,35	214,17	863,79	3,54
150,81	937,54	2,49	262,52	807,13	4,35	214,18	862,92	3,54
150,82	938,18	2,49	262,53	806,49	4,35	214,19	862,60	3,54
150,83	936,99	2,49	262,54	806,49	4,35	214,20	863,00	3,54
150,84	935,16	2,49	262,55	807,44	4,35	214,21	863,87	3,54
150,85	934,36	2,49	262,56	808,48	4,35	214,22	864,43	3,54
150,86	935,08	2,49	262,57	808,80	4,35	214,23	864,59	3,54
150,87	936,35	2,49	262,58	807,84	4,35	214,24	864,27	3,54
150,88	936,99	2,49	262,59	805,70	4,35	214,25	863,63	3,54

Tabla 8 Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU UH-X/FX de las probetas 4V, 5V y 6V

Probeta 4V			Probeta 5V			Probeta 6V		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
sec	N	mm	sec	N	mm	sec	N	mm
0,00	89,65	0,00	0,00	49,19	0,00	0,00	64,85	0,00
0,01	89,65	0,00	0,01	49,51	0,00	0,01	65,01	0,00
0,02	90,20	0,00	0,02	50,54	0,00	0,02	65,88	0,00
0,03	90,84	0,00	0,03	51,26	0,00	0,03	66,52	0,00
0,04	91,00	0,00	0,04	51,02	0,00	0,04	66,20	0,00
0,05	90,36	0,00	0,05	50,47	0,00	0,05	65,33	0,00
0,06	89,80	0,00	0,06	49,59	0,00	0,06	64,69	0,00
0,07	89,80	0,00	0,07	48,80	0,00	0,07	64,37	0,00
0,08	90,20	0,00	0,08	48,80	0,00	0,08	64,53	0,00
0,09	90,44	0,00	0,09	49,67	0,00	0,09	65,25	0,00
0,10	90,28	0,00	0,10	50,70	0,00	0,10	66,04	0,00
0,11	89,80	0,00	0,11	51,26	0,00	0,11	66,28	0,00
0,12	89,41	0,00	0,12	51,26	0,00	0,12	65,64	0,00
0,13	89,72	0,00	0,13	50,94	0,00	0,13	64,45	0,00
0,14	91,08	0,00	0,14	50,54	0,00	0,14	63,66	0,00
0,15	92,19	0,00	0,15	50,23	0,00	0,15	63,74	0,00
0,16	91,95	0,00	0,16	50,15	0,00	0,16	64,29	0,00
0,17	91,08	0,00	0,17	50,54	0,00	0,17	64,61	0,00
0,18	90,28	0,00	0,18	50,86	0,00	0,18	64,53	0,00
0,19	90,12	0,00	0,19	50,54	0,00	0,19	64,61	0,00
0,20	90,60	0,00	0,20	49,59	0,00	0,20	65,01	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
120,15	886,52	1,98	103,62	748,63	1,71	129,62	1181,76	2,14
120,16	885,49	1,98	103,63	746,17	1,71	129,63	1180,97	2,14
120,17	884,61	1,98	103,64	744,26	1,71	129,64	1180,73	2,14
120,18	883,98	1,98	103,65	743,39	1,71	129,65	1181,21	2,14
120,19	884,14	1,98	103,66	743,47	1,71	129,66	1182,00	2,14
120,20	884,69	1,98	103,67	744,18	1,71	129,67	1182,72	2,14
120,21	885,33	1,98	103,68	745,46	1,71	129,68	1183,43	2,14
120,22	885,65	1,98	103,69	747,68	1,71	129,69	1184,07	2,14
120,23	885,80	1,98	103,70	750,78	1,71	129,70	1183,99	2,14
120,24	885,88	1,98	103,71	753,72	1,71	129,71	1183,11	2,14
120,25	886,04	1,98	103,72	755,15	1,71	129,72	1182,16	2,14
120,26	885,73	1,98	103,73	754,44	1,71	129,73	1181,84	2,14
120,27	884,77	1,98	103,74	752,05	1,71	129,74	1181,84	2,14
120,28	883,90	1,98	103,75	748,87	1,71	129,75	1181,76	2,14
120,29	883,26	1,98	103,76	745,46	1,71	129,76	1181,52	2,14
120,30	882,55	1,98	103,77	742,12	1,71	129,77	1181,44	2,14
120,31	881,99	1,98	103,78	738,78	1,71	129,78	1181,36	2,14
120,32	882,47	1,98	103,79	736,55	1,71	129,79	1181,21	2,14
120,33	883,74	1,98	103,80	736,40	1,71	129,80	1180,65	2,14
120,34	884,61	1,98	103,81	738,70	1,71	129,81	1180,49	2,14
120,35	884,37	1,98	103,82	742,04	1,71	129,82	1181,36	2,14
120,36	883,42	1,99	103,83	744,98	1,71	129,83	1182,72	2,14
120,37	882,39	1,99	103,84	747,44	1,71	129,84	1183,67	2,14
120,38	881,83	1,99	103,85	749,51	1,71	129,85	1183,75	2,14
120,39	881,83	1,99	103,86	750,86	1,71	129,86	1183,19	2,14
120,40	881,83	1,99	103,87	750,70	1,71	129,87	1182,32	2,14
120,41	881,20	1,99	103,88	749,59	1,71	129,88	1181,29	2,14
120,42	880,00	1,99	103,89	748,55	1,71	129,89	1180,41	2,14
120,43	879,05	1,99	103,90	748,08	1,71	129,90	1180,17	2,14
120,44	878,18	1,99	103,91	747,04	1,71	129,91	1180,89	2,14
120,45	877,30	1,99	103,92	744,66	1,71	129,92	1182,00	2,14
120,46	876,74	1,99	103,93	741,72	1,71	129,93	1182,32	2,14

Tabla 9 Resultado del ensayo del equipo SHIMADZU de las probetas de sección reducida

Probeta sección reducida		
Time	Force	Stroke
sec	N	mm
0,00	35,21	0,00
0,01	35,60	0,00
0,02	34,97	0,00
0,03	34,33	0,00
0,04	34,41	0,00
0,05	34,97	0,00
0,06	35,37	0,00
0,07	35,52	0,00
0,08	35,60	0,00
0,09	35,60	0,00
0,10	35,52	0,00
0,11	35,37	0,00
0,12	34,97	0,00
0,13	34,57	0,00
0,14	34,33	0,00
0,15	34,33	0,00
0,16	34,89	0,00
0,17	35,60	0,00
0,18	36,08	0,00
0,19	36,24	0,00
0,20	36,24	0,00
⋮	⋮	⋮
549,02	1082,42	4,52
549,03	1081,15	4,52
549,04	1079,16	4,52
549,05	1076,22	4,52
549,06	1073,36	4,52
549,07	1072,09	4,52
549,08	1071,93	4,52
549,09	1071,85	4,52
549,10	1071,85	4,52
549,11	1072,57	4,52
549,12	1073,84	4,52
549,13	1075,27	4,52
549,14	1076,86	4,52
549,15	1079,08	4,52
549,16	1081,79	4,52
549,17	1083,77	4,52
549,18	1083,93	4,52
549,19	1082,26	4,52
549,20	1079,96	4,52
549,21	1077,81	4,52
549,22	1076,06	4,52
549,23	1074,79	4,52
549,24	1074,16	4,52
549,25	1074,00	4,52
549,26	1074,71	4,52
549,27	1075,98	4,52
549,28	1077,26	4,52
549,29	1077,97	4,52
549,30	1078,45	4,52
549,31	1079,08	4,52
549,32	1079,88	4,52
549,33	1080,91	4,52

Figura 31 Límites de fuerzas del debonding la probeta 1

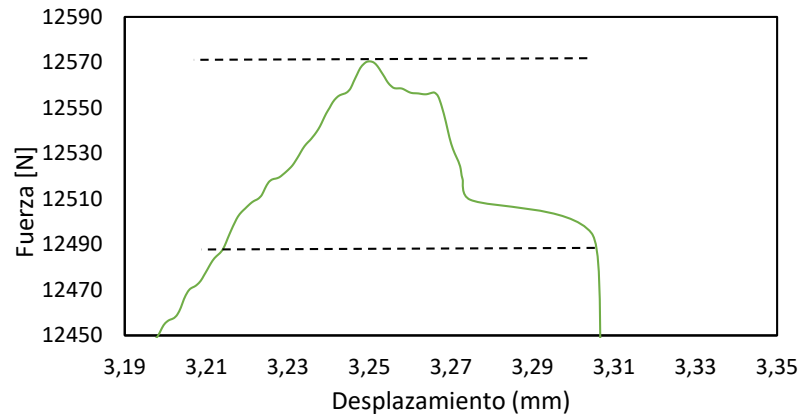


Figura 32 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 2

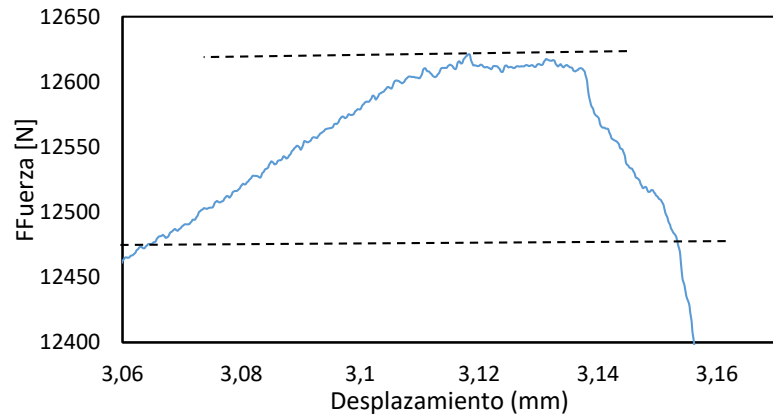


Figura 33 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 3

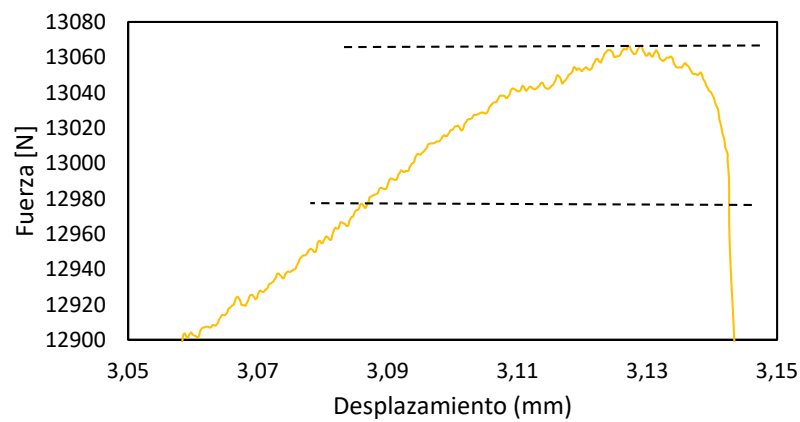


Figura 34 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 4

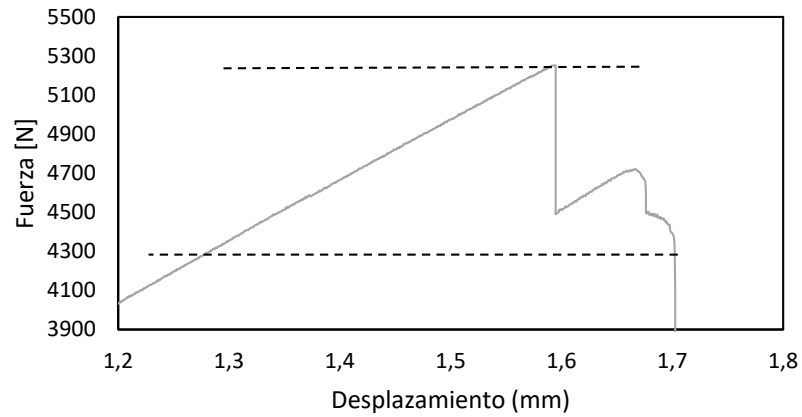


Figura 35 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 5

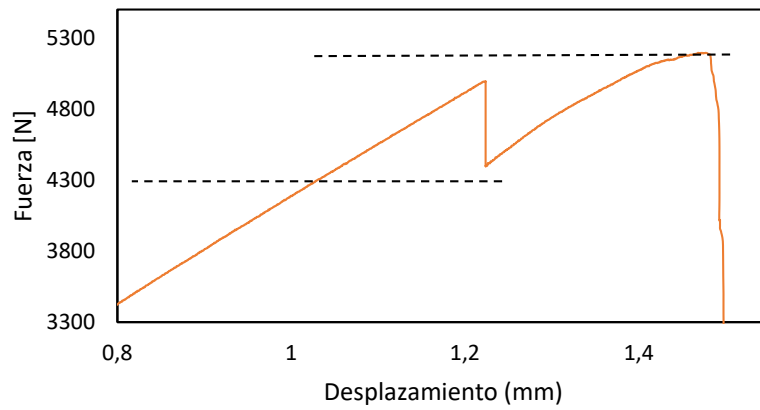


Figura 36 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 6

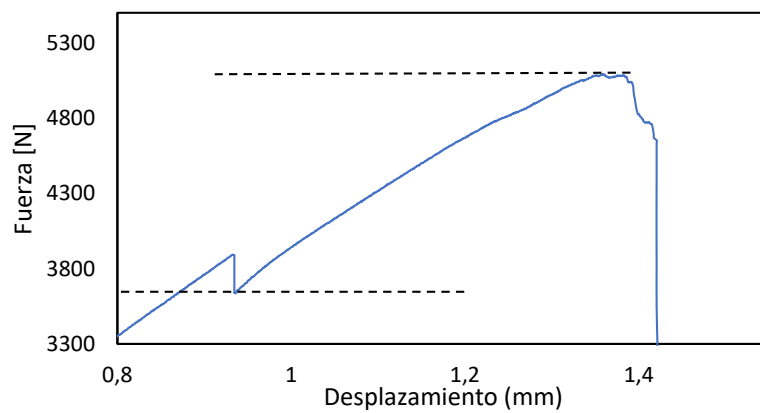


Figura 37 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 1V

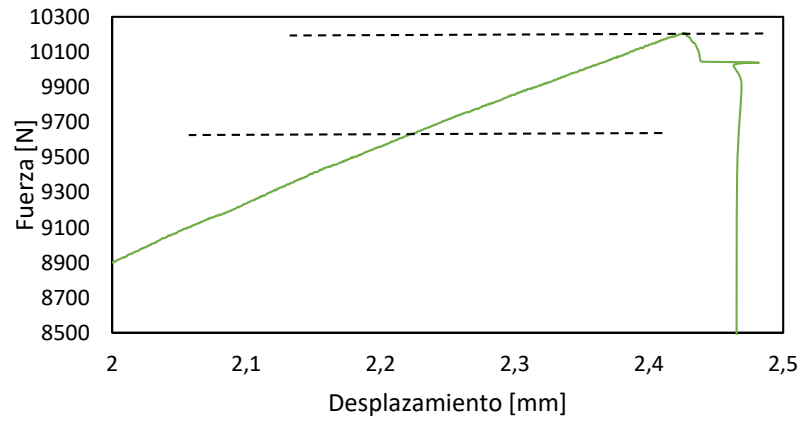


Figura 38 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 2V

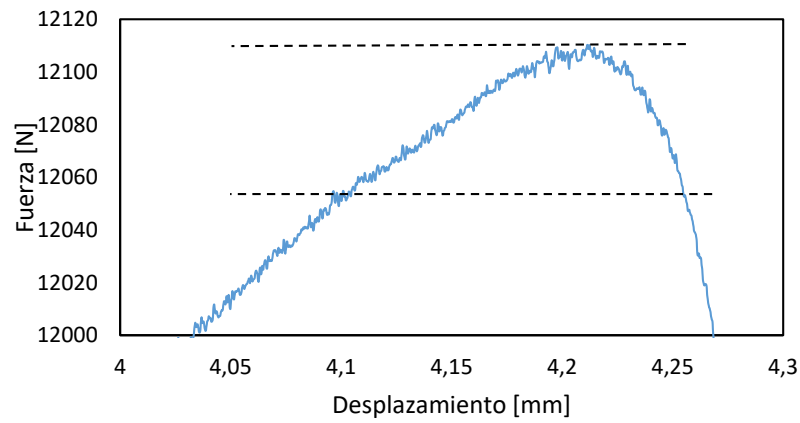


Figura 39 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 3V

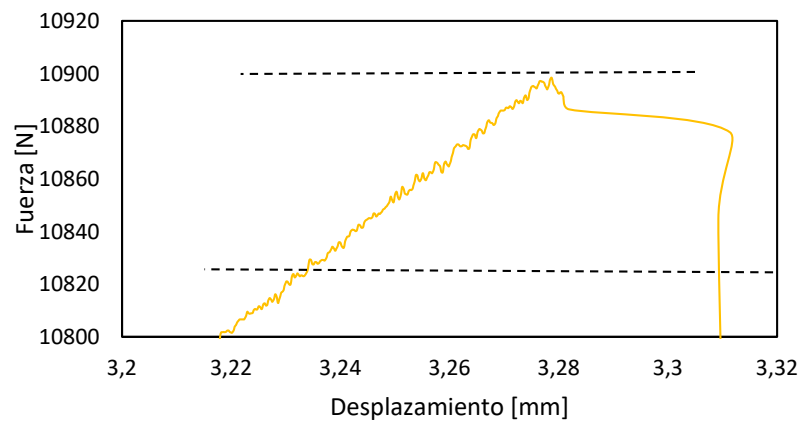


Figura 40 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 4V

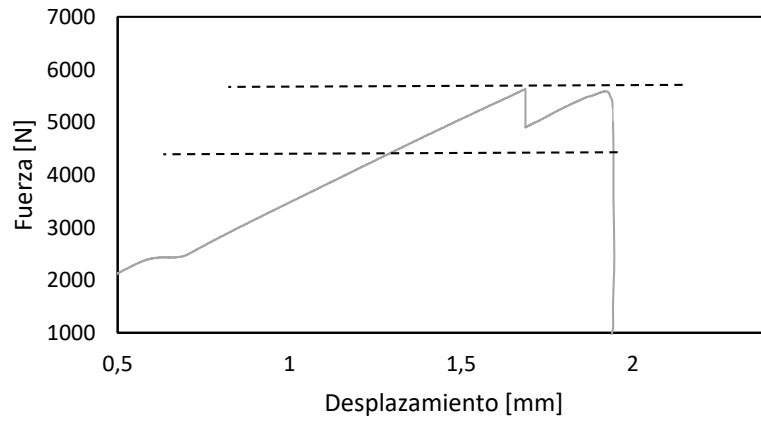


Figura 41 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 5V

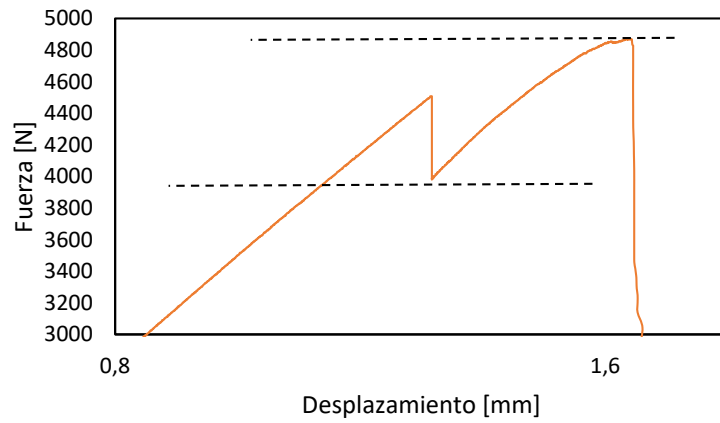


Figura 42 Límites de fuerzas del debonding de la probeta 6V

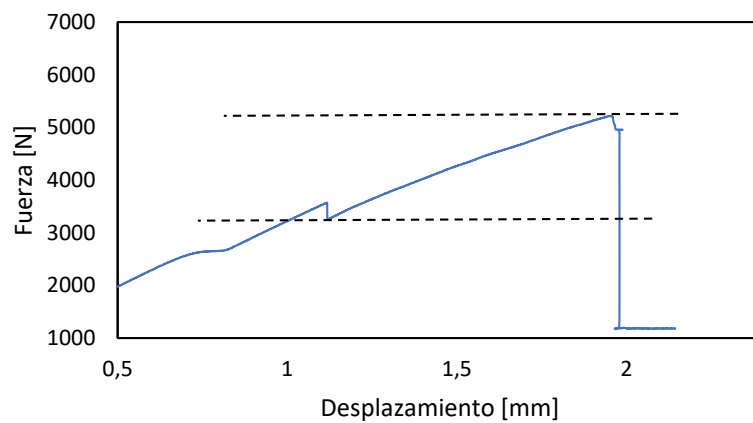


Tabla 10 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de gritas de la probeta 1

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
3,215	12492,74	0	0,00000	0,00000
3,216	12496,39	3,65	0,01755	0,00015
3,217	12499,73	6,99	0,03361	0,00029
3,218	12502,27	9,53	0,04582	0,00040
3,219	12504,26	11,52	0,05538	0,00048
3,220	12505,77	13,03	0,06264	0,00055
3,220	12507,28	14,54	0,06990	0,00061
3,221	12508,63	15,89	0,07639	0,00066
3,222	12509,42	16,68	0,08019	0,00070
3,223	12510,14	17,4	0,08365	0,00073
3,224	12511,81	19,07	0,09168	0,00080
3,224	12514,59	21,85	0,10505	0,00091
3,225	12517,29	24,55	0,11803	0,00103
3,226	12518,57	25,83	0,12418	0,00108
3,227	12518,96	26,22	0,12606	0,00110
3,228	12519,52	26,78	0,12875	0,00112
3,229	12520,71	27,97	0,13447	0,00117
3,230	12522,06	29,32	0,14096	0,00123
3,230	12523,33	30,59	0,14707	0,00128
3,231	12524,76	32,02	0,15394	0,00134
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3,232	12526,75	34,01	0,163510	0,001423
3,233	12529,29	36,55	0,175721	0,001529
3,234	12532	39,26	0,188750	0,001642
3,235	12534,14	41,4	0,199038	0,001732
3,235	12535,73	42,99	0,206683	0,001798
3,236	12537,32	44,58	0,214327	0,001865
3,237	12539,39	46,65	0,224279	0,001951
3,238	12541,93	49,19	0,236490	0,002057
3,239	12544,71	51,97	0,249856	0,002174
3,239	12547,49	54,75	0,263221	0,002290
3,240	12550,12	57,38	0,275865	0,002400
3,241	12552,5	59,76	0,287308	0,002500
3,242	12554,41	61,67	0,296490	0,002579
3,243	12555,6	62,86	0,302212	0,002629
3,244	12556,16	63,42	0,304904	0,002653
3,245	12556,87	64,13	0,308317	0,002682
3,245	12558,62	65,88	0,316731	0,002756
3,246	12561,56	68,82	0,330865	0,002879
3,247	12564,82	72,08	0,346538	0,003015
3,248	12567,52	74,78	0,359519	0,003128
3,249	12569,35	76,61	0,368317	0,003204
3,249	12570,3	77,56	0,372885	0,003244
3,250	12570,46	77,72	0,373654	0,003251

Tabla 11 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 2

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
3,068	12547,89	0	0,00000	0,00000
3,068	12548,92	1,03	0,00495	0,00001
3,069	12551,47	3,58	0,01721	0,00003
3,069	12553,85	5,96	0,02865	0,00005
3,069	12554,57	6,68	0,03212	0,00006
3,069	12554,09	6,2	0,02981	0,00006
3,069	12553,69	5,8	0,02788	0,00005
3,069	12553,69	5,8	0,02788	0,00005
3,070	12554,09	6,2	0,02981	0,00006
3,070	12554,72	6,83	0,03284	0,00006
3,070	12555,68	7,79	0,03745	0,00007
3,070	12556,71	8,82	0,04240	0,00008
3,070	12557,27	9,38	0,04510	0,00009
3,070	12557,43	9,54	0,04587	0,00009
3,071	12557,43	9,54	0,04587	0,00009
3,071	12557,19	9,3	0,04471	0,00008
3,071	12556,87	8,98	0,04317	0,00008
3,071	12557,03	9,14	0,04394	0,00008
3,071	12558,06	10,17	0,04889	0,00009
3,071	12559,33	11,44	0,05500	0,00010
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3,093	12611,23	63,34	0,304519	0,000579
3,093	12612,1	64,21	0,308702	0,000587
3,093	12612,9	65,01	0,312548	0,000594
3,093	12613,14	65,25	0,313702	0,000596
3,094	12612,82	64,93	0,312163	0,000593
3,094	12612,1	64,21	0,308702	0,000587
3,094	12611,23	63,34	0,304519	0,000579
3,094	12610,36	62,47	0,300337	0,000571
3,094	12609,72	61,83	0,297260	0,000565
3,094	12610,28	62,39	0,299952	0,000570
3,095	12612,18	64,29	0,309087	0,000587
3,095	12614,57	66,68	0,320577	0,000609
3,095	12615,76	67,87	0,326298	0,000620
3,095	12615,28	67,39	0,323990	0,000616
3,095	12614,25	66,36	0,319038	0,000606
3,095	12614,25	66,36	0,319038	0,000606
3,096	12615,52	67,63	0,325144	0,000618
3,096	12617,19	69,3	0,333173	0,000633
3,096	12618,54	70,65	0,339663	0,000645
3,096	12619,34	71,45	0,343510	0,000653
3,096	12620,21	72,32	0,347692	0,000661
3,096	12621	73,11	0,351490	0,000668
3,097	12621,08	73,19	0,351875	0,000669

Tabla 12 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 3

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
3,08	12950,58	0,00	0,00	0,00
3,08	12949,86	-0,72	0,00	-0,02
3,08	12949,78	-0,80	0,00	-0,03
3,08	12950,90	0,32	0,00	0,01
3,08	12953,12	2,54	0,01	0,08
3,08	12955,19	4,61	0,02	0,15
3,08	12956,06	5,48	0,03	0,18
3,08	12955,59	5,01	0,02	0,17
3,08	12954,79	4,21	0,02	0,14
3,08	12954,87	4,29	0,02	0,14
3,08	12956,14	5,56	0,03	0,18
3,08	12957,65	7,07	0,03	0,23
3,08	12958,53	7,95	0,04	0,26
3,08	12958,37	7,79	0,04	0,26
3,08	12957,65	7,07	0,03	0,23
3,08	12956,86	6,28	0,03	0,21
3,08	12956,54	5,96	0,03	0,20
3,08	12957,57	6,99	0,03	0,23
3,08	12959,88	9,30	0,04	0,31
3,08	12962,18	11,60	0,06	0,38
.....
3,13	13060,57	109,99	0,53	3,62
3,13	13060,57	109,99	0,53	3,62
3,13	13060,65	110,07	0,53	3,63
3,13	13061,52	110,94	0,53	3,66
3,13	13062,88	112,30	0,54	3,70
3,13	13064,07	113,49	0,55	3,74
3,13	13064,70	114,12	0,55	3,76
3,13	13064,62	114,04	0,55	3,76
3,13	13064,38	113,80	0,55	3,75
3,13	13064,78	114,20	0,55	3,76
3,13	13065,74	115,16	0,55	3,79
3,13	13066,13	115,55	0,56	3,81
3,13	13065,42	114,84	0,55	3,78
3,13	13063,99	113,41	0,55	3,74
3,13	13062,64	112,06	0,54	3,69
3,13	13061,92	111,34	0,54	3,67
3,13	13061,76	111,18	0,53	3,66
3,13	13062,16	111,58	0,54	3,68
3,13	13063,03	112,45	0,54	3,70
3,13	13064,23	113,65	0,55	3,74
3,13	13065,58	115,00	0,55	3,79
3,13	13066,37	115,79	0,56	3,81

Tabla 13 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 4

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
1,31	4397,79	0,00	0,00	0,000000
1,31	4398,19	0,40	0,00	0,000004
1,31	4398,82	1,03	0,00	0,000011
1,31	4399,62	1,83	0,01	0,000020
1,31	4400,65	2,86	0,01	0,000031
1,31	4402,00	4,21	0,02	0,000046
1,31	4403,51	5,72	0,03	0,000062
1,31	4404,70	6,91	0,03	0,000075
1,31	4405,10	7,31	0,04	0,000079
1,31	4404,94	7,15	0,03	0,000077
1,31	4404,78	6,99	0,03	0,000076
1,31	4404,78	6,99	0,03	0,000076
1,31	4405,18	7,39	0,04	0,000080
1,32	4405,98	8,19	0,04	0,000089
1,32	4406,53	8,74	0,04	0,000095
1,32	4406,85	9,06	0,04	0,000098
1,32	4407,33	9,54	0,05	0,000103
1,32	4408,20	10,41	0,05	0,000113
1,32	4409,08	11,28	0,05	0,000122
1,32	4409,63	11,84	0,06	0,000128
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,59	5241,71	843,92	4,06	0,009129
1,59	5242,03	844,24	4,06	0,009132
1,59	5241,95	844,16	4,06	0,009132
1,59	5241,31	843,52	4,06	0,009125
1,59	5240,84	843,05	4,05	0,009119
1,59	5241,16	843,37	4,05	0,009123
1,59	5242,51	844,72	4,06	0,009138
1,59	5244,26	846,47	4,07	0,009156
1,59	5245,77	847,98	4,08	0,009173
1,59	5246,56	848,77	4,08	0,009181
1,59	5246,56	848,77	4,08	0,009181
1,59	5246,48	848,69	4,08	0,009181
1,59	5247,12	849,33	4,08	0,009187
1,59	5248,23	850,44	4,09	0,009199
1,59	5249,34	851,55	4,09	0,009211
1,59	5250,22	852,43	4,10	0,009221
1,59	5250,93	853,14	4,10	0,009229
1,59	5251,25	853,46	4,10	0,009232
1,59	5250,93	853,14	4,10	0,009229
1,59	5250,53	852,74	4,10	0,009224
1,59	5250,85	853,06	4,10	0,009228
1,59	5251,73	853,94	4,11	0,01

Tabla 14 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 5

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
1,22	4396,36	0,00	0,00	0,00
1,22	4397,23	0,87	0,00	0,00
1,22	4398,90	2,54	0,01	0,01
1,22	4399,94	3,58	0,02	0,01
1,22	4399,94	3,58	0,02	0,01
1,22	4398,66	2,30	0,01	0,01
1,22	4396,68	0,32	0,00	0,00
1,22	4395,64	-0,72	0,00	0,00
1,22	4396,28	-0,08	0,00	0,00
1,22	4397,63	1,27	0,01	0,00
1,22	4398,66	2,30	0,01	0,01
1,23	4399,54	3,18	0,02	0,01
1,23	4401,05	4,69	0,02	0,01
1,23	4403,51	7,15	0,03	0,02
1,23	4406,29	9,93	0,05	0,03
1,23	4409,15	12,80	0,06	0,03
1,23	4411,86	15,50	0,07	0,04
1,23	4414,24	17,88	0,09	0,05
1,23	4416,07	19,71	0,09	0,05
1,23	4416,86	20,50	0,10	0,05
.....
1,46	5186,00	789,64	3,80	2,09
1,46	5185,76	789,40	3,80	2,09
1,47	5185,45	789,09	3,79	2,09
1,47	5185,52	789,17	3,79	2,09
1,47	5186,32	789,96	3,80	2,09
1,47	5187,27	790,91	3,80	2,09
1,47	5188,07	791,71	3,81	2,09
1,47	5188,62	792,26	3,81	2,10
1,47	5188,70	792,34	3,81	2,10
1,47	5188,39	792,03	3,81	2,10
1,47	5188,15	791,79	3,81	2,09
1,47	5188,23	791,87	3,81	2,10
1,47	5188,55	792,19	3,81	2,10
1,47	5189,02	792,66	3,81	2,10
1,47	5189,50	793,14	3,81	2,10
1,47	5189,74	793,38	3,81	2,10
1,47	5189,82	793,46	3,81	2,10
1,47	5190,05	793,70	3,82	2,10
1,47	5191,09	794,73	3,82	2,10
1,47	5192,84	796,48	3,83	2,11
1,47	5194,51	798,15	3,84	2,11
1,47	5195,30	798,94	3,84	2,11

Tabla 15 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 6

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
0,94	3637,16	0,00	0,00	0,00000
0,94	3637,23	0,08	0,00	0,00000
0,94	3638,59	1,43	0,01	0,00002
0,94	3640,65	3,50	0,02	0,00005
0,94	3642,88	5,72	0,03	0,00007
0,94	3645,34	8,19	0,04	0,00011
0,94	3648,12	10,97	0,05	0,00014
0,94	3650,59	13,43	0,06	0,00017
0,94	3651,94	14,78	0,07	0,00019
0,94	3652,57	15,42	0,07	0,00020
0,94	3653,53	16,37	0,08	0,00021
0,94	3655,35	18,20	0,09	0,00024
0,94	3657,10	19,95	0,10	0,00026
0,94	3657,66	20,50	0,10	0,00027
0,94	3656,47	19,31	0,09	0,00025
0,94	3654,72	17,56	0,08	0,00023
0,94	3653,61	16,45	0,08	0,00021
0,94	3654,08	16,93	0,08	0,00022
0,94	3655,59	18,44	0,09	0,00024
0,94	3656,94	19,79	0,10	0,00026
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,35	5080,30	1443,15	6,94	0,01873
1,35	5081,65	1444,50	6,94	0,01875
1,35	5081,97	1444,82	6,95	0,01875
1,36	5081,97	1444,82	6,95	0,01875
1,36	5082,53	1445,37	6,95	0,01876
1,36	5083,16	1446,01	6,95	0,01877
1,36	5083,48	1446,33	6,95	0,01877
1,36	5083,56	1446,41	6,95	0,01878
1,36	5084,12	1446,96	6,96	0,01878
1,36	5085,15	1448,00	6,96	0,01880
1,36	5086,03	1448,87	6,97	0,01881
1,36	5086,58	1449,43	6,97	0,01881
1,36	5086,90	1449,74	6,97	0,01882
1,36	5087,22	1450,06	6,97	0,01882
1,36	5087,46	1450,30	6,97	0,01883
1,36	5087,61	1450,46	6,97	0,01883
1,36	5087,93	1450,78	6,97	0,01883
1,36	5088,25	1451,10	6,98	0,01884
1,36	5088,33	1451,17	6,98	0,01884
1,36	5088,57	1451,41	6,98	0,01884
1,36	5089,60	1452,45	6,98	0,01885
1,36	5091,03	1453,88	6,99	0,01887
1,36	5091,51	1454,35	6,99	0,01888

Tabla 16 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta IV

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
2,78	9920,84	0,00	0,00	0,00000
2,78	9921,79	0,95	0,00	0,00001
2,78	9922,74	1,91	0,01	0,00002
2,78	9923,70	2,86	0,01	0,00004
2,78	9924,89	4,05	0,02	0,00005
2,78	9926,24	5,40	0,03	0,00007
2,78	9927,19	6,36	0,03	0,00008
2,78	9927,51	6,68	0,03	0,00009
2,78	9927,19	6,36	0,03	0,00008
2,78	9926,80	5,96	0,03	0,00008
2,78	9926,88	6,04	0,03	0,00008
2,78	9927,35	6,52	0,03	0,00008
2,78	9927,83	6,99	0,03	0,00009
2,78	9928,07	7,23	0,03	0,00009
2,78	9928,23	7,39	0,04	0,00010
2,78	9928,31	7,47	0,04	0,00010
2,78	9927,99	7,15	0,03	0,00009
2,78	9927,75	6,91	0,03	0,00009
2,78	9928,23	7,39	0,04	0,00010
2,78	9929,66	8,82	0,04	0,00011
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2,88	10198,59	277,75	1,34	0,00361
2,88	10199,86	279,02	1,34	0,00362
2,88	10200,66	279,82	1,35	0,00363
2,88	10201,14	280,30	1,35	0,00364
2,88	10201,38	280,54	1,35	0,00364
2,88	10201,38	280,54	1,35	0,00364
2,88	10201,06	280,22	1,35	0,00364
2,88	10200,66	279,82	1,35	0,00363
2,88	10200,58	279,74	1,34	0,00363
2,88	10201,14	280,30	1,35	0,00364
2,88	10202,17	281,33	1,35	0,00365
2,88	10203,12	282,28	1,36	0,00366
2,88	10203,52	282,68	1,36	0,00367
2,88	10203,76	282,92	1,36	0,00367
2,88	10203,60	282,76	1,36	0,00367
2,88	10202,96	282,12	1,36	0,00366
2,88	10202,41	281,57	1,35	0,00366
2,88	10202,88	282,04	1,36	0,00366
2,88	10204,24	283,40	1,36	0,00368
2,88	10205,75	284,91	1,37	0,00370
2,88	10207,18	286,34	1,38	0,00372
2,88	10208,53	287,69	1,38	0,00373
2,88	10209,64	288,80	1,39	0,00375

Tabla 17 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 2V

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
4,05	12010,73	0,00	0,00	0,000000
4,05	12012,08	1,35	0,01	0,000005
4,05	12013,28	2,55	0,01	0,000009
4,05	12014,23	3,50	0,02	0,000012
4,05	12015,42	4,69	0,02	0,000016
4,05	12016,61	5,88	0,03	0,000020
4,05	12016,77	6,04	0,03	0,000020
4,05	12015,66	4,93	0,02	0,000017
4,05	12014,31	3,58	0,02	0,000012
4,05	12013,59	2,86	0,01	0,000010
4,05	12013,83	3,10	0,01	0,000010
4,05	12014,79	4,06	0,02	0,000014
4,05	12015,90	5,17	0,02	0,000017
4,05	12016,69	5,96	0,03	0,000020
4,05	12016,69	5,96	0,03	0,000020
4,05	12016,46	5,73	0,03	0,000019
4,05	12016,46	5,73	0,03	0,000019
4,05	12016,77	6,04	0,03	0,000020
4,05	12016,93	6,20	0,03	0,000021
4,05	12017,01	6,28	0,03	0,000021
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4,21	12104,51	93,78	0,45	0,000316
4,21	12104,67	93,94	0,45	0,000316
4,21	12104,59	93,86	0,45	0,000316
4,21	12104,43	93,70	0,45	0,000315
4,21	12104,43	93,70	0,45	0,000315
4,21	12104,51	93,78	0,45	0,000316
4,21	12104,91	94,18	0,45	0,000317
4,21	12105,86	95,13	0,46	0,000320
4,21	12106,97	96,24	0,46	0,000324
4,21	12107,77	97,04	0,47	0,000327
4,21	12108,25	97,52	0,47	0,000328
4,21	12108,41	97,68	0,47	0,000329
4,21	12108,01	97,28	0,47	0,000327
4,21	12106,97	96,24	0,46	0,000324
4,21	12106,26	95,53	0,46	0,000321
4,21	12106,50	95,77	0,46	0,000322
4,21	12107,45	96,72	0,47	0,000326
4,21	12108,25	97,52	0,47	0,000328
4,21	12108,56	97,83	0,47	0,000329
4,21	12108,56	97,83	0,47	0,000329
4,21	12108,88	98,15	0,47	0,000330
4,21	12109,76	99,03	0,48	0,000333
4,21	12110,31	99,58	0,48	0,000335

Tabla 18 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 3V

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
3,23	10820,55	0,00	0,00	0,000000
3,23	10821,10	0,55	0,00	0,000003
3,23	10820,87	0,32	0,00	0,000002
3,23	10820,31	-0,24	0,00	-0,000001
3,23	10819,75	-0,80	0,00	-0,000005
3,23	10819,91	-0,64	0,00	-0,000004
3,23	10821,18	0,63	0,00	0,000004
3,23	10822,93	2,38	0,01	0,000015
3,23	10823,89	3,34	0,02	0,000021
3,23	10823,41	2,86	0,01	0,000018
3,23	10822,61	2,06	0,01	0,000013
3,23	10822,69	2,14	0,01	0,000013
3,23	10823,57	3,02	0,01	0,000019
3,23	10824,12	3,57	0,02	0,000022
3,23	10823,89	3,34	0,02	0,000021
3,23	10823,17	2,62	0,01	0,000016
3,23	10823,01	2,46	0,01	0,000015
3,23	10823,33	2,78	0,01	0,000017
3,23	10823,33	2,78	0,01	0,000017
3,23	10823,09	2,54	0,01	0,000016
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3,27	10894,22	73,67	0,35	0,000460
3,27	10894,93	74,38	0,36	0,000465
3,27	10895,25	74,70	0,36	0,000467
3,27	10895,25	74,70	0,36	0,000467
3,27	10895,01	74,46	0,36	0,000465
3,27	10894,70	74,15	0,36	0,000463
3,27	10894,38	73,83	0,35	0,000461
3,27	10894,46	73,91	0,36	0,000462
3,27	10895,25	74,70	0,36	0,000467
3,27	10896,37	75,82	0,36	0,000474
3,27	10897,08	76,53	0,37	0,000478
3,28	10897,16	76,61	0,37	0,000479
3,28	10896,92	76,37	0,37	0,000477
3,28	10896,92	76,37	0,37	0,000477
3,28	10896,84	76,29	0,37	0,000477
3,28	10896,37	75,82	0,36	0,000474
3,28	10895,49	74,94	0,36	0,000468
3,28	10894,54	73,99	0,36	0,000462
3,28	10893,98	73,43	0,35	0,000459
3,28	10894,46	73,91	0,36	0,000462
3,28	10895,89	75,34	0,36	0,000471
3,28	10897,40	76,85	0,37	0,000480
3,28	10898,43	77,88	0,37	0,000487

Tabla 19 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 4V

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
1,69	4908,88	0,00	0,00	0,000000
1,69	4909,04	0,16	0,00	0,000002
1,69	4910,23	1,35	0,01	0,000016
1,69	4911,50	2,62	0,01	0,000030
1,69	4912,14	3,26	0,02	0,000038
1,69	4912,69	3,81	0,02	0,000044
1,69	4913,57	4,69	0,02	0,000054
1,69	4913,89	5,01	0,02	0,000058
1,69	4913,65	4,77	0,02	0,000055
1,69	4913,81	4,93	0,02	0,000057
1,69	4914,52	5,64	0,03	0,000065
1,69	4915,32	6,44	0,03	0,000074
1,69	4915,71	6,83	0,03	0,000079
1,69	4915,87	6,99	0,03	0,000081
1,69	4916,03	7,15	0,03	0,000083
1,69	4916,35	7,47	0,04	0,000086
1,69	4916,67	7,79	0,04	0,000090
1,69	4916,99	8,11	0,04	0,000094
1,69	4917,62	8,74	0,04	0,000101
1,69	4918,73	9,85	0,05	0,000114
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,92	5587,50	678,62	3,26	0,007830
1,92	5586,78	677,90	3,26	0,007822
1,92	5585,67	676,79	3,25	0,007809
1,92	5585,59	676,71	3,25	0,007808
1,92	5586,62	677,74	3,26	0,007820
1,92	5587,34	678,46	3,26	0,007828
1,92	5586,78	677,90	3,26	0,007822
1,92	5585,43	676,55	3,25	0,007806
1,92	5584,48	675,60	3,25	0,007795
1,92	5584,24	675,36	3,25	0,007793
1,92	5584,48	675,60	3,25	0,007795
1,92	5584,96	676,08	3,25	0,007801
1,92	5585,51	676,63	3,25	0,007807
1,92	5585,75	676,87	3,25	0,007810
1,92	5584,80	675,92	3,25	0,007799
1,92	5583,05	674,17	3,24	0,007779
1,92	5581,94	673,06	3,24	0,007766
1,92	5582,49	673,61	3,24	0,007772
1,92	5584,48	675,60	3,25	0,007795
1,92	5586,54	677,66	3,26	0,007819
1,92	5587,82	678,94	3,26	0,007834
1,92	5588,45	679,57	3,27	0,007841
1,92	5588,69	679,81	3,27	0,007844

Tabla 20 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 5V

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
1,33	4036,59	0,00	0,00	0,000000
1,33	4036,90	0,32	0,00	0,000003
1,33	4038,25	1,67	0,01	0,000018
1,33	4040,00	3,42	0,02	0,000036
1,33	4041,04	4,45	0,02	0,000047
1,33	4041,12	4,53	0,02	0,000048
1,33	4041,20	4,61	0,02	0,000049
1,33	4041,75	5,17	0,02	0,000055
1,33	4042,78	6,20	0,03	0,000066
1,33	4044,06	7,47	0,04	0,000079
1,33	4045,57	8,98	0,04	0,000095
1,33	4046,92	10,33	0,05	0,000109
1,33	4047,63	11,05	0,05	0,000117
1,33	4047,95	11,36	0,05	0,000120
1,33	4048,03	11,45	0,06	0,000121
1,33	4048,11	11,52	0,06	0,000122
1,33	4048,19	11,60	0,06	0,000123
1,33	4048,43	11,84	0,06	0,000125
1,33	4048,43	11,84	0,06	0,000125
1,33	4048,19	11,60	0,06	0,000123
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,63	4869,46	832,88	4,00	0,008809
1,63	4869,46	832,88	4,00	0,008809
1,63	4869,30	832,72	4,00	0,008808
1,64	4868,75	832,16	4,00	0,008802
1,64	4868,35	831,76	4,00	0,008798
1,64	4868,35	831,76	4,00	0,008798
1,64	4868,43	831,84	4,00	0,008798
1,64	4868,11	831,53	4,00	0,008795
1,64	4867,32	830,73	3,99	0,008787
1,64	4867,08	830,49	3,99	0,008784
1,64	4867,95	831,37	4,00	0,008793
1,64	4868,83	832,24	4,00	0,008803
1,64	4868,43	831,84	4,00	0,008798
1,64	4866,84	830,25	3,99	0,008782
1,64	4865,65	829,06	3,99	0,008769
1,64	4865,57	828,98	3,99	0,008768
1,64	4866,12	829,54	3,99	0,008774
1,64	4867,00	830,41	3,99	0,008783
1,64	4868,35	831,76	4,00	0,008798
1,64	4869,70	833,12	4,01	0,008812
1,64	4870,97	834,39	4,01	0,008825
1,64	4872,16	835,58	4,02	0,008838
1,64	4872,80	836,21	4,02	0,008845

Tabla 21 Resultados del análisis de la tasa de crecimiento de grietas de la probeta 6V

Desplazamiento	Fuerza	ΔF_i	ΔS_N	$\frac{d\xi}{dN}$
1,15	3341,91	0,00	0,00	0,000000
1,15	3342,39	0,48	0,00	0,000004
1,15	3343,74	1,83	0,01	0,000016
1,15	3345,57	3,66	0,02	0,000032
1,15	3346,92	5,01	0,02	0,000043
1,15	3347,48	5,56	0,03	0,000048
1,15	3347,72	5,80	0,03	0,000050
1,15	3348,11	6,20	0,03	0,000054
1,15	3348,43	6,52	0,03	0,000056
1,15	3348,75	6,84	0,03	0,000059
1,15	3349,70	7,79	0,04	0,000067
1,15	3351,53	9,62	0,05	0,000083
1,15	3353,28	11,36	0,05	0,000098
1,15	3354,15	12,24	0,06	0,000106
1,15	3353,91	12,00	0,06	0,000104
1,15	3353,04	11,13	0,05	0,000096
1,15	3352,25	10,33	0,05	0,000089
1,15	3352,48	10,57	0,05	0,000091
1,15	3353,44	11,52	0,06	0,000100
1,15	3354,31	12,40	0,06	0,000107
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,95	5213,26	1871,35	9,00	0,016194
1,95	5212,86	1870,95	8,99	0,016191
1,95	5212,15	1870,24	8,99	0,016185
1,95	5212,31	1870,39	8,99	0,016186
1,95	5213,66	1871,75	9,00	0,016198
1,95	5215,17	1873,26	9,01	0,016211
1,95	5216,04	1874,13	9,01	0,016218
1,95	5216,20	1874,29	9,01	0,016220
1,95	5215,80	1873,89	9,01	0,016216
1,95	5215,41	1873,49	9,01	0,016213
1,95	5215,65	1873,73	9,01	0,016215
1,95	5216,52	1874,61	9,01	0,016223
1,95	5217,31	1875,40	9,02	0,016229
1,95	5217,63	1875,72	9,02	0,016232
1,95	5218,03	1876,12	9,02	0,016236
1,95	5218,74	1876,83	9,02	0,016242
1,95	5219,30	1877,39	9,03	0,016247
1,95	5219,38	1877,47	9,03	0,016247
1,95	5219,22	1877,31	9,03	0,016246
1,95	5219,14	1877,23	9,03	0,016245
1,95	5219,54	1877,63	9,03	0,016249
1,95	5220,18	1878,26	9,03	0,016254
1,95	5220,49	1878,58	9,03	0,016257

Tabla 22 Resultados del análisis de la razón de falla y relación de esfuerzos probetas sin modificar

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
Fmin	9920,84	12010,73	10820,55	4908,88	4036,59	3341,91
Fmax	10209,00	12110,31	10898,43	5588,69	4872,80	5220,49
ΔF_n	288,16	99,58	77,88	679,81	836,21	1878,58
dx/dN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R	0,39	0,47	0,42	0,22	0,19	0,20
Δt	33,55	9,71	2,92	48,27	18,55	49,24
$\Delta F/t$	8,59	10,26	26,67	14,08	45,08	38,15
Energía	1049,32		552,563	1217,77	1396,28	

Tabla 23 Resultados del análisis de la razón de falla y relación de esfuerzos probetas modificadas

	Probeta 1V	Probeta 2V	Probeta 3V	Probeta 4V	Probeta 5V	Probeta 6V
Fmin	12492,74	12547,89	12950,58	4397,79	4396,36	3637,16
Fmax	12570,46	12621,08	13066,37	5251,73	5195,30	5091,51
ΔF_n	77,72	73,19	115,79	853,94	798,94	1454,35
dx/dN	0,00	0,00	1,18	0,00	0,14	0,02
R	0,48	0,49	0,50	0,20	0,19	0,20
Δt	0,42	1,78	3,03	16,79	14,78	25,41
$\Delta F/t$	0,00	41,12	38,21	50,86	54,06	57,24
Energía	438,54	355,79	655,48	1356,77	1190,20	