

RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO.

2. TÍTULO: Caracterización mecánica de material compuesto “pre-preg” bajo cargas de Pandeo

3. AUTOR (ES): Christhian Andrés Murillo Herreño & Lorena Rocío Tarazona Bermúdez

4. LUGAR: Bogotá, D.C

5. FECHA: 26 de Septiembre de 2018

6. PALABRAS CLAVES: Pre-preg, Esfuerzo máximo, Carbono, Vidrio, pandeo, Buckling, Compresión, ANOVA, Maquina universal de ensayos, Fractura, Diseño experimental, Orientación y Coeficiente.

7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: El objetivo general de este trabajo Caracterizar mecánicamente material compuesto “Pre-preg” en tres orientaciones diferentes (0° , 45° y 90°), con dos tipos de fibras bajo cargas de pandeo. Con el cual se quiere evaluar el comportamiento entre la interacción de la orientación de la fibra de carbono y vidrio sobre el esfuerzo máximo, de igual manera se quiere ver como interactúa el coeficiente (relación entre base y altura de las probetas) con respecto al esfuerzo máximo.

8. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Línea de Investigación de la USB: Materiales y Estructuras

9. METODOLOGÍA: Es de carácter empirico-analitico, con un enfoque metodológico con base en el estudio de materiales compuesto Pre-preg

10. CONCLUSIONES: De acuerdo a los datos obtenidos se evidencio que por más que se generen cambios en los coeficientes y orientaciones no existirá una interacción entre estos dos factores, puesto que se realizó una gráfica de dispersión, gráfica 5.23 de datos reflejando claramente que esta relación entre factores no se genera ya que no se traslapan los datos.

En el material compuesto pre-preg unidireccional de carbón 9.0oz/sq - 12K y Prepreg 7781 E-Glass de carbono se observó una clara influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo, donde para cada una de las orientación de generaron diferentes comportamientos con respecto al tiempo de pandeo y fallas, en la orientación de 0° para los dos coeficientes se obtuvo un tipo de falla de trituración de fibra. Esto soportado bajo el rechazo de la hipótesis nula.

Caracterización mecánica de material compuesto “pre-preg” bajo cargas de
Pandeo

Christhian Andrés Murillo Herreño
Lorena Rocío Tarazona Bermúdez

Universidad San Buenaventura- Bogotá
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Aeronáutica
Bogotá, Colombia
2018

Caracterización mecánica de material compuesto “pre-preg” bajo cargas de
Pandeo

Christhian Andrés Murillo Herreño
Lorena Rocío Tarazona Bermúdez

Proyecto de investigación presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Aeronáutico

Tutor:
Ing. Fabio Merchán

Universidad San Buenaventura- Bogotá
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Aeronáutica
Bogotá, Colombia
2018

Nota de aceptación:

Jorge Eliecer Gaitán Aroca

Wilson Pinzón Velazco

Bogotá, 26 de Septiembre de 2018

Dedicatoria

A Dios por haberme dado la paciencia, la sabiduría, el conocimiento, y el amor por este proyecto, además acompañarme en cada paso que doy por fortalecer mi corazón he iluminar mi mente.

Mi esposa Stefania Escobar quien fue la persona que me motivo a cumplir mis objetivos y mis sueños y que me enseñó que la humildad es significado de grandeza y que es lo que nunca debo olvidar para poder alcanzar mis metas.

A mi madre Luz Mary Herreño quien nunca dejó de creer en mí, en mis cualidades, en mis fortalezas y que siempre estuvo ahí apoyándome y entregándome sus sabios consejos para nunca desistir.

A mi padre José Francisco Murillo quien con su sabiduría, su paciencia y su entrega me enseñó que nunca puedes abandonar tus sueños.

A mi hermano Juan Sebastián Murillo el que cada día me hace sentirme orgulloso de su inteligencia, de sus ganas de vivir, de adquirir nuevos conocimientos.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos

Christian Andrés Murillo Herreño

Dedicatoria

A Dios quien me acompaño siempre es este camino levantándome de mi continuo tropiezo y siempre dándome un nuevo día para culminar esta carrera.

De manera especial dedico a mis padres, Carmen Inés y Jorge Enrique, quienes a lo largo de toda mi vida me han apoyado y motivado en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad.

A mis hermanos Juan David y María Luisa por el apoyo y tiempo que me brindaron día a día en este largo camino de universidad.

A todos y cada uno que participo en este proceso muchas gracias!

Lorena Rocío Tarazona Bermúdez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiii
I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo General	4
1.3.1 Objetivos específicos.....	4
1.4 Alcances	5
1.5 Limitaciones.....	6
1.6 Antecedentes	7
1.7 Normas	11
1.8 Descripción y formulación del problema	12
1.9 Metodología	13
II. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Marco conceptual.....	15
2.1.1 Pandeo	15
2.1.2 Estudio teórico del pandeo de piezas sometidas a compresión	16
2.1.3 Cálculo del valor de la carga crítica Euler.....	16
2.1.4 Pandeo en aeronaves	18
2.2 Prepreg	20
2.2.1 Prepreg unidireccional de carbón 9.0oz/sq - 12K:	20
2.2.2 Prepreg 7781 E-Glass:.....	21
2.2.3 Condiciones del Almacenamiento del prepreg.....	24
2.3 Máquina universal de ensayo	24
2.3.1 Máquina Tinius Olsen 300 Universidad San Buenaventura-Bogotá:.....	24
2.4 Como se debe realizar un diseño experimental	25
2.5 ANOVA o análisis de varianza	26
2.6 Fractura material compuesto	29
III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	32
3.1 Proceso experimental	36
3.2 Medidas de probetas y tabs	37
3.3 Cálculos del número de réplicas	40

3.3.1	Calculo desviación estándar de los valores pruebas piloto	41
3.4	Ensayo de probetas de acuerdo al diseño experimental	52
3.4.1	Acrónimo pruebas	52
3.5	Fabricación de probetas.....	54
IV	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	55
4.1	Suavización de gráficas.....	55
4.2	Resumen datos pruebas de pandeo.....	59
4.3	Fractura de probetas	62
V	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
5.1	ANOVA	64
5.1.1	Análisis de hipótesis planteadas.....	65
5.2	Influencia del coeficiente, ángulo y esfuerzo máximo.....	68
5.2.1	Influencia del coeficiente	69
5.2.2	Interacción entre Coeficiente y Ángulo.....	77
VI	CONCLUSIONES	81
VII	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXOS.....	87

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1 Pandeo	15
Figura 2.2 Equilibrios de Compresión	16
Figura 2.3 Longitud de Pandeo	18
Figura 2.4 Pandeo	19
Figura 2.5 Pre-peg de Carbono unidireccional 9.0 oz 12K.....	21
Figura 2.6 Pre impregnado 7781 E-Glass	22
Figura 2.7 Modos de falla de compresión de compuestos de fibra	30
Figura 3.8 Diseño 1	32
Figura 3.9 Diseño 2	32
Figura 3.10 Probeta coeficiente 1	38
Figura 3.11 Probeta coeficiente 1.5.....	39
Figura 5.12Tipos de fracturas por orientación Carbono	79
Figura 5.13 Tipos de fracturas por orientación Vidrio.....	80

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Carga Crítica	16
Ecuación 3.2 Coeficiente.....	37
Ecuación 3.3 Tamaño de la muestra.....	40
Ecuación 3.4 Media aritmética	41

TABLAS

Tabla 2.1 Características material Carbono.....	21
Tabla 2.2 Características material Vidrio.....	22
Tabla 2.3 Ventajas y Desventajas pre-preg	23
Tabla 3.4 Asignación % de decisión.....	33
Tabla 3.5 Calificación de costos de fabricación	33
Tabla 3.6 Calificación de complejidad de diseño	34
Tabla 3.7 Calificación de proceso de fabricación.....	34
Tabla 3.8 Calificación de tiempo de fabricación	35
Tabla 3.9 Matriz de decisión.....	35
Tabla 3.10 Probetas.....	38
Tabla 3.11 Factores y Niveles diseño experimental	39
Tabla 3.12 Intervalo de confianza.....	41
Tabla 3.13 Resultados prueba piloto Carbono	45
Tabla 3.14 Resultados prueba piloto Vidrio	50
Tabla 3.15 Repeticiones material 1	52
Tabla 3.16 Repeticiones material 2.....	52
Tabla 3.17 Orden Acrónimo.....	53
Tabla 3.18 Designación probetas	53
Tabla 4.19 Punto a punto prueba C290-22	56
Tabla 4.20 Punto a punto prueba V145-19	58
Tabla 4.21 Tabulación de datos carbono	60
Tabla 4.22 Tabulación datos vidrio.....	61
Tabla 5.23 Tendencia de datos carbono	64
Tabla 5.24 Tendencia de datos vidrio	65
Tabla 5.25 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Carbono	69
Tabla 5.26 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Vidrio	71
Tabla 5.27 Orientación Vs escuerzo máximo coeficiente 1 carbono	73
Tabla 5.28 Orientación Vs escuerzo máximo coeficiente 1.5 carbono	74
Tabla 5.29 Orientación Vs escuerzo máximo coeficiente 1 vidrio	75
Tabla 5.30 Orientación Vs escuerzo máximo coeficiente 1.5 vidrio.....	76

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Prueba piloto 1 Carbono.....	42
Gráfica 3.2 Prueba piloto 2 Carbono.....	43
Gráfica 3.3 Prueba piloto 3 Carbono.....	44
Gráfica 3.4 Prueba piloto 1 Vidrio.....	47
Gráfica 3.5 Prueba piloto 2 Vidrio.....	48
Gráfica 3.6 Prueba piloto 3 Vidrio.....	49
Gráfica 4.7 Prueba C290-21.....	55
Gráfica 4.8 Punto a punto prueba C290-22.....	57
Gráfica 4.9 Prueba V145-19.....	58
Gráfica 4.10 Punto a punto prueba V145-19.....	59
Gráfica 4.11 Esfuerzo Máximo Vs Strain C10.....	60
Gráfica 4.12 Esfuerzo Máximo Vs StrainV290.....	61
Gráfica 5.13 Tendencia lineal carbono coeficiente 1,5.....	64
Gráfica 5.14 Tendencia lineal vidrio coeficiente 1.....	65
Gráfica 5.15 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Carbono.....	69
Gráfica 5.16 Diagrama de caja carbono, coeficientes vs esfuerzo.....	70
Gráfica 5.17 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Vidrio.....	71
Gráfica 5.18 Diagrama de caja vidrio, coeficientes vs esfuerzo.....	72
Gráfica 5.19 Diagrama de caja carbono - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.....	73
Gráfica 5.20 Diagrama de caja carbono - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.5.....	74
Gráfica 5.21 Diagrama de caja vidrio - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.....	76
Gráfica 5.22 Diagrama de caja vidrio - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.5.....	77
Gráfica 5.23 Interacción coeficiente vs ángulo.....	78
Gráfica 5.24 Interacción coeficiente vs ángulo vidrio.....	78

RESUMEN

En este proyecto de grado se llevó a cabo una caracterización mecánica de dos tipos de fibras preimpregnados con resina epoxi. Se realizó un ensayo de compresión siguiendo las normas internacionales ASTM. El material preimpregnado fue obtenido por la empresa Fibre Glast el cual garantizaba las mejores condiciones de manipulación y accesibilidad. Las réplicas de las probetas fueron elaboradas de acuerdo a un diseño experimental en el cual el número de réplicas por cada fibra fue de 4 réplicas. Las pruebas mecánicas se realizaron en una máquina universal de ensayos la cual fue adaptada para poder realizar las pruebas de pandeo. Con este tipo de prueba se quiere conocer la interacción entre la relación de base y altura de las probetas y el esfuerzo máximo de igual manera la orientación de la fibra y el esfuerzo máximo.

ABSTRACT

In this project of degree was carried out a mechanical characterization of the types of fibers preimpregnated with epoxy resin. A containment test was carried out following the international ASTM standards. The preimpregnated material was obtained by the company Fiber Glast which guaranteed the best conditions of handling and accessibility. The replicas of the specimens were made according to an experimental design in which the number of replicas for each fiber was 4 replicas. The mechanical tests were carried out in a universal testing machine that was adapted to carry out the buckling tests. With this type of test, you can know the relationship between the base of the height and the height of the tests and the maximum effort in the same way, the orientation of the fiber and the maximum effort.

I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

En el estudio de los materiales compuestos se encuentra un material denominado prepreg (material pre-impregnado) lo cual indica que es una capa de material compuesto de matriz polimérica con fibras. Las fibras más utilizadas suelen ser de carbono, de vidrio o de Kevlar, y las resinas de epoxi o de poliéster. En este proyecto de investigación se tomara un material compuesto de fibras de carbono y vidrio en una matriz de epoxi.

Si bien el material compuesto Prepreg es un material nuevo que se está usando en la industria aeronáutica y automotriz consiste en una tecnología de refuerzos de fibra que se impregnan con una cantidad específica de resina epoxi, este sistema de resina epoxi ya incluye el agente de curado apropiado.

El mayor problema que tienen los materiales compuestos es su precio, lo que limita su uso extensivo. Este implica un desarrollo tardío y su uso en sectores limitados como la industria aeronáutica, aeroespacial o del automóvil. En el sector aeronáutico este material se está utilizando para el recubrimiento de alas y estabilizadores, así como del cuerpo del fuselaje, donde los larguerillos escogidos acostumbran a tener forma de T invertida.

Este proyecto de investigación se pretende caracterizar el material compuesto pre-preg bajo cargas de pandeo, usando la máquina universal de ensayos de la Universidad San Buenaventura –Bogotá. Esta práctica se debe llevar acabo primero adecuando la máquina para este tipo de pruebas, lo que conlleva diseñar un aditamento capaz de generar el soporte adecuado para el material a estudiar. Este estudio está bajo ciertas normativas como son la ASTM E2954-15, la cual indica las propiedades de compresión obtenidas por compresión

axial proporcionando información como lo es el módulo de elasticidad, tensión en el límite proporcional y resistencia a la compresión para el soporte final.

El documento organizado en 6 capítulos en los cuales el primer capítulo habla sobre la generalización del proyecto, en el capítulo dos se encuentra todo lo referente al marco teórico, en el capítulo tres se encuentra todo lo relacionado al diseño experimental, el capítulo cuatro comprende todo lo relacionado a los resultados obtenidos en las pruebas, el capítulo cinco tenemos el análisis de los resultados obtenidos del capítulo cuatro y finalizamos con el capítulo seis el cual tiene las conclusiones del proyecto.

1.2 Justificación

La presencia de los materiales compuestos dentro de la rama de la investigación en materiales toma una importancia bastante grande debido a sus múltiples usos en la ingeniería, que bien sabido forman parte del desarrollo de nuevas ideas en procesos de maquinado de la industria.

Con este proyecto de investigación se quiere presentar un desarrollo experimental para estudiar el comportamiento mecánico del material compuesto pre-preg sometido a cargas de pandeo. Este material estará caracterizado en probetas de estudio, estas probetas serán de material pre-impregnado de carbono y vidrio, este material se debió importar dado que en el país todavía no se trabaja a profundidad lo cual genera un incremento en el costo del estudio.

Al realizar la investigación del comportamiento del material preimpregnado sometido a cargas de pandeo, se puede evidenciar que a nivel nacional no existen estudios para este tipo de material, con lo cual este proyecto se puede tomar como base para futuros proyectos de investigación para la universidad San Buenaventura, dado que comprende el estudio del comportamiento del material pre-preg bajo cargas de pandeo teniendo en cuenta la orientación de la fibra y tipo de material.

1.3 Objetivo General

Caracterizar mecánicamente material compuesto “Pre-preg” en tres orientaciones diferentes (0° , 45° y 90°), con dos tipos de fibras bajo cargas de pandeo.

1.3.1 Objetivos específicos

- Adecuar mecánicamente la máquina Universal de Ensayos de la Universidad San Buenaventura – Bogotá ubicada en el edificio Fray Rogelio Bacon.
- Realizar las pruebas de pandeo en láminas de material compuesto prepreg.
- Estudiar la influencia de las tres orientaciones (0° , 45° y 90°) en el esfuerzo crítico soportado para cada probeta.
- Analizar la influencia de los dos tipos de fibras (Carbono y Vidrio) en el esfuerzo crítico soportado por cada probeta bajo la normativa ASTM E2954-15.
- Verificar el modo de falla de cada una de las probetas.

1.4 Alcances

- Las pruebas de pandeo se realizarán solo en tres orientaciones 0° , 45° y 90°
- Las probetas de ensayo se realizarán solo en dos tipos de fibras. Prepreg Unidireccional Carbon Fabric 9.0oz/sq 12k y Prepreg 7781 E-Glass.
- Se fabricarán probetas de acuerdo al diseño experimental planteado o bajo lo estipulado en la norma ASTM E2954 -15.
- De acuerdo a la norma ASTM E2954-15 se determinará la resistencia a la compresión, la primera fase de deformación bajo el esfuerzo crítico y encontrar donde ocurre el primer pandeo elástico (Elastic Bucklig).
- El tipo de carga a la cual estarán sometidas las probetas será axial con respecto a la norma ASTM E2954-15.
- El método de ensayo de acuerdo a la normativa ASTM E2954-15 no aborda los efectos de temperatura.
- Se adecuará la máquina Universal de Ensayo de la Universidad San Buenaventura-Bogotá Tinius Olsen H-300 para las pruebas de pandeo con base en normatividad aplicable.
- Solo se obtendrán gráficas de máxima compresión soportada en el material.

1.5 Limitaciones

- El diseño de la mordaza está sujeta a las dimensiones de la máquina Universal de Ensayo disponible en la Universidad San Buenaventura- Bogotá Tinius Olsen H-300.
- No se tendrá en cuenta las mediciones y recolección de datos por compresometro y deflectometro, puntos 6.5 y 6.6 de la norma ASTM E2954-15.
- El diseño de la mordaza está sujeta a la consecución de los materiales que se adecuen a las prácticas que se realizarán en la máquina Universal de Ensayo disponible en la Universidad San Buenaventura- Bogotá Tinius Olsen H-300.
- La aplicación de la carga va a estar restringida a la forma de sujeción con las mordazas, la cual será anclada (Pinned), lo que restringirá una carga longitudinal no excéntrica y se utilizará aditamentos de retención lateral.
- No se tendrá en cuenta el almacenamiento del material, dado que la característica de estos permite un almacenamiento a temperatura ambiente.
- No se controlará la temperatura de las probetas al momento de las pruebas, dado que la norma ASTM E2954-15 no la aborda.
- Los costos de los materiales tienen una limitante de \$1.500.000, del cual el 30% está destinado para imprevistos.

1.6 Antecedentes

- **Cálculo de la carga de pandeo elástico de las estructuras de los datos experimentales:** las características de $\rho - \delta$ se analizan las curvas de ensayo de una estructura de pandeo. Se presenta un método para deducir la carga de pandeo de la estructura por medio del concepto de curvatura máxima y se establece la ecuación correspondiente. Se demuestra que el método es preciso y sencillo comparando los valores teóricos con los valores medidos experimentalmente de los ensayos de estabilidad elástica de los montantes y los bastidores. Las cargas de pandeo se pueden calcular directamente con la fórmula cuando no se permiten experimentos de falla de las estructuras y modelos (Zhou, 2005).
- **Laminado de bajo calibre dañado por impacto de pandeo:** Una región impactada de un compuesto laminado es caracterizada por la deformación del laminado alrededor de una región central de fibras rotas. La deformación del laminado ocurre por el grosor el cual aumenta en el tamaño hacia la superficie trasera. Esto da lugar a un pandeo de la placa y una pérdida fatal de resistencia residual. Se realizó un análisis de estabilidad de forma cerrada para el caso de cargas de compresión axial. Se encontró que las deformaciones de pandeo críticas se ajustan a una ley análoga del pandeo clásico de placas, se observa una fuerte deformación de las capas del laminado central (Marshall, 1988).

- **Diseño de laminados para una máxima resistencia al pandeo y peso mínimo:** El algoritmo (GA) y el algoritmo de competencia (ICA) son dos algoritmos de optimización que se emplean en este procedimiento de optimización y comparación de los resultados. También, fue analizado y estudiado el efecto de las propiedades de los materiales sometidos a cargas de pandeo. El presente estudio se dedica al uso del algoritmo para buscar las capas de material compuesto laminado bajo carga de compresión axial. El número de capas y la orientación de las fibras en cada capa se seleccionada como variables de diseño. El procedimiento de optimización se formuló con el objetivo de encontrar el punto máximo de pandeo por unidad de peso. Este estudio demuestra el efecto que causa el aumentar el número de capas en los laminados compuestos sometidas a cargas de pandeo (Khong, 1999).
- **El efecto de las ranuras en el comportamiento de pandeo y posterior al pandeo de placas laminadas:** Un estudio experimental se realizó para evaluar el efecto de las ranuras laterales en la respuesta de pandeo y la respuesta posterior al pandeo. Las ranuras causaron cambios locales en la distribución de la deformación fuera del plano cerca de la ranura. Las ranuras ubicadas centralmente no afectaron las cargas de rotura o modos de fallo de las placas. Para una ubicación de la ranura ligeramente desplazada, no se observó interacción de deformaciones fuera del plano (Gürdal, 1985).
- **Dr. Donald F. Adams.** Presidente de Wyoming Prueba de accesorios Inc, Utah, pandeo de especímenes de compresión de material compuesto, investigación sobre el pandeo en materiales compuestos, incluyendo los comités de métodos de ensayo de la norma ASTM, se ha demostrado que es probable que sea una buena práctica

añadir un 10 a 20 por ciento al espesor estimado como un factor de seguridad en pruebas de pandeo para materiales compuestos, ya que la falla de estos en pruebas de pandeo no es visible (Adams, 2014).

- **Diseño de elementos estructurales sometidos a flexo-compresión:** Desarrollo teórico y estudio comparativo, El análisis de un elemento flexo-comprimido es más complicado que el de un elemento sometido a compresión pura o a flexión pura porque involucra los problemas de estabilidad de una columna como el pandeo de flexión, el pandeo torsional o el pandeo flexo-torsional; y los problemas de flecha y de estabilidad de una viga como el pandeo lateral. Otra problemática que se presenta en el diseño de vigas y elementos flexo- comprimidos, es la falta de valores disponibles del factor de momento uniforme equivalente de pandeo lateral (FMUE), especialmente en los casos cuando el alabeo y la flexión lateral son impedidos en los enlaces del elemento (Addison Montoya, 2015).
- **Comportamiento de falla de compuestos de fibra de carbono / epoxi en la prueba de pandeo doblado con punta de alfiler:** Se probaron muestras de fibra de carbono / epoxi T300 con orientación unidireccional y en capas cruzadas, también se toman muestras de epoxi tejido G802 en un equipo con extremos puntiagudos en diversas geometrías. La plataforma de prueba fue diseñada para ese fin. La combinación de flexión y compresión fue posible. Iniciación del módulo de falla las secuencias monitoreadas y establecidas a través de fotografías. En algunas geometrías se observaron cepas de alta compresión del orden de -1.85% para las pruebas con pin-ended, acompañadas de una mayor capacidad de carga que las pruebas de doblez convencionales.

Los análisis de caracterización y falla de fracturas se llevaron a cabo con el microscopio electrónico de barrido (K. Padmanabhan, 1995).

- **Ensayo a compresión de laminados unidireccional carbono/epoxy. un estudio comparativo,** El ingeniero Rafael Cano López en su proyecto de grado realizo un estudio el cual se centra en la realización de ensayos a compresión sobre laminados unidireccionales carbono/epoxi de 2 mm de espesor. Este proyecto se puede interpretar como un barrido a través de diferentes normativas y configuraciones de ensayos a compresión para los CFR (Carbon Fibre Reinforcement), centrándose en las normativas más usadas para la caracterización a compresión de materiales compuestos en Europa (PrEn2850-B, ASTM D6641-B, AITM1-0008). Dentro de la AITM1-0008 se han realizado diferentes configuraciones de ensayo para ver cómo puede verse afectada la caracterización del material con el cambio de la condiciones de contorno. El posicionamiento del tacón con respecto al final de mordazas (dentro, fuera o ras) o el uso de mordazas con Soft-load (López, 2014).

1.7 Normas

- **ASTM D3410/D3410M – 16:** Este método de prueba determina las propiedades de compresión en el plano de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras de alto módulo. Las formas del material compuesto están limitadas a compuestos de fibras continuas o fibras discontinuas para las cuales las propiedades elásticas son especialmente ortotrópicas con respecto a la dirección de la prueba. Este procedimiento de prueba introduce la fuerza de compresión en la muestra a través de la cizalla en las interfaces de agarre en cuña.

Este tipo de transferencia de fuerza difiere del procedimiento en el Método de prueba D 695 donde la fuerza de compresión se transmite al espécimen por carga axial, método de prueba D 6641 / D 6641M donde la fuerza de compresión se transmite por cizalla combinada y carga final (D3410M-16, 2016).

- **ASTM E2954 – 15:** Las propiedades de compresión obtenidas por compresión axial proporcionarán información tal como: módulo de elasticidad, tensión en el límite proporcional y resistencia a la compresión para el soporte final, y condición de arriostamiento lateral probada. Este método de prueba aborda únicamente muestras de tamaño completo para la determinación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de compresión destinada a aplicarse a miembros de longitud real con condiciones de extremo y arriostamiento lateral según lo previsto (E2954, 2015).

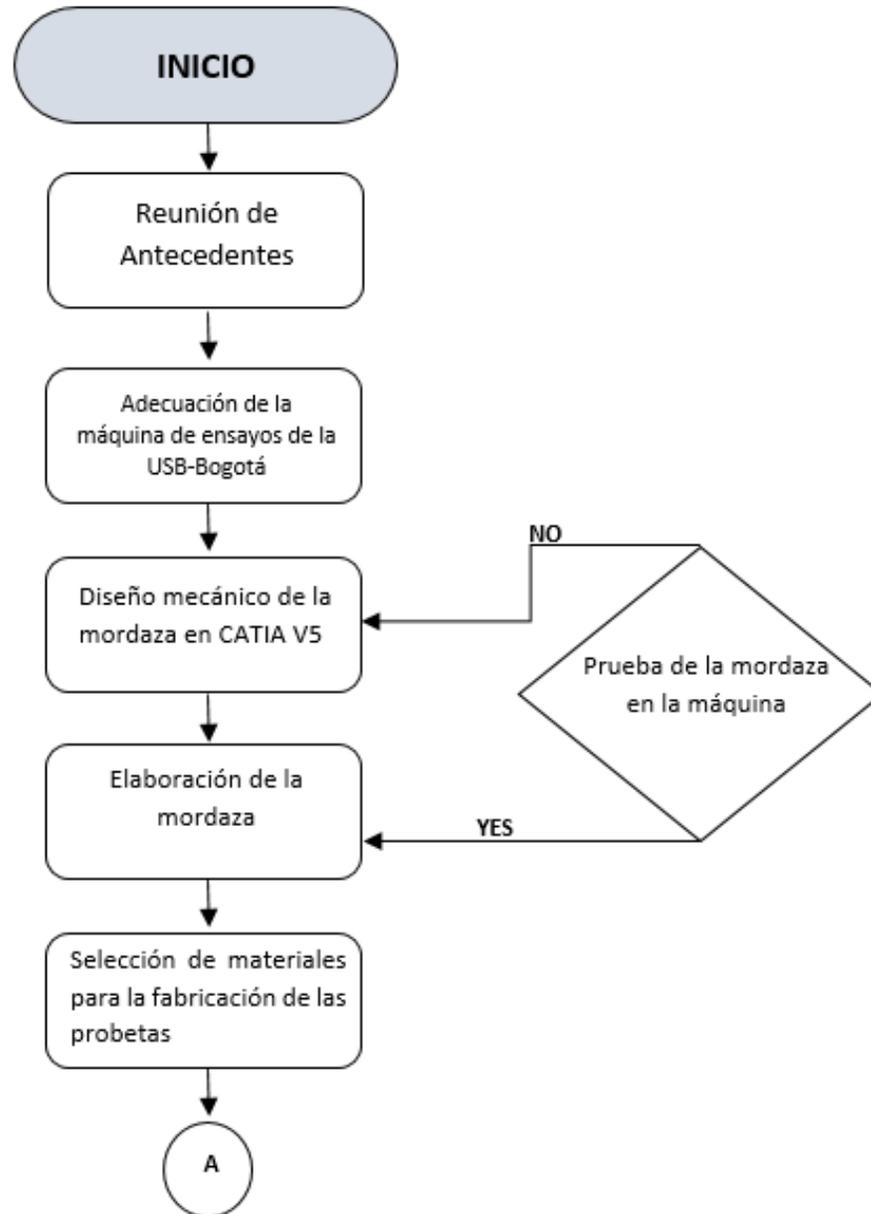
1.8 Descripción y formulación del problema

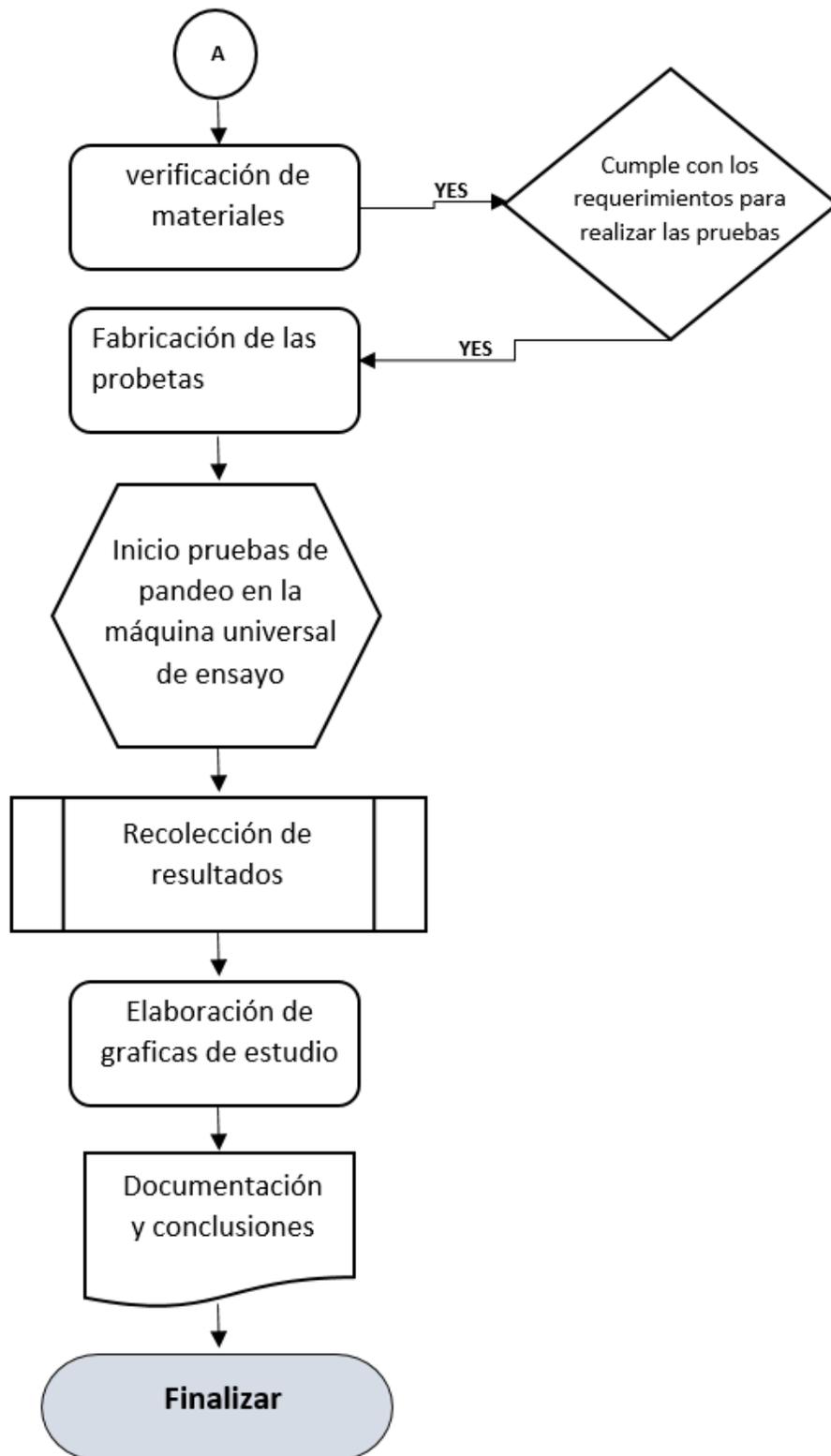
Los materiales compuestos han sido estudiados por sus propiedades mecánicas y físicas, así también en lo relacionado a sus procesos de producción. Las fibras de carbono y vidrio son cada vez más utilizadas en diversas aplicaciones, que pueden ir desde muy básicas hasta avanzadas debido a su elevada resistencia mecánica y a la posibilidad de que pueden ser empleadas como material de refuerzo.

Con el estudio de pandeo en probetas de material pre-preg de carbono y vidrio se quiere observar cual es la influencia entre el ángulo y el coeficiente sobre el esfuerzo e identificar cuál es su punto de falla.

¿Cómo describir el esfuerzo crítico en material compuesto Pre-preg sometido a cargas de Pandeo?

1.9 Metodología





II. MARCO TEÓRICO

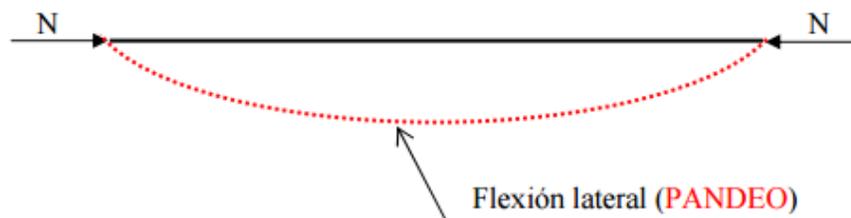
En esta sección se dará a conocer la teoría básica de pandeo y pandeo en materiales compuestos, también se podrá estudiar la influencia de la carga crítica en este tipo de materiales. Como material compuesto a estudiar será el pre-preg de vidrio y carbono características y manipulación. Todo este estudio será realizado con una máquina universal de ensayos Tinius Olsen.

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Pandeo Los diferentes elementos que conforman una estructura pueden fallar por diferentes motivos, dependiendo de los materiales utilizados, las cargas a las que esté sometida la estructura, apoyos, ligaduras. De aquí el principio de las pruebas de pandeo figura 2.1 en donde estos tipos de fallos se pueden evitar dimensionando dichos elementos de tal forma que las compresiones, tensiones y deformaciones máximas que se produzcan, permanezcan dentro de los límites admisibles y así efectuar los dimensionamientos a resistencia y rigidez de acuerdo a lo estudiado.

El fallo por inestabilidad o pandeo, que tiene lugar en los elementos o estructuras que están sometidos a compresión, puede aparecer una flexión lateral que puede ser grande y puede causar la falla en el elemento o estructura (Santillana, 2008).

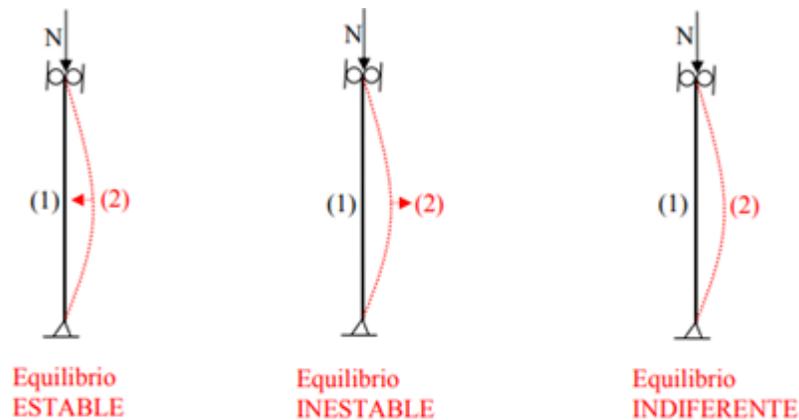
Figura 2.1 Pandeo



Fuente: (Santillana, 2008)

2.1.2 Estudio teórico del pandeo de piezas sometidas a compresión Las piezas sometidas a pandeo se pueden clasificar en dos tipos, piezas simples que están constituidas por un solo perfil o piezas compuestas que están constituidas por varios perfiles como chapas unidas mediante tornillos o soldadura figura 2.2. Así si se tiene una pieza simple sometida a una fuerza N de compresión y se encuentra en equilibrio, en donde este puede ser Estable, Inestable o Indiferente (Santillana, 2008).

Figura 2.2 Equilibrios de Compresión



Equilibrio Estable: si al separarla un poco, a la pos. (2) y soltar, vuelve a la pos.(1)
 Equilibrio Inestable: si al separarla un poco, a la pos. (2) y soltar, se aleja de la pos.(1)
 Equilibrio Indiferente: al separarla un poco, a la pos. (2) y soltar, se queda en la pos.(2)

Fuente: (Santillana, 2008)

2.1.3 Cálculo del valor de la carga crítica Euler (N_{cr}) El valor de la carga crítica N_{cr} está definida de la siguiente manera:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2}$$

Ecuación 2.1 Carga Crítica

Fuente: (Santillana, 2008)

Para obtener la ecuación de la carga crítica, se presupone de forma cualitativa en que esta presentara pandeo. El método de Euler plantea una columna empotrada en su base y en el otro extremo libre, y así si propone resolver la ecuación de la curva estática bajo las siguientes condiciones:

$$\frac{d^2w(h)}{dh^2} + \frac{Pw(h)}{E.I} = \frac{P\delta}{EI}$$

La solución de esa ecuación, en función del parámetro de desplazamiento horizontal del pilar, resulta ser:

$$w(h) = \delta \left[1 - \cos \left(h \sqrt{\frac{P}{E.I}} \right) \right]$$

Fuente: (Santillana, 2008)

La condición de contorno en el extremo superior (donde $h = H$ y $W_{sup} = \delta$) solo se cumple para ciertos valores de P, que cumplen:

$$H \sqrt{\frac{P_n}{E.I}} = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad n \in Z$$

El menor de estos valores es precisamente el valor aceptado para la carga crítica de Euler de una columna empotrada en una de sus bases y libre en la parte superior.

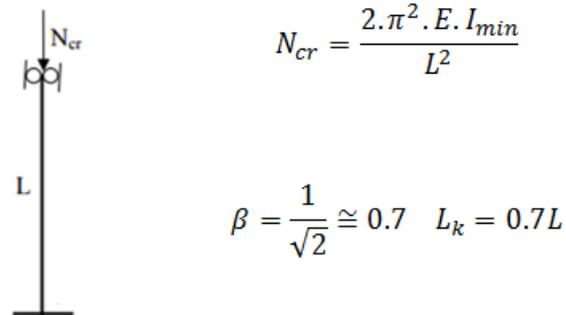
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(2H)^2}$$

Dónde:

$$L_k = 2H$$

Siendo La carga crítica N_{cr} directamente proporcional a la Elástica del material compuesto y de la inercia y también inversamente Proporcional a la Longitud de Pandeo figura 2.3 L_k La cual depende del tipo de apoyo de la columna en sus extremos (Santillana, 2008)

Figura 2.3 Longitud de Pandeo



Fuente: (Santillana, 2008)

2.1.4 Pandeo en aeronaves El ala es considerada uno de los mayores logros de la ingeniería aeronáutica. Combina en un sólo componente una estructura eficiente, un componente multifuncional y una ligereza asombrosa (Gallo, 2011).

El diseño alar se basa en la tecnología semi-monocasco, con la nueva generación de materiales compuestos la fabricación de la estructura empieza por piezas integradas (larguerillos revestimientos) pero los componentes (aunque integrados en una pieza) siguen siendo distinguibles.

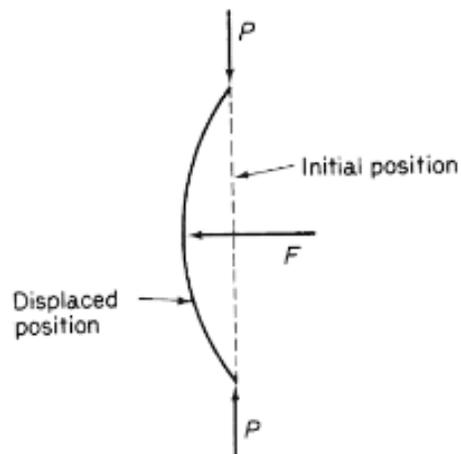
De acuerdo a experimentos que se llevaron a cabo en columnas de aleación de aluminio para la industria aeronáutica, como resultado evidenciaron que la carga real del pandeo fue casi igual a la carga del módulo tangente. Mostrando que después de alcanzar la carga del módulo tangente la tensión se concentraba y aumenta en el lado cóncavo de las columnas.

Las cargas de pandeo en aeronaves se han predicho con formulación empírica en vista de la poca diferencia de estas y el realizar prácticas para evaluar las cargas e pandeo y los módulos (k), se prefiere realizar dichas prácticas para definir las cargas críticas y dichos módulos.

Megson (2013) Define Una gran proporción de la estructura de una aeronave consiste en finas telas endurecidas por esbeltos largos o largueros. Ambos son susceptibles al fallo por pandeo con un esfuerzo de pandeo o un esfuerzo crítico, que está frecuentemente por debajo del límite de proporcionalidad y rara vez es apreciablemente superior al límite de elasticidad del material. Claramente para este tipo de estructura, el pandeo es el modo más crítico de falla. De modo que la predicción de las cargas de pandeo de las columnas, los paneles delgados y rígidos es extremadamente importante en el diseño de la aeronave.

La teoría de pandeo en columnas realizada por Euler en donde una columna que es sometida a una carga P figura 2.4, acortará su longitud sin importar el valor de la carga P . Entonces para los valores de la carga P que estén por debajo de la carga crítica darán como resultado el retorno de la columna a su posición inicial (Megson, 2013).

Figura 2.4 Pandeo



2.2 Prepreg

Es el término común para un tejido de refuerzo que ha sido pre-impregnado con un sistema de resina. Este sistema de resina (típicamente epoxi) ya incluye el agente de curado apropiado. Como resultado, el preimpregnado está listo para colocarse en el molde sin la adición de más resina. Para que el laminado se cure, es necesario usar una combinación de presión y calor.

Los preimpregnados son generalmente utilizados por fabricantes experimentados que están interesados en minimizar el peso de su parte. Las aplicaciones típicas incluyen aeroespacial, carreras, artículos deportivos, recipientes a presión y productos comerciales (Glast, 2017).

2.2.1 Prepreg unidireccional de carbón 9.0oz/sq - 12K: El sistema de resina con el agente de curado ha sido pre-impregnada en el tejido con un ideal relación de 37% de fuerza-a-peso, con un módulo de elasticidad de 700Mpa con resultados repetibles de alta calidad. Esta tela como se ve en la figura 2.5 viene en una presentación de yarda cuadrada 9,0 oz.

Los hilos de urdimbre y relleno corren a 0° y 90° respectivamente. Por lo tanto, las telas son anisotrópicas o fuertes solo en dos direcciones. Las telas deben estar orientadas para que los hilos de la fibra corran paralelos a las cargas esperadas (Glast, 2017).

Tabla 2.1 Características material Carbono

Características específicas del producto	
Deformación del material	12k Multifilament Continuous Tow (número de filamentos utilizados en cada trenza)
Relleno del material	12k Multifilament Continuous Tow (número de filamentos utilizados en cada trenza)
Patrón de tejido	2 x 2 Twill
Peso regional de la tela	9.0 oz/ yd ² (305 gsm aprox.)
Deformación final	13.0 ± 1.0
Espesor nominal	0.12 inches
Ancho de la tela	11.81 ± .25/-0 inches
Largo de la tela	3 metros
Características de resina (EPOXI)	
Densidad (g / cc)	1.21
Tg (temperatura transición) (° F / ° C) (desde la curva G "DMA)	255 / 124
Módulo de tensión (ksi / GPa) 410 / 2.8	410 / 2.8
Resistencia a la tracción (ksi / MPa)	11.5 / 79.0
Elongación en ruptura (%)	4.5
Tg (temperatura transición) después de hervir agua a 24 horas (° F / ° C)	169 / 76*
Absorción de agua%	3.9*

Figura 2.5 Pre-peg de Carbono unidireccional 9.0 oz 12K



Fuente: (Glast, 2017)

2.2.2 Prepreg 7781 E-Glass: En la figura 2.6 se observa la tela de fibra de vidrio que el fabricante Fibre Glast ofrece 7781 E-Glass, parte # 543, pre-impregnado con un sistema de resina epoxi de alta resistencia formulado para el flujo máximo y porosidad mínima en la superficie, módulo de elasticidad 610Mpa. Este contenido de resina casi perfecta maximiza

las propiedades de la tela de fibra de vidrio, a menudo elegido para aplicaciones estructurales aeroespaciales, hace que la fabricación de piezas sean repetibles y uniformes.

La fibra de vidrio se utiliza con frecuencia para aplicaciones estructurales aeroespaciales y ofrecen excelentes características de resistencia y de superficies (Glast, 2017).

Tabla 2.2 Características material Vidrio

Características específicas del producto	
Estilo	7781
Termina	627
Patrón de tejido	8h
Descripción del hilo	deformación: ECDE 75 1/0
	rellenar: ECDE 75 1/0
Peso	8.95 oz/yd 2
Largo de la tela	3 metros
Características de resina limpia (EPOXI)	
Densidad (g / cc)	1.21
Tg (temperatura transición) (° F / ° C) (desde la curva G "DMA)	255 /124
Módulo de tensión (ksi / GPa) 410 / 2.8	410 / 2.8
Resistencia a la tracción (ksi / MPa)	11.5 / 79.0
Elongación en ruptura (%)	4.5
Tg (temperatura transición) después de hervir agua a 24 horas (° F / ° C)	169 / 76*
Absorción de agua%	3.9*

Figura 2.6 Pre impregnado 7781 E-Glass



Fuente: (Glast, 2017)

En la tabla 2.3 se observan algunas de las ventajas y desventajas que tiene este tipo de material que deben ser consideradas al momento de adquirirlo.

Tabla 2.3 Ventajas y Desventajas pre-preg

VENTAJAS	Propiedades de resistencia máxima. En una bandeja manual, es difícil lograr un 50% de contenido de resina. Esto significa que el peso del laminado terminado es de 50% de tela y 50% de resina.
	A mayoría de los preimpregnados contienen alrededor del 35% de resina. Esto es ideal para las propiedades curadas máximas y generalmente imposible de lograr en la laminación manual normal.
	Uniformidad y repetibilidad de la pieza Sin las trampas de las técnicas de laminación humana, no habrá áreas ricas en resina ni puntos secos.
	El espesor será uniforme y cada parte que sale del molde tiene una probabilidad teórica de ser idéntico. Todavía hay un margen de error en las técnicas de embolsado al vacío, manipulación, etc.
	Los tejidos unidireccionales añaden fuerza en una sola dirección
	Sin defectos de superficie, hacia el exterior después del curado
	Diseñado para ser almacenado, transportado y manejado a temperatura ambiente-no requiere refrigeración
	Contenido de resina 30%, +/- 2%.
	Ideal para la fabricación de piezas de alta resistencia que no necesitan para soportar altas temperaturas (hasta 300 ° F)
	12 meses de vida útil a 75 ° no requiere refrigeración.
DESVENTAJAS	Los pre-preg son caros. Incluso cuando suma el costo de la resina, el curado y la tela, los productos preimpregnados aún cuestan más.
	Duración. Esto es un problema menor ya que los preimpregnados de Fiber Glast se pueden almacenar hasta un año a temperatura ambiente. No obstante, el prepreg curado con calor y el almacenamiento a temperaturas más cálidas reducirán la vida útil.

Fuente: (Glast, 2017)

2.2.3 Condiciones del Almacenamiento del prepreg Algunos materiales considerados Prepreg son curados a temperaturas comprendidas entre 80 y 130 °C capaces de generar poca porosidad curando a vacío sin presión adicional, Los materiales pre impregnados requieren almacenamiento en congelador de -20°C (Glast, 2017).

2.3 Máquina universal de ensayo

Es una máquina en la cual se realizan ensayos de tracción o de compresión a un material para caracterizar sus propiedades.

La presión que ejerce esta máquina es lograda por placas y todo el sistema hidráulico, tiene un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta, midiendo en forma gráfica la deformación y la carga al momento de sus rupturas. La principal función de la máquina es comprobar la resistencia de cierto tipo de materiales.

Los diferentes tipos de ensayos que se realizan en la máquina universal son: tracción, compresión, cizalladura, flexión, pelado, desgarramiento, cíclico, ductilidad a la flexión y algunas propiedades evaluadas son la elasticidad y dureza.

2.3.1 Máquina Tinius Olsen 300 Universidad San Buenaventura-Bogotá: En los equipos Tinius Olsen es posible llevar a cabo pruebas sobre materiales tales como polímeros, textiles, gomas, adhesivos y alimentos. Todas las pruebas están diseñadas por Tinius Olsen de acuerdo con normas internacionales de ensayo, incluyendo ISO, ASTM, EN y otras normas industriales.

Para realizar las pruebas de pandeo en la máquina universal de ensayos en primera instancia se debe diseñar un aditamento el cual permita realizar las pruebas de pandeo, el diseño de este aditamento se debe enfocar en el agarre ya que este es el punto clave para que la pieza a ensayar no se deslice.

2.4 Como se debe realizar un diseño experimental

¿Qué es?

El diseño experimental permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manejan una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés.

¿Cómo se define?

1. De acuerdo a la norma ASTM 2954-15 sugiere definir el diseño experimental bajo la norma ASTM D2915 la cual establece el paso a paso para desarrollar el diseño experimental y así obtener el número de réplicas a fabricar por combinación

2. Especificar las medidas con que se trabajará, el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades. Diseño factorial un experimento factorial completo es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno con distintos valores o niveles, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles en todo los factores.

3. Ejecutar un experimento piloto.

4. Especificar el modelo.

5. Esquematizar los pasos del análisis.

6. Determinar el tamaño muestra.

7. Revisar las decisiones anteriores. Modificarlas si se considera necesario (Vilar, 2006).

2.5 ANOVA o análisis de varianza

¿Qué es una ANOVA?

Un ANOVA o análisis de varianza prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Software, 1972).

¿Para qué sirve?

El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una manera de determinar si los grupos son todos parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes.

Para ejecutar un ANOVA, debe tener una variable de respuesta continua y al menos un factor categórico con dos o más niveles. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que sigan una distribución aproximadamente normal con varianzas iguales entre los niveles de factores (Software, 1972).

¿Cuándo usar ANOVA de un factor?

Se usa ANOVA de un factor cuando se quiere saber si las medias de una variable son diferentes entre los niveles o grupos de otra variable. Por ejemplo, si compara el número de hijos entre los grupos o niveles de clase social: los que son clase baja, clase trabajadora, clase media-baja, clase media-alta y clase alta. Es decir, se comprueba mediante ANOVA si la variable “número de hijos” está relacionada con la variable “clase social”. Concretamente, se analizará si la media del número de hijos varía según el nivel de clase social a la que pertenece la persona.

Condiciones:

- En ANOVA de un factor solo se relacionan dos variables: una variable dependiente (o a explicar) y una variable independiente (que en esta técnica se suele llamar factor)
- La variable dependiente es cuantitativa (escalar) y la variable independiente es categórica (nominal u ordinal).
- También que las varianzas (es decir, las desviaciones típicas al cuadrado) de cada grupo de la variable independiente sean similares. Aunque esto es lo ideal, en la realidad cuesta de cumplir, e igualmente se puede aplicar ANOVA (Cardenas, 2015).

¿Qué estadísticos se calculan en ANOVA?

Al aplicar ANOVA de un factor se calcula un estadístico o test denominado F y su significación. El estadístico F o F-test (se llama F en honor al estadístico Ronald Fisher) se obtiene al estimar la variación de las medias entre los grupos de la variable independiente y dividirla por la estimación de la variación de las medias dentro de los grupos.

El cálculo del estadístico F es algo complejo de entender, pero lo que hace es dividir la variación entre los grupos por la variación dentro de los grupos. Si las medias entre los grupos varían mucho y la media dentro de un grupo varía poco, es decir, los grupos son heterogéneos entre ellos y similares internamente, el valor de F será más alto, y por tanto, las variables estarán relacionadas. En conclusión, cuanto más difieren las medias de la variable dependiente entre los grupos de la variable independiente, más alto será el valor de F. Si hacemos varios análisis de ANOVA de un factor, aquel con F más alto indicará que hay más diferencias y por tanto una relación más fuerte entre las variables.

La significación de F se interpretará como la probabilidad de que este valor de F se deba al azar. Siguiendo un nivel de confianza del 95%, el más utilizado en ciencias sociales, cuando la significación de F sea menor de 0,05 es que las dos variables están relacionadas. (Cardenas, 2015)

¿Cómo se interpreta F (Fisher) calculado y la significación?

Significación: Si es menor de 0,05 es que las dos variables están relacionadas y por tanto que hay diferencias significativas entre los grupos.

Valor de F: Cuanto más alto sea F, más están relacionadas las variables, lo que significa que las medias de la variable dependiente difieren o varían mucho entre los grupos de la variable independiente (Cardenas, 2015).

¿Qué es una hipótesis nula y alternativa?

Las hipótesis nula y alternativa son dos enunciados mutuamente excluyentes acerca de una población. Una prueba de hipótesis utiliza los datos de la muestra para determinar si se puede rechazar la hipótesis nula (Software, 1972).

Hipótesis nula (H₀): La hipótesis nula indica que un parámetro de población (tal como la media, la desviación estándar, etc.) es igual a un valor hipotético. La hipótesis nula suele ser una afirmación inicial que se basa en análisis previos o en conocimiento especializado.

Hipótesis alternativa (H₁): La hipótesis alternativa indica que un parámetro de población es más pequeño, más grande o diferente del valor hipotético de la hipótesis nula. La hipótesis alternativa es lo que usted podría pensar que es cierto o espera probar que es cierto.

2.6 Fractura material compuesto

Los materiales compuestos de fibra larga generalmente están diseñados para tener una firmeza y resistencia axial alta. En consecuencia, las fibras están hechas de un material fuerte y rígido tal como grafito o sílice; la matriz tiene una dureza mucho mayor y una menor resistencia que las fibras para dotar al compuesto de una estancia y ductilidad en el plano adecuadas. La resistencia a la compresión axial del compuesto es usualmente relativamente baja, ya que la mayoría de los mecanismos individuales de falla compresiva están dictados por las propiedades de la matriz. Los principales mecanismos competitivos de falla compresiva se describen como (Wu., 1997).

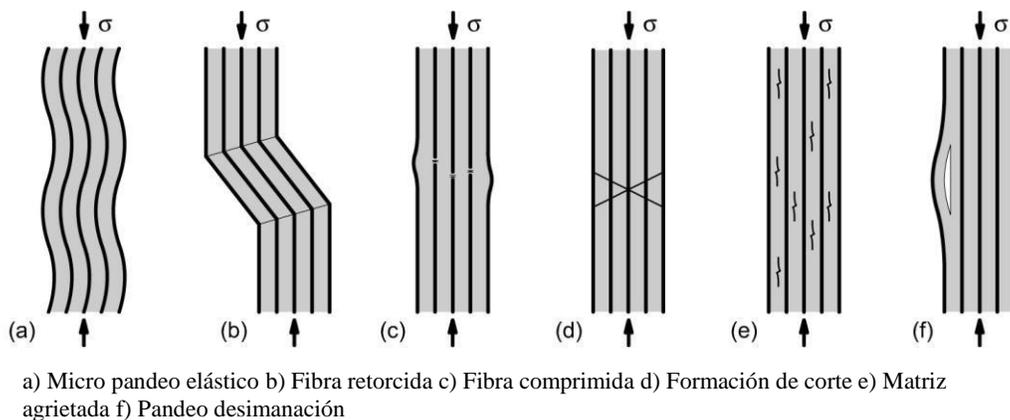
- Micro pandeo elástico: Esta es una inestabilidad de pandeo por cizalla y la matriz se deforma en cizalla simple.
- Contorsión de la fibra: Esto es inestabilidad de corte que ocurre en cepas suficientemente grandes para la reforma de matriz de forma no lineal.
- Trituración de fibra: El fallo ocurre en el nivel de la fibra de la escala debido a una inestabilidad de cizalla, como el pandeo dentro de la fibra, a menudo se asocia con el hecho de que las fibras en sí mismas son microlímites que comprenden fibras onduladas incrustadas en una matriz suave.
- Agrietamiento de matriz: La matriz se fisura paralela a la dirección principal de la fibra axial. Se asiste con una baja tenacidad de la matriz.
- Deslaminación de la hebilla: Esto ocurre al pandeo de una capa de superficie desde un desprendimiento de superficie. Se observa tanto en matriz de matriz cerámica como en compuestos de matriz. La resistencia a la compresión posterior al impacto es a menudo una preocupación en el uso de

materiales compuestos, ya que el evento de impacto conduce a un desprendimiento grande. La carga de compresión posterior puede reducir el crecimiento de deslaminación de la hebilla. La deslaminación de la hebilla está asociada con una baja tenacidad de la matriz y la presencia de un gran defecto sub-superficial.

- Formación de banda de corte: El rendimiento y la fractura de la matriz se producen en una banda, orientada a aproximadamente 45° con respecto al eje de carga (Wu., 1997).

La falla de los compuestos es una combinación de mecanismos de falla competitivos. Esto se debe a la falta de homogeneidad de los materiales compuestos donde la falla puede ocurrir en cualquiera de los componentes o por la interacción entre ellos. Dependiendo de los componentes, las interfaces y los escenarios de carga, los diferentes mecanismos de falla pueden conducir a la falla del material (O.T. Thomsen, 2010).

Figura 2.7 Modos de falla de compresión de compuestos de fibra



Fuente: (O.T. Thomsen, 2010)

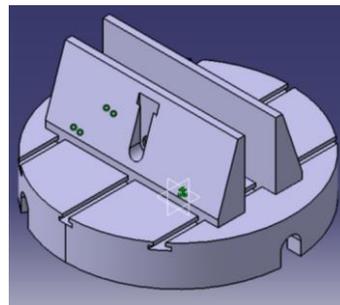
Los parámetros principales que representan la resistencia a la compresión de los materiales compuestos son el ángulo de desalineación de la fibra, la resistencia a al cizalla y el módulo de cizalla del material compuesto. Al aumentar la desalineación de la fibra, el modo de falla cambiará a micro pandeo o deformación de fibra plástica. El módulo de corte puede aumentarse cambiando o modificando el sistema de resina, lo que también podría mejorar la resistencia al corte. Si es así, el modo de falla puede cambiar a compresión de fibra. La mayoría de los materiales compuestos fallan por microcortes del plástico o contorsión de fibra (O.T. Thomsen, 2010).

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para tomar la decisión de cuál es la propuesta que más se ajusta al proyecto, se plantea dos diseños de aditamentos.

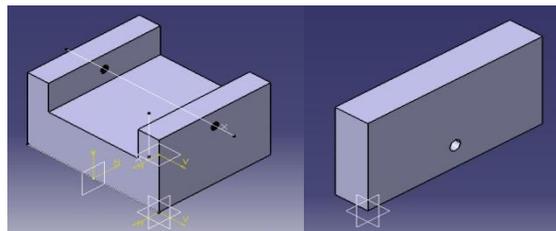
Diseño 1: Este diseño figura 3.8 consta de 1 tapa base y una tapa superior, las cuales irán ensambladas en los aditamentos que está disponible en el laboratorio de la máquina universal de ensayos, estas tapas tienen 3 canales en cola de milano por los cuales se ensamblarán 2 pinzas que cumplirían el objetivo de prensar la probeta para evitar cualquier movimiento.

Figura 3.8 Diseño 1



Diseño 2: El diseño figura 3.9 consta de 2 bloques en forma de canal un bloque base y uno superior y 4 bloques rectangulares los cuales actúan como pinzas, estas están sujetas al bloque base mediante un tornillo sin fin.

Figura 3.9 Diseño 2



En el anexo A 3-2 se encuentran los planos del diseño 2

Se realiza una matriz de decisiones. Se establecen 4 requerimientos de diseño sugeridos.

Tabla 3.4 Asignación % de decisión

ASIGNACIÓN DE % DE DECISIÓN	ATRIBUCIÓN % DE DECISIÓN
Costo de fabricación 50%	Se establece el 50% ya que es una prioridad dentro del proyecto, siendo esta una limitación establecida dentro del proyecto.
Complejidad diseño 20 %	Se asigna un 20% a la complejidad del diseño está ligada a los costos y proceso de fabricación
Proceso de fabricación 20 %	Se establece un 20% en el proceso de fabricación ya que este implica el uso de herramientas especiales para el proceso
Tiempo de fabricación 10 %	Se asigna un valor menor al tiempo de fabricación de acuerdo a las horas hombres implementadas para obtener la pieza

Se calificara de dos en dos cada requerimiento, siendo 2 insatisfecho, 4 regular, 6 bueno y 8 excelente. Esto definido bajo las atribuciones planteadas anteriormente.

- COSTO DE FABRICACIÓN 50%

El grupo de ingeniería considera bajo las facilidades del mercado la adquisición del material y la mano de obra, que los costos de fabricación están designados entre un 20% material empleado, 20% mano de obra y 10% tiempo y herramientas de uso para la fabricación. Esto dando un total del 50%, los costos de fabricación deben estar entre un rango de \$ 400.000 a \$ 1.100.000

Tabla 3.5 Calificación de costos de fabricación

FACTOR DE CALIFICACIÓN	VALOR	DISEÑO 1	DISEÑO 2
Excelente (8)	\$ 200,000 - 400,000		
Bueno (6)	\$ 500,000 - 900,000		6
Regular (4)	\$ 1,100,000 - 1,500,000		
Insatisfecho (2)	\$ 1,600,000 - 2,000,000	2	

- COMPLEJIDAD DISEÑO 20 %

El grupo de diseño hace referencia a la practicidad de diseño referente al número de piezas que compone cada uno de los diseños.

Tabla 3.6 Calificación de complejidad de diseño

FACTOR DE CALIFICACIÓN	Complejidad de Diseño (número de piezas del aditamento)	DISEÑO 1	DISEÑO 2
Excelente (8)	1 a 6		8
Bueno (6)	7 a 10		
Regular (4)	11 a 16		
Insatisfecho (2)	16 a 20	2	

- PROCESO DE FABRICACIÓN 20 %

El requerimiento de proceso de fabricación hace referencia al número de herramientas utilizadas para el mecanizado de las piezas de cada uno de los aditamentos.

Tabla 3.7 Calificación de proceso de fabricación

FACTOR DE CALIFICACIÓN	Fabricación (número de herramientas a utilizar)	DISEÑO 1	DISEÑO 2
Excelente (8)	1 a 6		
Bueno (6)	7 a 10		6
Regular (4)	11 a 16		
Insatisfecho (2)	16 a 20	2	

- TIEMPO DE FABRICACIÓN 10 %

Hace referencia a las horas hombre y máquina empleados para la fabricación de los diseños planteados.

Tabla 3.8 Calificación de tiempo de fabricación

FACTOR DE CALIFICACIÓN	Horas Hombre y Máquina	DISEÑO 1	DISEÑO 2
Excelente (8)	6 - 12 HM		
Bueno (6)	13 - 24 HM		6
Regular (4)	25 - 48 HM		
Insatisfecho (2)	49 - 60 HM	2	

Asignados los valores de clasificación a cada una de los requerimientos de diseño se procede a realizar la matriz de decisión para seleccionar el diseño del aditamento que se acomoda según los criterios de diseño.

Tabla 3.9 Matriz de decisión

MATRIZ DE DECISIÓN PARA SELECCIONAR EL DISEÑO DEL ADITAMENTO			
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	PONDERADO %	DISEÑO 1	DISEÑO 2
Costo de fabricación	50	2	6
		100	300
Complejidad diseño	20	2	8
		40	160
Proceso de fabricación	20	2	6
		40	120
Tiempo de fabricación	10	2	6
		20	60
TOTAL	100	200	640

De acuerdo a la tabla 3.8 por matriz de decisión y análisis preliminar de ingeniería se selecciona el diseño 2. En el anexo A 3-1 se especifica cada uno de los aditamentos planteados y analizados bajo matriz de decisión. Para la fabricación del aditamento del diseño 2 se realizó los planos los cuales se encuentran en el anexo A 3-2, adicional se ejecutó un proceso de mecanizado el cual se encuentra especificado por hojas de operación para cada pieza del diseño de acuerdo al anexo A 3-3.

3.1 Proceso experimental

Para la elaboración de este proyecto se realizará el proceso de fabricación de probetas en material pre-impregnado en dos tipos de fibras diferentes (carbono Prepreg 12K y vidrio Prepreg 7781 E-Glass) ver tabla 2.1 y 2.2 estas probetas se fabricarán con el fin de realizar pruebas de pandeo y estudiar su comportamiento mecánico.

Se realizarán las pruebas de pandeo según la normativa ASTM E2954-15 (E2954, 2015) “Standard Test Method for Axial Compression Test of Reinforced Plastic and Polymer Matrix Composite Vertical Members”, la cual describe como debe ser el proceso para realizar correctamente el estudio de pandeo en materiales compuestos, sin embargo la norma sugiere la práctica ASTM-D2915 (D2915, 2017) “Standard Practice for Sampling and Data-Analysis for Structural Wood and Wood-Based Products” para poder determinar el número de réplicas o muestras.

Se fabricarán unas probetas para la prueba piloto de acuerdo a lo que se establece en la norma ASTM-D2915, para poder obtener el esfuerzo máximo de cada uno de los materiales. Después de obtener estos resultados se realizará un diseño experimental de acuerdo a la norma nombrada anteriormente y se obtendrá el número de repeticiones que serán necesarias para poder realizar las pruebas definitivas.

3.2 Medidas de probetas y tabs

La fabricación de las probetas figura 3.10 y 3.11, la probeta será montada en la máquina universal de ensayo de tal manera que la carga axial este perpendicular a la base (b) como es muestra en las figuras 3.10 y 3.11 estará dada bajo una prueba piloto de diferentes medidas y bajo dos coeficientes de relación entre base y altura.

Se define esta relación entre base y altura ya que hay una mayor probabilidad que se presente pandeo con facilidad cuando se tiene una altura mayor con respecto a su base, por tal motivo se decide establece un coeficiente de 1 y 1,5 los cuales se fabricaron con diferentes relaciones de medidas para poder obtener los esfuerzos máximos de cada material y realizar el diseño experimental bajo la norma ASTM D2915, y así obtener la cantidad de réplicas a fabricar por cada una de las combinaciones.

$$C = \text{Coeficiente}$$
$$C = a/b$$

Ecuación 3.2 Coeficiente

Donde **a** es la altura y **b** corresponde a la base de la probeta.

Se construye 1 probeta de cada combinación esto quiere decir que se tendrán 12 probetas en total, 1 por cada medida y combinación para realizar la prueba piloto. La combinación de las probetas tabla 3.10 está dada por el material, coeficiente y por el ángulo.

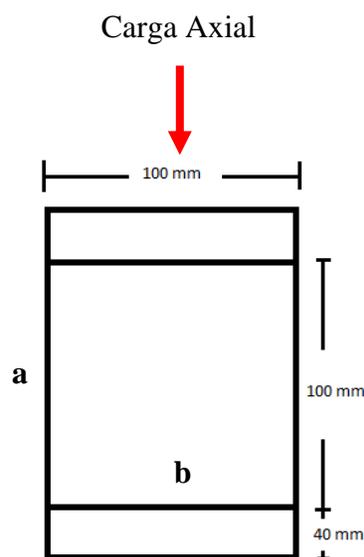
Tabla 3.10 Probetas

<i>Material</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Medidas C=a/B (mm)</i>	<i>Ángulo (grados)</i>
Carbono	1	10/10	0
Carbono	1	10/10	45
Carbono	1	10/10	90
Vidrio	1	10/10	0
Vidrio	1	10/10	45
Vidrio	1	10/10	90
Carbono	1,5	13.5/9	0
Carbono	1,5	13.5/9	45
Carbono	1,5	13.5/9	90
Vidrio	1,5	13.5/9	0
Vidrio	1,5	13.5/9	45
Vidrio	1,5	13.5/9	90

La medida de los tabs está basadas bajo la norma ASTM D-3039 en las figura 3.10 y 3.11 se encuentran las dimensiones de las probetas con los tabs. La medida de los tabs será la que se utilizará para diseñar el agarre del aditamento de la máquina, esto con el fin de evitar cualquier alteración en la toma de datos a la hora de realizar la prueba.

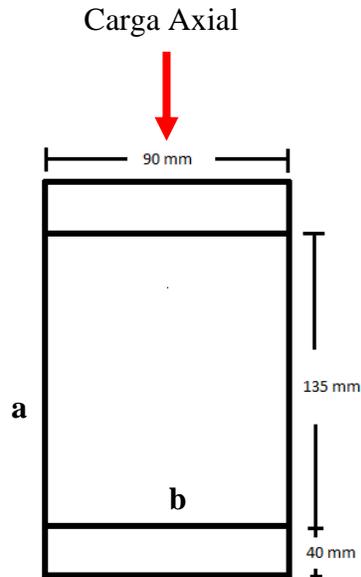
Dimensiones para coeficiente igual a 1:

Figura 3.10 Probeta coeficiente 1



Dimensiones para coeficiente igual a 1,5:

Figura 3.11 Probeta coeficiente 1.5



Para realizar las pruebas en la máquina universal de ensayos se debe realizar la configuración del software Navigator de acuerdo a lo descrito en el Anexo A 3-4.

Una vez realizada la tabulación de datos, se realiza una validación con el método estadístico ANOVA el que analiza las diferencias de medias entre las muestras de las propiedades mecánicas con un nivel de confianza del 75% con un contraste de hipótesis donde se analiza la varianza.

Tabla 3.11 Factores y Niveles diseño experimental

<u>FACTORES</u>	<u>NIVELES</u>
<i>Material</i>	Carbono
	Vidrio
<i>Coeficiente</i>	1
	1,5
<i>Ángulo</i>	0°
	45°
	90°

Se realizó un diseño experimental con un solo factor (análisis de varianza), analizando dos factores que se presentan en la tabla 3.10 que son orientación y ángulo, para ello se propone la hipótesis nula H_0 y alternativa H_1 descritas a continuación:

- Hipótesis acerca de la influencia de la orientación Vs el esfuerzo máximo
 H_0 : *No hay influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo*
 H_1 : *Existe una influencia de la orientación sobre el esfuerzo*
- Hipótesis acerca de la influencia del coeficiente Vs el esfuerzo máximo
 H_0 : *No hay influencia del coeficiente sobre el esfuerzo máximo*
 H_1 : *Existe una influencia del coeficiente sobre el esfuerzo*

3.3 Cálculos del número de réplicas

Para calcular el número de réplicas para la prueba piloto se debe primero encontrar **n** el cual indica el tamaño de la muestra.

$$n = \left(\frac{ts}{\alpha X} \right)^2 = \left(\frac{t}{\alpha} CV \right)^2$$

Ecuación 3.3 Tamaño de la muestra

Dónde:

n = número de réplicas

s = Desviación Estandar de los valores de las pruebas piloto

X = Valor medio del espécimen. Hace referencia al módulo de elasticidad entregado por el proveedor. La norma ASTM –D2915 define que X corresponde al módulo de elasticidad del material.

CV = Coeficiente de Variación, s/X

α = Estimación de precisión(0,05), se define una estimación de posición del 50% dado por la norma ASTM-D2915

t = Este valor se toma de la tabla 3.12 que aparece en la Norma ASTM – D2915, Se tomará el valor de t correspondiente para cada material y sus intervalos de confianza.

Tabla 3.12 Intervalo de confianza

df $n - 1$	$CI = 75 \%$	$CI = 95 \%$	$CI = 99 \%$
1	2.414	12.706	63.657
2	1.604	4.303	9.925
3	1.423	3.182	5.841
4	1.344	2.776	4.604
5	1.301	2.571	4.032
6	1.273	2.447	3.707
7	1.254	2.365	3.499
8	1.240	2.306	3.355
9	1.230	2.262	3.250
10	1.221	2.228	3.169
11	1.214	2.201	3.106
12	1.209	2.179	3.055
13	1.204	2.160	3.012
14	1.200	2.145	2.977
15	1.197	2.131	2.947
16	1.194	2.120	2.921
17	1.191	2.110	2.898
18	1.189	2.101	2.878
19	1.187	2.093	2.861
20	1.185	2.086	2.845
21	1.183	2.080	2.831
22	1.182	2.074	2.891
23	1.180	2.069	2.807
24	1.179	2.064	2.797
25	1.178	2.060	2.787
26	1.177	2.056	2.779
27	1.176	2.052	2.771
28	1.175	2.048	2.763
29	1.174	2.045	2.756
30	1.173	2.042	2.750
40	1.167	2.021	2.704
60	1.162	2.000	2.660
120	1.156	1.980	2.617
∞	1.150	1.960	2.576

Fuente: (D2915, 2017)

3.3.1 Calculo desviación estándar de los valores pruebas piloto

Se calcula primero el promedio o media aritmética \bar{x} de los esfuerzos críticos ecuación

3.4 obtenidos en las pruebas piloto.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

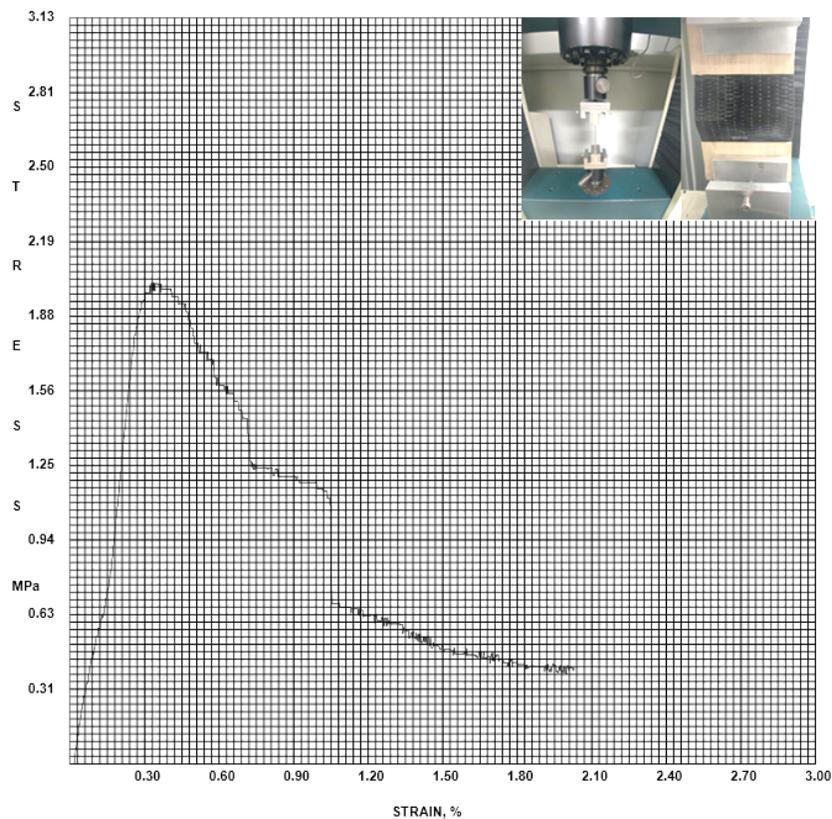
Ecuación 3.4 Media aritmética

Fuente: (D2915, 2017)

Para poder calcular el número de réplicas se debe ejecutar las pruebas teniendo en cuenta un montaje para ensayo que se encuentra en el anexo A 3-5, con ello se obtienen los datos del esfuerzo máximo para las probetas del material pre impregnado fibra de carbono y fibra de vidrio de acuerdo a lo siguiente:

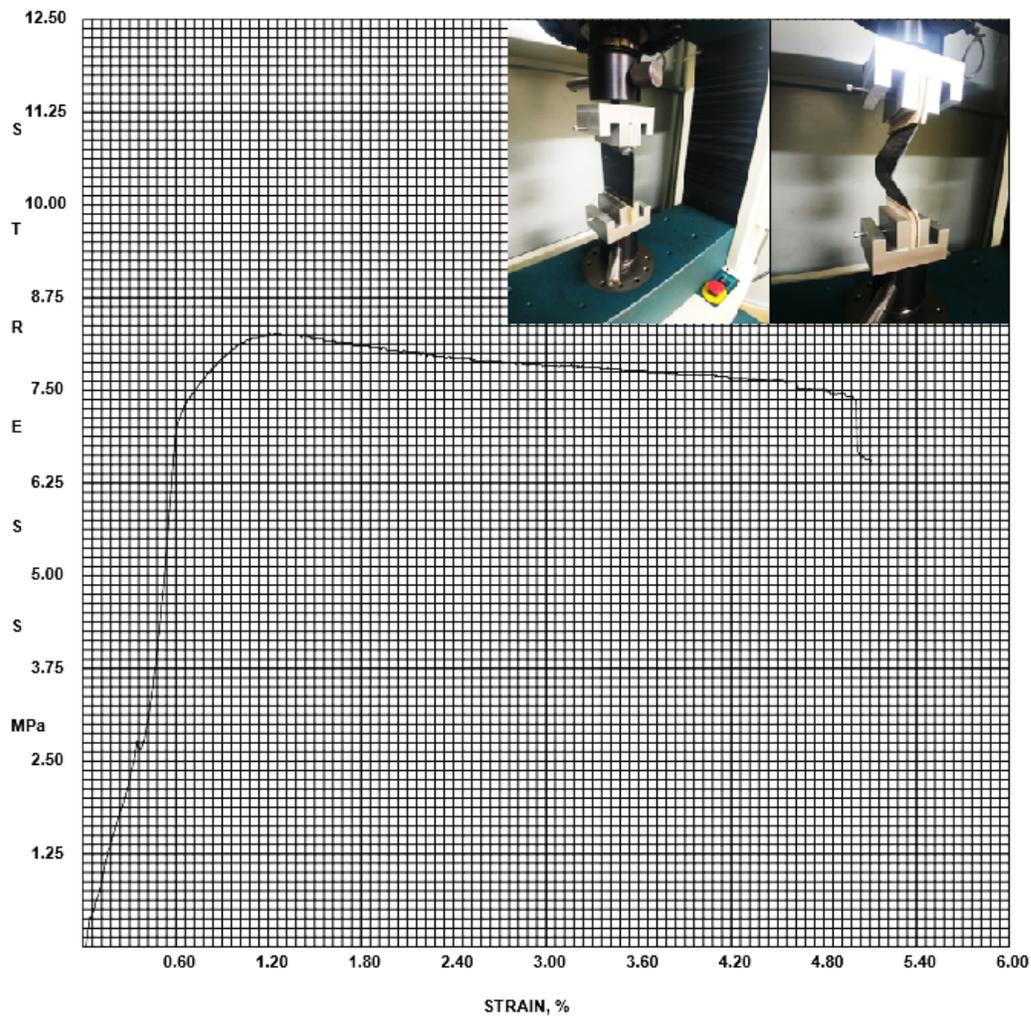
Esfuerzos máximos probetas Material Impregnado Pre-preg fibra carbono:

<u>Prueba Piloto #1 Carbono</u>	
Material	Pre-preg Carbono
Coficiente	C= 1
Ángulo	45°
Fecha	07/06/2018
Hora	7:19 p. m.
Temperatura	13°C
Punto máximo (kPa)	2020
Punto de ruptura (kPa)	403



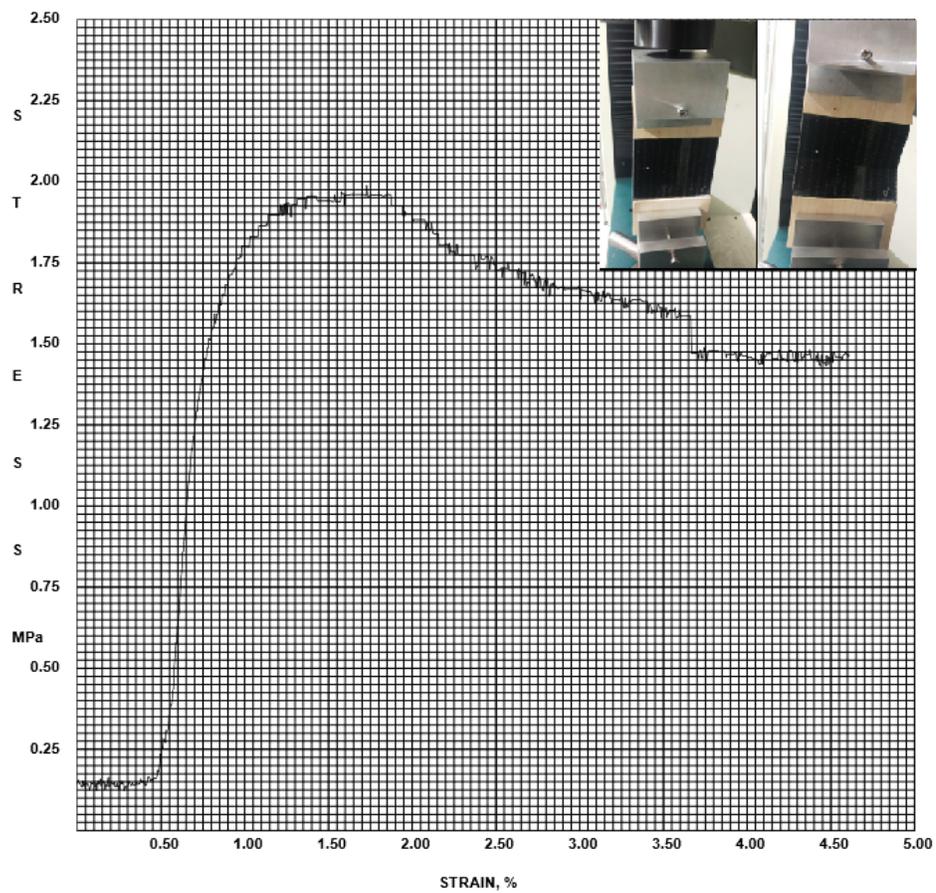
Gráfica 3.1 Prueba piloto 1 Carbono

Prueba Piloto #2 Carbono	
Material	Pre-preg Carbono
Coeficiente	C= 1,5
Ángulo	45°
Fecha	07/06/2018
Hora	7:46 p. m.
Temperatura	13°C
Punto máximo (kPa)	8270
Punto de ruptura (kPa)	6540



Gráfica 3.2 Prueba piloto 2 Carbono

Prueba Piloto #3 Carbono	
Material	Pre-preg Carbono
Coefficiente	C= 1,5
Ángulo	45°
Fecha	07/06/2018
Hora	7:46 p. m.
Temperatura	13°C
Punto máximo (kPa)	1988
Punto de ruptura (kPa)	1467



Gráfica 3.3 Prueba piloto 3 Carbono

Tabla 3.13 Resultados prueba piloto Carbono

RESULTADOS PRUEBA PILOTO CARBONO		
Pruebas	Punto Máximo (kPa)	Punto Ruptura (kPa)
1	2020	403
2	8270	6540
3	1988	1467

De acuerdo a los resultados de la prueba piloto tabla 3.13, se toman los esfuerzos máximos de cada prueba para obtener el promedio o media aritmética \bar{x} :

Para el cálculo de la media aritmética se define $n = 3$, y se define bajo los esfuerzos máximos de cada prueba lo siguiente:

$$x_1 = 2020 \text{ kPa} = 292.9762 \text{ PSI} \approx 293,98 \text{ psi}$$

$$x_2 = 8270 \text{ kPa} = 1199.462 \text{ PSI}$$

$$x_3 = 1988 \text{ kPa} = 288.335 \text{ PSI}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i \quad \text{Sustituyendo n por 3}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} (x_1 + x_2 + x_3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} (293.98 \text{ psi} + 1199.462 \text{ psi} + 288.355 \text{ psi})$$

$$\bar{x} = 593.9323 \text{ psi}$$

La desviación estándar estará determinada de acuerdo a lo siguiente:

s = Desviación Estandar de los valores de las probetas prueba piloto

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=x}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=x}^3 (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Sustituyendo n por 3}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (x_i - 593.9323 \text{ psi})^2} \quad \text{Sustituyendo } \bar{x} \text{ por } 593.9323 \text{ psi}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{2} [(293,98 \text{ psi} - 593.9323 \text{ psi})^2 + (1199.462 \text{ psi} - 593.9323 \text{ psi})^2 + (288.335 \text{ psi} - 593.9323 \text{ psi})^2]}$$

$$s = \sqrt{[(-299.9523 \text{ psi})^2 + (6902.529 \text{ psi})^2 + (-305.5973 \text{ psi})^2]}$$

$$s = \sqrt{89971.382 \text{ psi} + 47644906.595 \text{ psi} + 93389.709}$$

$$s = 6915.798 \text{ psi}$$

De acuerdo a lo descrito anteriormente el cálculo para el material pre-impregnado de carbono es el siguiente:

$$S = 6915.798 \text{ psi}$$

$$X = \text{Media modulo elasticidad } E = 700 \text{ MPa} = 101526,416 \text{ Psi}$$

$$CV = s/X = \frac{6915,798 \text{ Psi}}{101526,416 \text{ Psi}} = 0,068118$$

$$\alpha = 0,05 \quad \text{Estimado de precisión dado por la Norma D2915-10}$$

$t = 1,240$ Este valor se toma de la tabla confianza 3.12, se tomará el valor de t correspondiente para cada material y sus intervalos de confianza. Para un CI = al 75% y un $df \ n - 1 = 2$

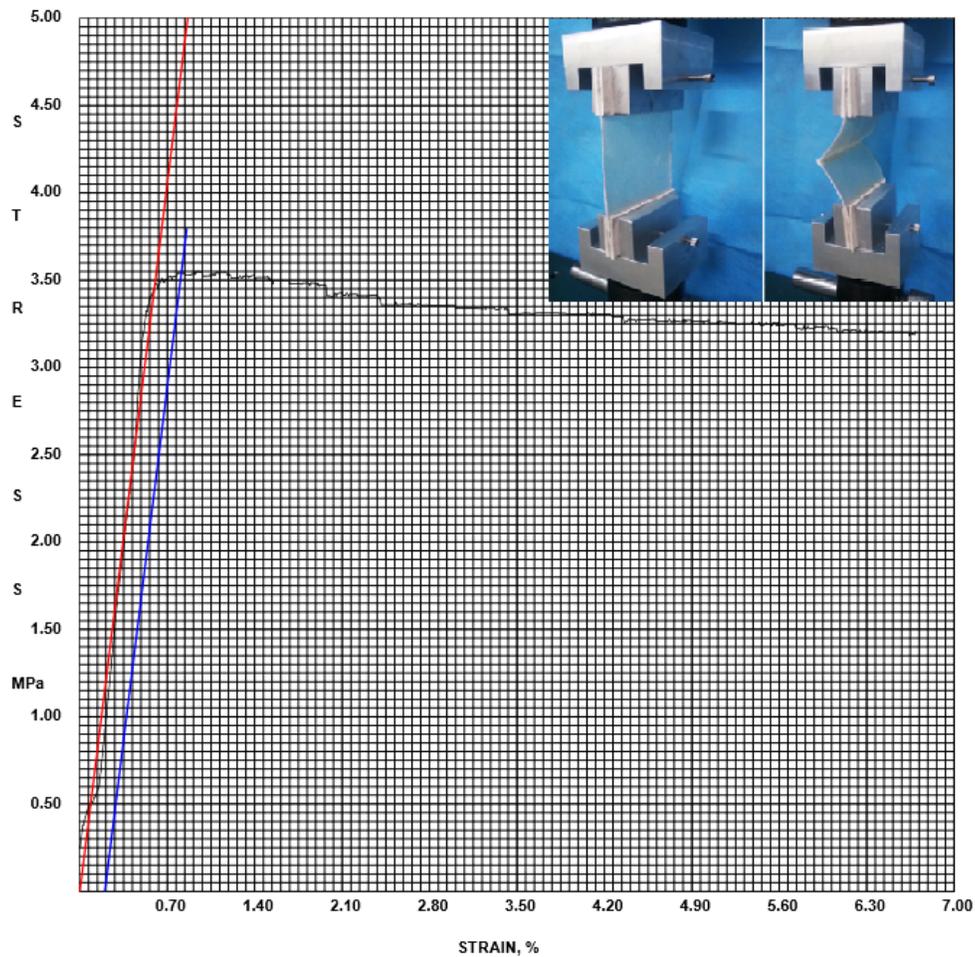
Se define el intervalo de confianza (CI) al 75% de acuerdo a la disponibilidad de material que se adquirió

$$n = \left(\frac{1,604}{0,05} 0,068118 \right)^2 = 4.77 \approx 4 \text{ Réplicas}$$

El resultado obtenido de los cálculos son 4 réplicas para la fibra de carbono.

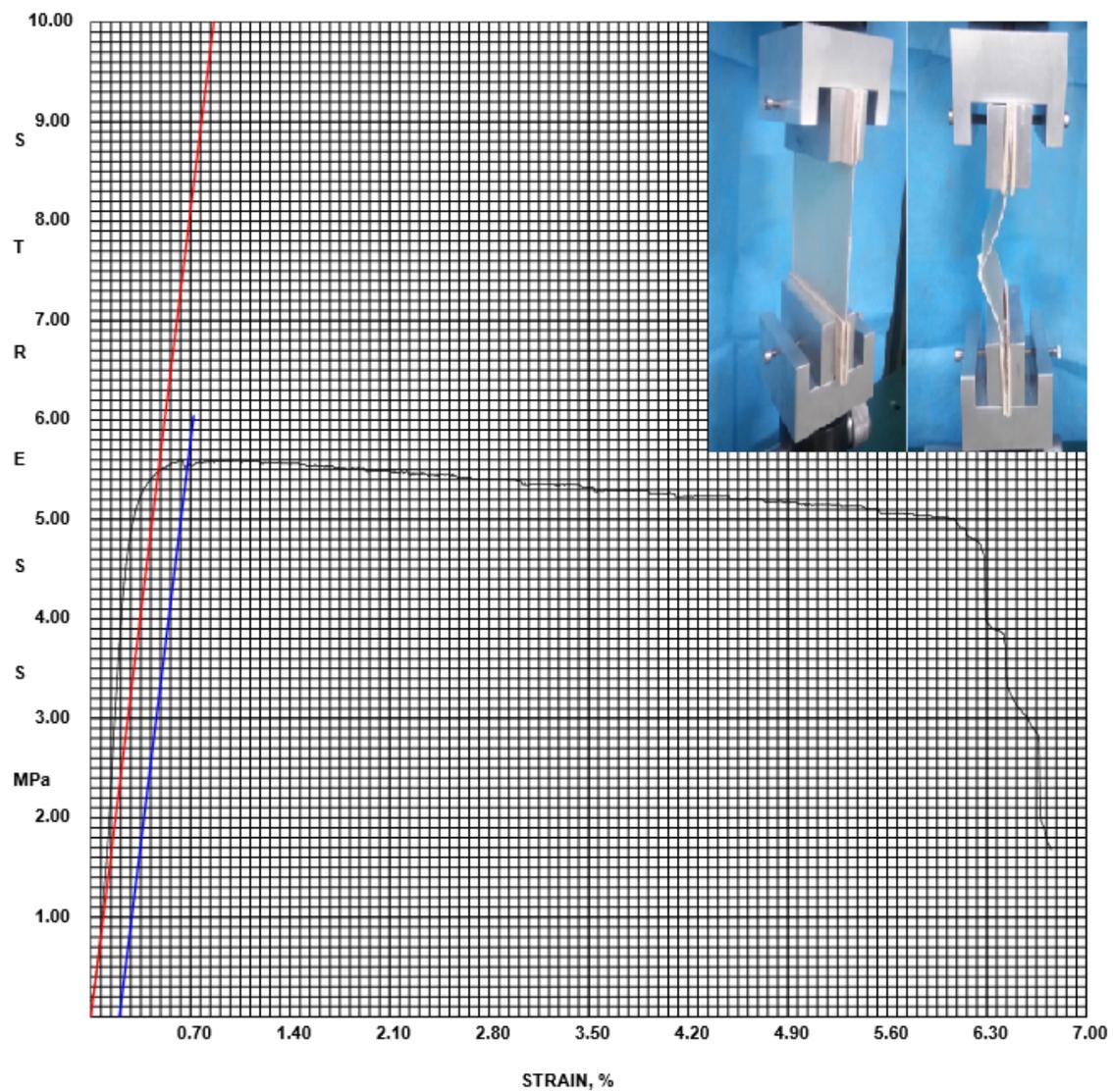
Esfuerzos máximos probetas de Material Impregnado Pre-preg fibra de vidrio:

Prueba Piloto #1 Vidrio	
Material	Pre-preg Vidrio
Coficiente	C= 1
Ángulo	90°
Temperatura	12°C
Fecha	14/06/2018
Hora	7:50 p. m.
Punto máximo (kPa)	3550
Punto de ruptura (kPa)	3200



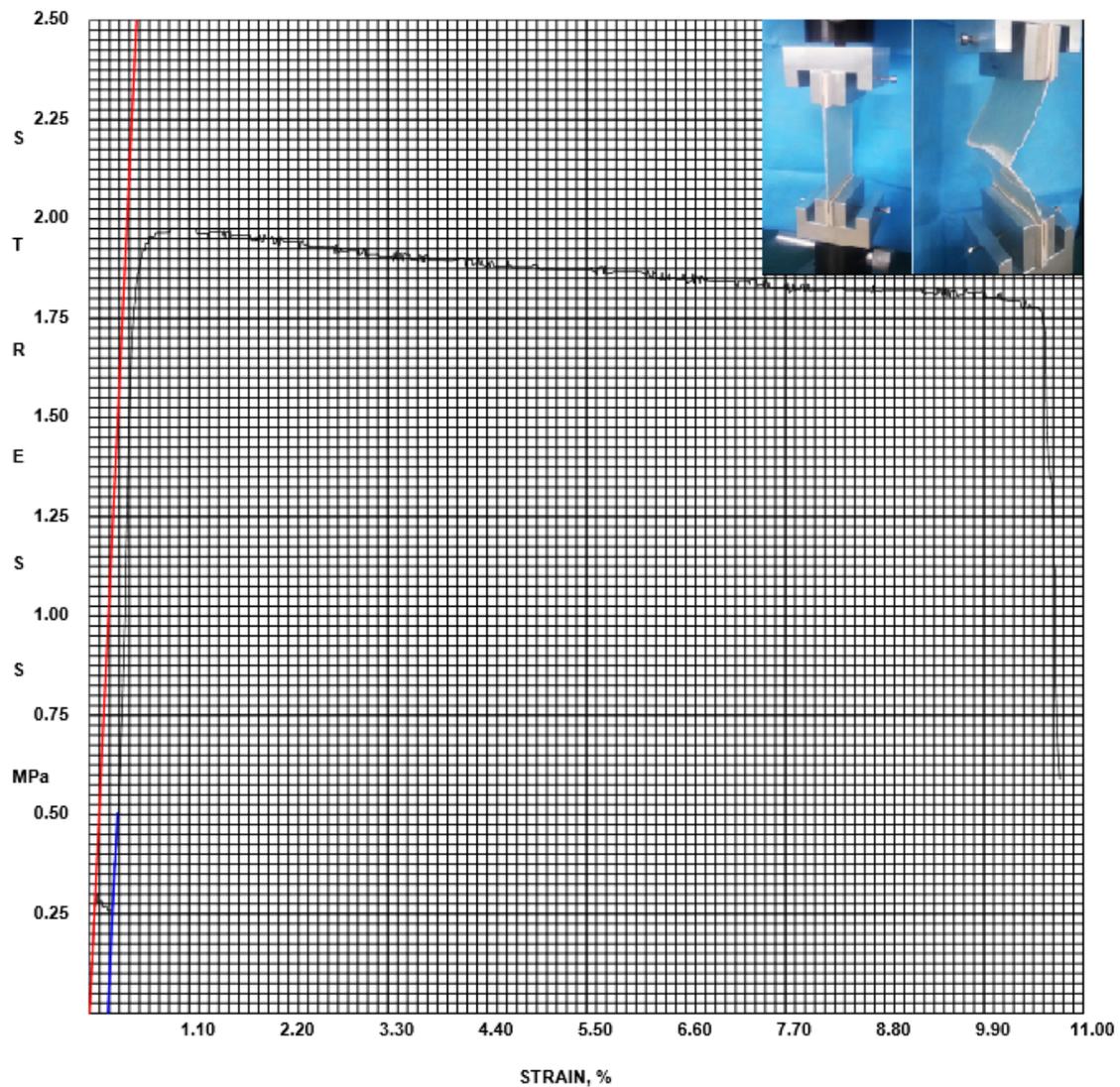
Gráfica 3.4 Prueba piloto 1 Vidrio

Prueba Piloto #2 Vidrio	
Material	Pre-preg Vidrio
Coefficiente	C= 1,5
Ángulo	90°
Temperatura	12°C
Fecha	14/06/2018
Hora	8:29 p. m.
Punto máximo (kPa)	5600
Punto de ruptura (kPa)	1675



Gráfica 3.5 Prueba piloto 2 Vidrio

Prueba Piloto #3 Vidrio	
Material	Pre-preg Vidrio
Coficiente	C= 1,5
Ángulo	0°
Temperatura	12°C
Fecha	14/06/2018
Hora	9:00 p. m.
Punto máximo (kPa)	1976
Punto de ruptura (kPa)	589



Gráfica 3.6 Prueba piloto 3 Vidrio

Tabla 3.14 Resultados prueba piloto Vidrio

RESULTADOS PRUEBA PILOTO VIDRIO		
Pruebas	Punto Máximo (kPa)	Punto Ruptura (kPa)
1	3550	3200
2	5600	1675
3	1976	589

De acuerdo a los resultados de la prueba piloto tabla 3.14, se toman los esfuerzos máximos de cada prueba para obtener el promedio o media aritmética \bar{x} :

Para el cálculo de la media aritmética, se define $n = 3$, bajo los esfuerzos máximos de cada prueba lo siguiente:

$$x_1 = 3550 \text{ kPa} = 514.884 \text{ PSI}$$

$$x_2 = 5600 \text{ kPa} = 812.211 \text{ PSI}$$

$$x_3 = 1975 \text{ kPa} = 286.5946 \text{ PSI}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i \quad \text{Sustituyendo } n \text{ por } 3$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} (x_1 + x_2 + x_3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} (514.884 \text{ psi} + 812.211 \text{ psi} + 286.546 \text{ psi})$$

$$\bar{x} = 537.880 \text{ psi}$$

La desviación estándar estará determinada de acuerdo a lo siguiente:

$s =$ *Desviación Estandar de los valores de las probetas pruebas piloto*

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=x}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=x}^3 (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Sustituyendo } n \text{ por } 3$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (x_i - 537.880 \text{ psi})^2} \quad \text{Sustituyendo } \bar{x} \text{ por } 537.880 \text{ Psi}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{2} [(514.884 \text{ psi} - 537.880 \text{ psi})^2 + (812.211 \text{ psi} - 537.880 \text{ psi})^2 + (286.5946 \text{ psi} - 537.880 \text{ psi})^2]}$$

$$s = \sqrt{[(-22,966 \text{ psi})^2 + (274.331 \text{ psi})^2 + (-251.2854 \text{ psi})^2]}$$

$$s = \sqrt{527.4371 \text{ psi} + 75257.4975 \text{ psi} + 63144.3522}$$

$$s = 372.732 \text{ psi}$$

t = Este valor se toma de la tabla de confianza 3.12 que aparece en la norma ASTM – D2915, el valor de t correspondiente para cada material y su intervalo de confianza.

De acuerdo a lo descrito anteriormente el cálculo para el material pre-impregnado de vidrio es el siguiente:

$$s = 372.732 \text{ Psi}$$

x = Media MÓDULO elasticidad E = 610 MPa = 88473 Psi, La norma ASTM –D2915 define que X corresponde al módulo de elasticidad del material.

$$CV = s/X = \frac{372,732 \text{ Psi}}{88473 \text{ Psi}} = 0,004224$$

$\alpha = 0,05$ Estimado de precisión dado por la Norma D2915–10

t = 1,240 Este valor se toma de la tabla confianza 3.12, se tomara el valor de t correspondiente para cada material y sus intervalos de confianza. Para un CI = al 75% y un df $n - 1 = 2$

$$n = \left(\frac{1,604}{0,05} 0,004224 \right)^2 = 0,01836 \approx 1 \text{ Réplicas}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos por la prueba piloto para el material preimpregnado de vidrio se evidencia que el resultado es de una réplica, por tal motivo se decide tomar las réplicas arrojadas en el diseño experimental para material preimpregnado de carbono las cuales fueron 4 réplicas.

El total de repeticiones estará definido de acuerdo a las tablas 3.15 y 3.16

Tabla 3.15 Repeticiones material 1

Material 1				
0°	45°	90°		
C=1	C=1	C=1	Probetas coeficiente =12	Total réplicas = 24
C=1.5	C=1.5	C=1.5	Probetas coeficiente =12	

Tabla 3.16 Repeticiones material 2

Material 2				
0°	45°	90°		
C=1	C=1	C=1	Probetas coeficiente =12	Total réplicas = 24
C=1,5	C=1,5	C=1,5	Probetas coeficiente =12	

De acuerdo a los factores analizados 2(material), 3(orientación) y 2(coeficiente), se tendrá un total de 12 posibles combinaciones y se requieren 4 repeticiones de las 12 combinaciones, para un total de 48 probetas.

3.4 Ensayo de probetas de acuerdo al diseño experimental

3.4.1 Acrónimo pruebas

Las pruebas se realizarán de acuerdo al acrónimo de la tabla 3.16 esto da una totalidad de 48 pruebas, serán 4 pruebas por cada combinación.

Tabla 3.17 Orden Acrónimo

Acrónimo	
C	Carbono
V	Vidrio
1	Coeficiente 1
2	Coeficiente 1,5
0, 45,90	Ángulos

De acuerdo a la tabla 3.17 después del ángulo hay un guion (-) seguida de un número el cual representa el número de probeta que se está realizando como se demuestra en el ejemplo:

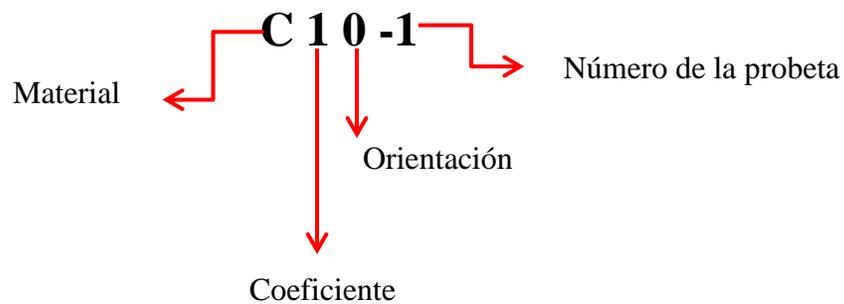


Tabla 3.18 Designación probetas

DESIGNACIÓN PROBETAS			
C 1 0 -1	C 2 0 -13	V 2 0 -1	V 1 0 -13
C 1 0 -2	C 2 0 -14	V 2 0 -2	V 1 0 -14
C 1 0 -3	C 2 0 -15	V 2 0 -3	V 1 0 -15
C 1 0 -4	C 2 0 -16	V 2 0 -4	V 1 0 -16
C 1 45 -5	C 2 45 -17	V 2 45 -5	V 1 45 -17
C 1 45 -6	C 2 45 -18	V 2 45 -6	V 1 45 -18
C 1 45 -7	C 2 45 -19	V 2 45 -7	V 1 45 -19
C 1 45 -8	C 2 45 -20	V 2 45 -8	V 1 45 -20
C 1 90 -9	C 2 90 -21	V 2 90 -9	V 1 90 -21
C 1 90 -10	C 2 90 -22	V 2 90 -10	V 1 90 -22
C 1 90 -11	C 2 90 -23	V 2 90 -11	V 1 90 -23
C 1 90 -12	C 2 90 -24	V 2 90 -12	V 1 90 -24

3.5 Fabricación de probetas

Se inicia el proceso de elaboración de las probetas direccionado la fibra de acuerdo a los algunos de estudio 0° 45° y 90° . Se realiza el corte de acuerdo a las medidas de los paneles. Una vez se tengan los cortes de los paneles se procede a realizar el curado el cual se realizará a temperatura ambiente según el fabricante indica una vez retirada las películas protectoras pasadas 12 horas este empieza a curar, los paneles tardaron 2 días en estar completamente curados.

Ya con los paneles curados se procede a realizar el corte de las probetas individualmente con las medidas establecidas. Para la elaboración de los tabs, se procede a lijar los paneles en los puntos en los cuales se van a colocar dichos tabs. Una vez realizado el proceso se limpia la zona quitando los residuos de polvo, de acuerdo a la norma ASTM D-3039 los tabs deben de ser elaborados en fibra de vidrio con una altura de 50mm.

Dado que la fibra de vidrio se deslizo en el acople se optó por otro tipo de material que tuviese mejor adherencia a las placas de agarre.

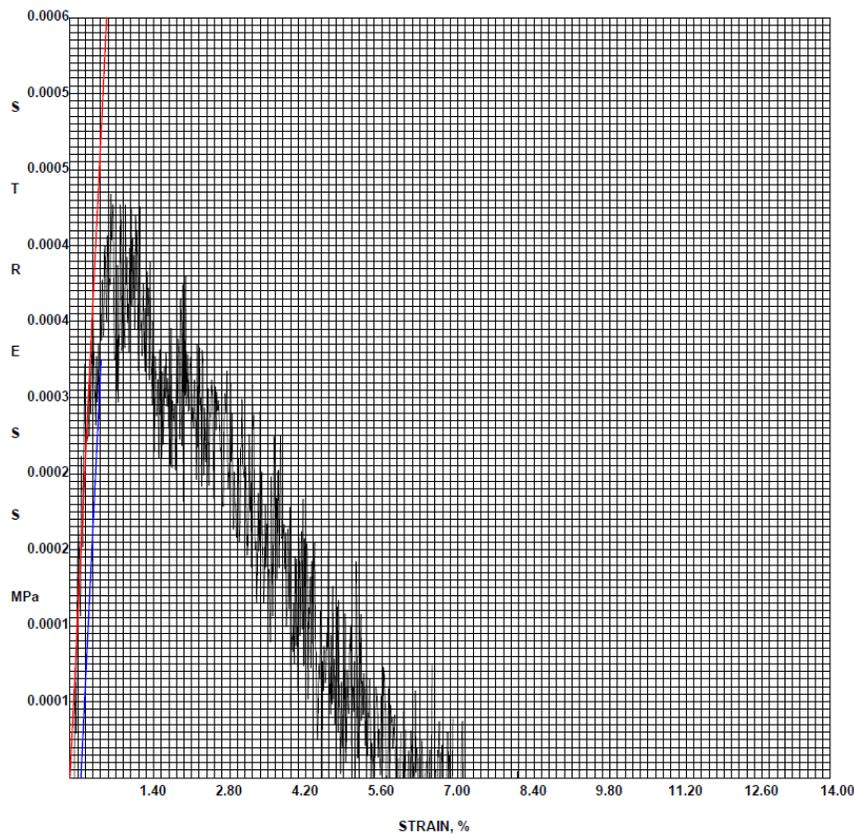
Las probetas tendrán ganchos de presión en los extremos para ayudar a su pegado, es de mencionar que los tabs van por las dos caras de los paneles. En el anexo A 3-6 se encuentra cada uno de los pasos que se siguieron para la elaboración de las probetas.

IV RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de pandeo realizadas en la máquina universal de ensayo, adicional a esto se relacionan los resultados con un análisis visual del quiebre de las probetas.

4.1 Suavización de gráficas

De acuerdo a las gráficas obtenidas se evidencia dispersión de datos sobre las mismas, lo que conlleva a que se realice una suavización de cada una de las gráficas obtenidas en las pruebas. Un ejemplo de las gráficas obtenidas gráfica 4.7 que presenta bastante ruido y su lectura no es exacta es la prueba de C290-21.



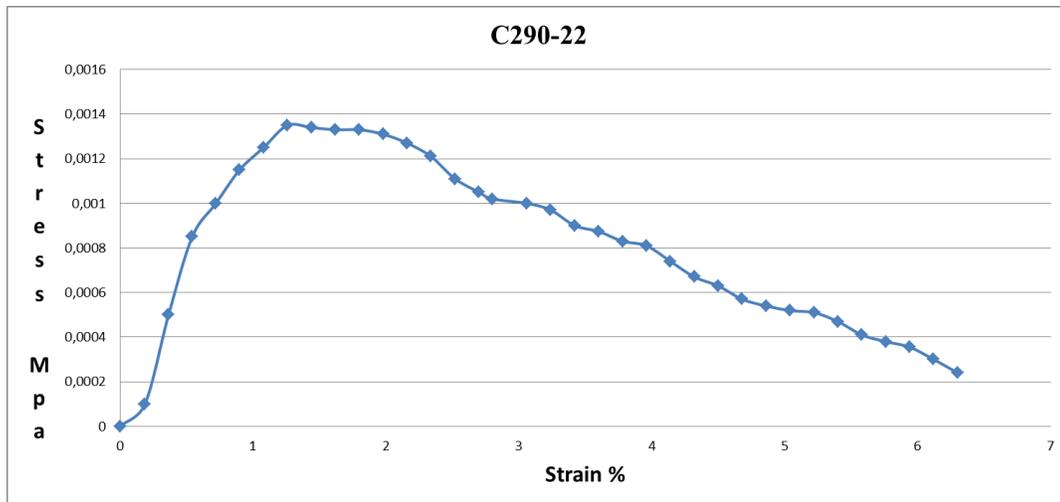
Gráfica 4.7 Prueba C290-21

De acuerdo a la gráfica 4.7 se procede a tabular punto a punto para así poder suavizar la misma esta suavización se realizó tomando puntos aleatorios de las gráficas obtenidas para construir una gráfica la cual se puede interpretar mejor. De lo anterior se genera la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Punto a punto prueba C290-22

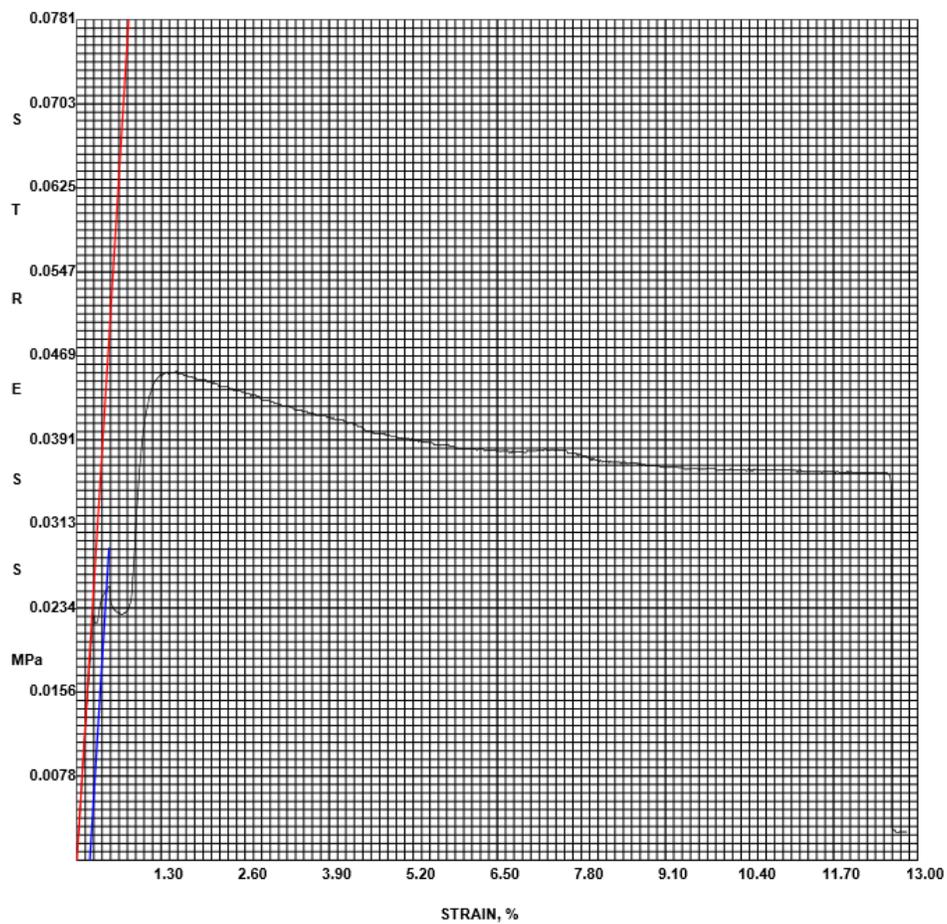
C290-22			
Tensión%	Esfuerzo (Mpa)	Tensión%	Esfuerzo (Mpa)
0	0	3,24	0,00097
0,188	0,0001	3,42	0,0009
0,366	0,0005	3,6	0,000874
0,544	0,00085	3,78	0,00083
0,722	0,001	3,96	0,00081
0,9	0,00115	4,14	0,00074
1,08	0,00125	4,32	0,00067
1,26	0,00135	4,5	0,00063
1,44	0,00134	4,68	0,00057
1,62	0,00133	4,86	0,00054
1,8	0,00133	5,04	0,000519
1,98	0,00131	5,22	0,00051
2,16	0,00127	5,4	0,00047
2,34	0,00121	5,58	0,00041
2,52	0,00111	5,76	0,00038
2,7	0,00105	5,94	0,000355
2,8	0,00102	6,12	0,0003
3,06	0,001	6,3	0,00024

Se realiza la gráfica de los puntos trazados con el fin de obtener una gráfica más definida gráfica 4.8 para evidenciar más fácil sus puntos máximos y mínimos.



Gráfica 4.8 Punto a punto prueba C290-22

Gráfica prueba V145-19 Vidrio

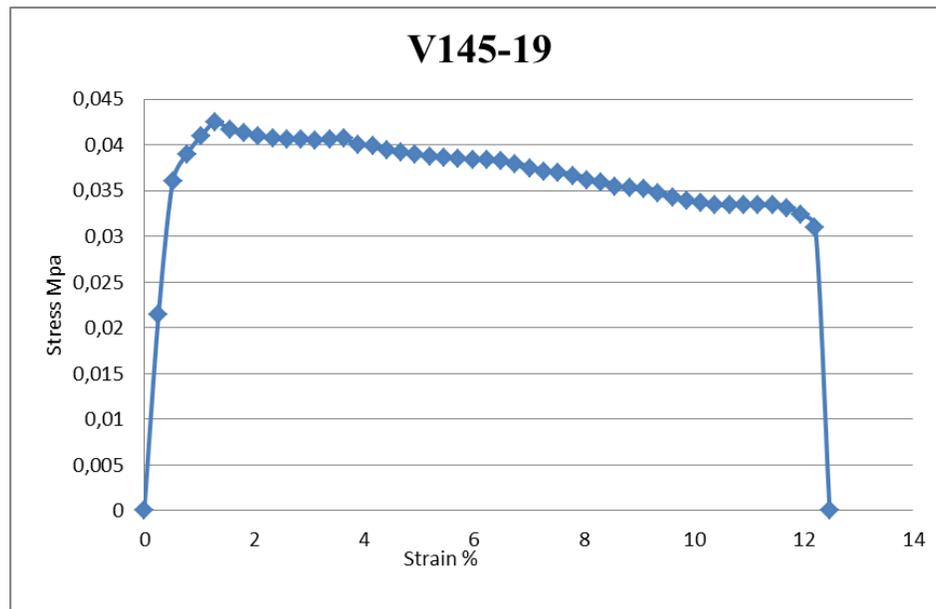


Se obtienen los siguientes datos, punto a punto para la gráfica 4.9.

Tabla 4.20 Punto a punto prueba V145-19

V145-19			
Tensión%	Esfuerzo (Mpa)	Tensión%	Esfuerzo (Mpa)
0	0	6,5	0,0384
0,26	0,0236	6,76	0,0383
0,52	0,0234	7,02	0,0382
0,78	0,0214	7,28	0,0379
1,04	0,036	7,54	0,0374
1,3	0,039	7,8	0,0371
1,56	0,041	8,06	0,0369
1,82	0,0425	8,32	0,0366
2,08	0,0416	8,58	0,0361
2,34	0,0413	8,84	0,0359
2,6	0,041	9,1	0,0354
2,86	0,0407	9,36	0,0353
3,12	0,0406	9,62	0,0352
3,38	0,0406	9,88	0,0347
3,64	0,0405	10,14	0,0343
3,9	0,0406	10,4	0,0339
4,16	0,0407	10,66	0,0336
4,42	0,04	10,92	0,0334
4,68	0,0399	11,18	0,0334
4,94	0,0394	11,44	0,0334
5,2	0,0392	11,7	0,0334
5,46	0,039	11,96	0,0334
5,72	0,0387	12,22	0,0331
5,98	0,0386	12,48	0,0324
6,24	0,0385		

Gráfica 4.9 Prueba V145-19



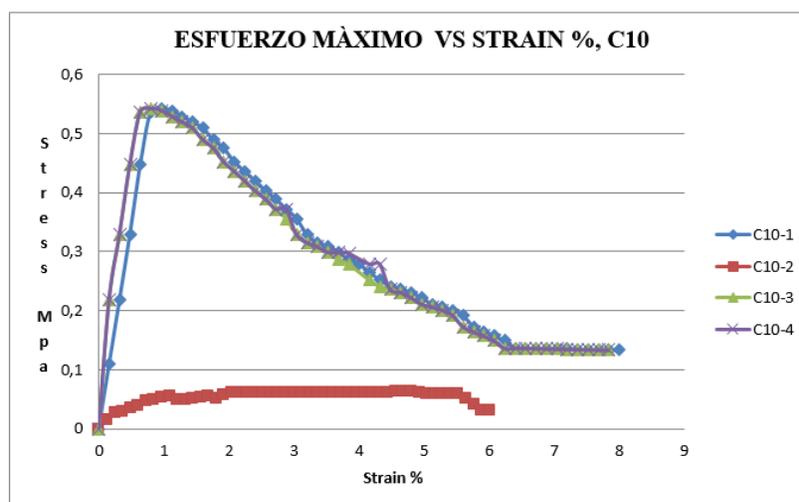
Gráfica 4.10 Punto a punto prueba V145-19

4.2 Resumen datos pruebas de pandeo

Se exponen en las tablas 4.21 y 4.22 los resultados obtenidos en las pruebas para material pre-preg de fibra de carbono y vidrio generados en la máquina universal de ensayos. Con estos resultados se realizó análisis por el método ANOVA.

Tabla 4.21 Tabulación de datos carbono

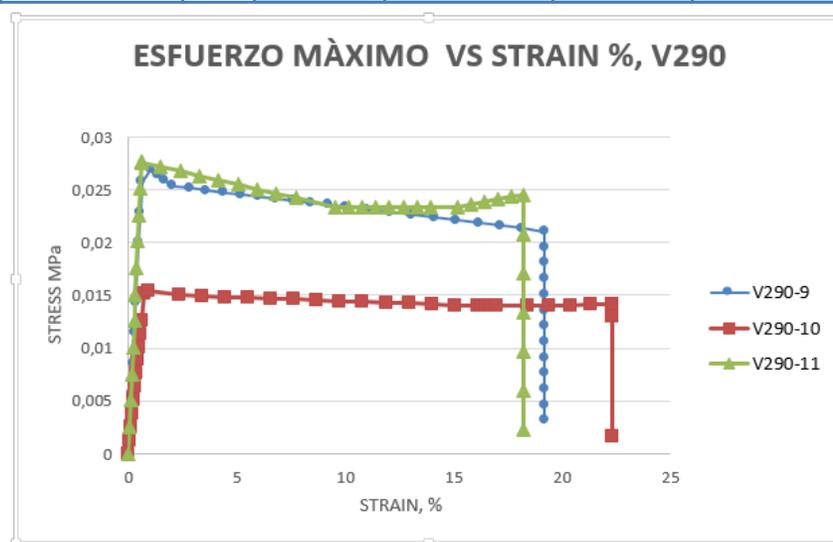
CARBONO					
		Probeta	MÓDULO (Mpa)	Ruptura (kpa)	Esfuerzo Máximo (kpa)
Coeficiente 1	0°	1	12,97	16,71	54,4
		2	9,42	19,8	53,9
		3	13,45	15,54	52,3
		4	13,08	15,61	53,7
	45°	5	1,216	9,79	14,23
		6	1,94	5,99	9
		7	1,87	7,9	10,4
		8	1,67	7,8	11,21
	90°	9	0,54	1,27	3,47
		10	210	0,43	4,14
		11	0	0	0
		12	0,28	0,29	1,35
Coeficiente 1,5	0°	13	5,58	17,93	37,8
		14	4,85	21,6	40,8
		15	3,2	9,97	33,9
		16	4,97	21,8	29,8
	45°	17	2,55	2,62	5,75
		18	2,5	2,86	6,41
		19	2,4	2,47	6,08
		20	2,48	2,84	5,96
	90°	21	0	0	0
		22	1,39	0,51	1,42
		23	0,57	0,42	0,85
		24	7,19	6,82	24,8



Gráfica 4.11 Esfuerzo Máximo Vs Strain C10

Tabla 4.22 Tabulación datos vidrio

VIDRIO					
		Probeta	MÓDULO (Mpa)	Ruptura (kpa)	Esfuerzo Máximo (kpa)
Coeficiente 1	0°	1	7,58	6,21	26,1
		2	3,58	7,63	37,2
		3	6,41	2,66	20,2
		4	5,85	5,55	27,83
	45°	5	6,07	5,76	26,4
		6	4	3,33	20
		7	5,41	2,98	22,6
		8	5,16	4,02	22,93
	90°	9	7,05	3,12	27
		10	4	2,55	15
		11	3,91	3,87	27,9
		12	5,07	3,18	23,3
Coeficiente 1,5	0°	13	9,05	6,93	41,1
		14	8	3,74	44
		15	16,19	17,25	79,1
		16	11,2	9,3	54,56
	45°	17	8,76	14,7	65,1
		18	13	3,88	34
		19	9,8	2,62	45,5
		20	10,51	5,78	48,1
	90°	21	18,82	1,993	27,1
		22	6	5,72	58,3
		23	12,41	3,85	42,7
		24	9,2	4,78	50,5

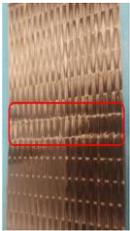
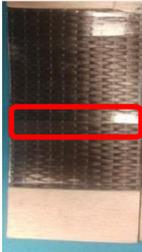


Gráfica 4.12 Esfuerzo Máximo Vs Strain V290

En las gráficas 4.11 y 4.12 se realiza la superposición de cada uno de los datos de las pruebas, para obtener a través de la tendencia lineal un valor por cada una de ellas y así poder realizar el análisis de varianza y dar respuesta las hipótesis planteadas. Para visualizar las gráficas de súper posición de datos referirse al Anexo B 4-1.

4.3 Fractura de probetas

Fracturas obtenidas en las pruebas de pandeo para material pre-preg carbono y vidrio en las orientaciones de 0° , 45° y 90° en el Anexo B 4-2 se encuentra cada una de las fracturas obtenidas en las pruebas.

MATERIAL	TIPO DE FRACTURA	ORIENTACIÓN	COMENTARIO
CARBONO		0°	Para las probetas de 0° se aprecia un tipo de falla de trituración de fibra, donde el fallo ocurre a nivel de la costura. Debido a una inestabilidad de la misma, como si se presentará un pandeo dentro de la fibra. Cumpliendo con la trituración de la fibra, estas probetas muestran una exposición la fibra en el lugar de la falla.
		45°	En las probetas de 45° se observa que la falla del material se da en la misma orientación de esta, el rendimiento el cual es el comportamiento de la matriz con respecto a la fuerza la cual se está sometiendo, la fractura de la matriz se produce una banda de corte orientada aproximadamente a 45° con respecto al eje de la carga.
		90°	Para las probetas de 90° se presenta una banda de corte de acuerdo a la orientación de la fibra, esta falla del material genera que se fracture por completo en el medio del área de estudio, sin generar desprendimiento de la fibra.

MATERIAL	TIPO DE FRACTURA	ORIENTACIÓN	COMENTARIO
VIDRIO		0°,45°y 90°	<p>Observando la falla de las probetas de vidrio, estas presentan una falla de banda de corte en los tres tipos de orientación, dado que este material es multidireccional el rendimiento y la fractura de la matriz produce una banda de corte orientada aproximadamente a 0° con respecto al eje de la carga, esto ocurriendo como se aclaró anteriormente en los tres tipos de orientación sin observar alguna diferencia clara entre las probetas de diferentes ángulos.</p> <p>En algunas de las probetas de vidrio se evidencia una trituración de la fibra presentándose en los tres tipos de orientación.</p>

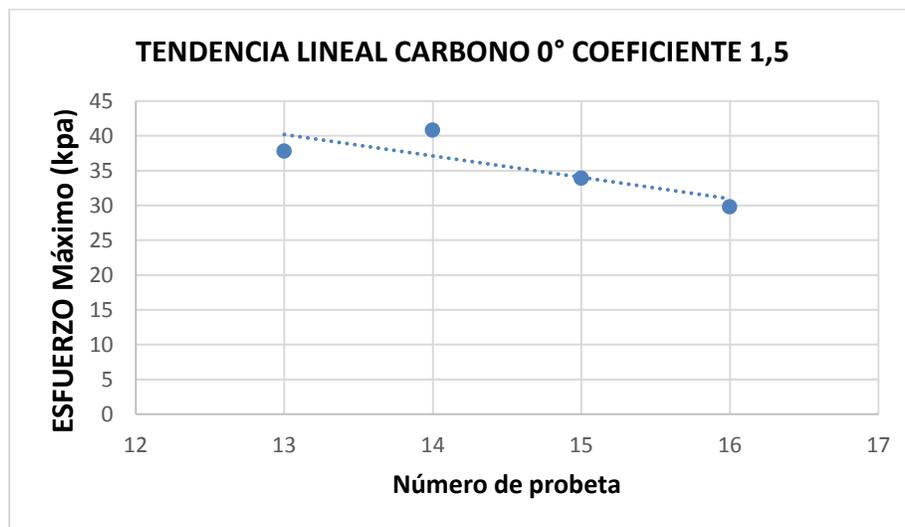
V ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANOVA

Para realizar el estudio por el método ANOVA se seleccionó una probeta por cada orientación y ángulo, a través de una análisis de tendencia de datos gráfica 5.13 y 5.14 en donde se escogió un punto que se encontrase sobre o cercana a la línea de tendencia. Anexo C 5-1

Tabla 5.23 Tendencia de datos carbono

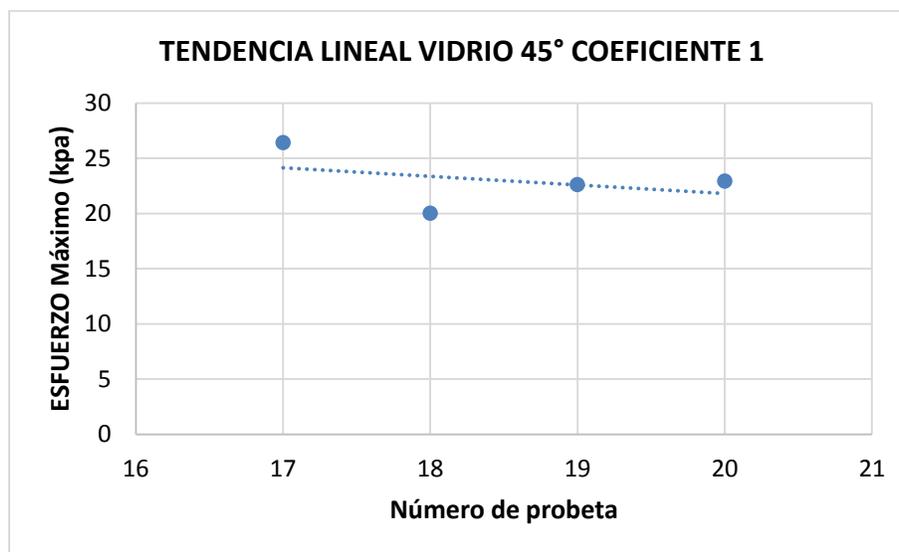
TENDENCIA LINEAL CARBONO 0° COEFICIENTE 1,5			
PROBETA	MÓDULO (Mpa)	RUPTURA (kpa)	ESFUERZO Máximo (kpa)
13	5,58	17,93	37,8
14	4,85	21,6	40,8
15	3,2	9,97	33,9
16	4,97	21,8	29,8



Gráfica 5.13 Tendencia lineal carbono coeficiente 1,5

Tabla 5.24 Tendencia de datos vidrio

TENDENCIA LINEAL VIDRIO 45° COEFICIENTE 1			
PROBETA	MÓDULO (Mpa)	RUPTURA (kpa)	ESFUERZO Máximo (kpa)
17	6,07	5,76	26,4
18	4	3,33	20
19	5,41	2,98	22,6
20	5,16	4,02	22,93



Gráfica 5.14 Tendencia lineal vidrio coeficiente 1

Una vez obtenidos los datos de la tendencia lineal de las pruebas, se procede a realizar el análisis de varianza ANOVA para dar solución a las 3 hipótesis planteadas. Anexo C 5-1

5.1.1 Análisis de hipótesis planteadas

A continuación se encontrarán las dos hipótesis planteadas en el texto estas serán analizadas para conocer las interacciones del coeficiente, ángulo y esfuerzo máximo.

HIPÓTESIS 1

Hipótesis acerca de la influencia de la orientación Vs el esfuerzo máximo, donde la aceptación de la hipótesis nula determina que no hay influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo y su rechazo comprobaría que existe una influencia de la orientación sobre el esfuerzo.

CARBONO		
0°	45°	90°
53,9	10,4	3,47
33,9	6,08	1,42

<u>Grupos</u>	<u>Cuenta</u>	<u>Suma</u>	<u>Promedio</u>	<u>Varianza</u>
0°	2	87,8	43,9	200
45°	2	16,48	8,24	9,3312
90°	2	4,89	2,445	2,10125

<u>Origen de las variaciones</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Promedio de los cuadrados</u>	<u>F</u>	<u>Probabilidad</u>	<u>Valor crítico para F</u>
Entre grupos	2015,8231	2	1007,91155	14,30118532	0,029248419	9,552094496
Dentro de los grupos	211,43245	3	70,47748333			
Total	2227,25555	5				

VIDRIO		
0°	45°	90°
27,83	22,6	23,3
41,4	45,5	50,5

<u>Grupos</u>	<u>Cuenta</u>	<u>Suma</u>	<u>Promedio</u>	<u>Varianza</u>
0°	2	69,23	34,615	92,07245
45°	2	68,1	34,05	262,205
90°	2	73,8	36,9	369,92

<u>Origen de las variaciones</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Promedio de los cuadrados</u>	<u>F</u>	<u>Probabilidad</u>	<u>Valor crítico para F</u>
Entre grupos	9,108633333	2	4,554316667	0,018866333	0,981425991	9,552094496
Dentro de los grupos	724,19745	3	241,39915			
Total	733,3060833	5				

HIPÓTESIS 2

Hipótesis acerca de la influencia del coeficiente Vs el esfuerzo máximo, donde la aceptación de la hipótesis nula determina que no hay influencia del coeficiente sobre el esfuerzo máximo y su rechazo comprobaría que existe una influencia del coeficiente sobre el esfuerzo.

CARBONO	
Coeficiente 1	Coeficiente 1,5
53,9	33,9
10,4	6,08
3,74	1,42

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Coeficiente 1	3	68,04	22,68	742,1052
Coeficiente 1,5	3	41,4	13,8	308,4364

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	118,2816	1	118,2816	0,225182135	0,65986535	7,708647422
Dentro de los grupos	2101,0832	4	525,2708			
Total	2219,3648	5				

VIDRIO	
Coeficiente 1	Coeficiente 1,5
27,83	41,1
22,6	45,5
23,3	50,5

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Coeficiente 1	3	73,73	24,57666667	8,060633333
Coeficiente 1,5	3	137,1	45,7	22,12

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	669,2928167	1	669,2928167	44,35246996	0,002640592	7,708647422
Dentro de los grupos	60,36126667	4	15,09031667			
Total	729,6540833	5				

Realizados los ANOVAS se obtienen la información necesaria para poder realizar el análisis de estos y dar respuesta a las hipótesis

HIPÓTESIS 1	CARBONO		De acuerdo a la hipótesis planteada el F calculado es mayor que el F crítico, con lo cual se rechaza la hipótesis nula, indicando que existe una influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo.
	F	F crítico	
	14,3011853	9,5520945	
	VIDRIO		Para los valores de la prueba de vidrio se obtuvo un F calculado menor que el F crítico lo cual acepta la hipótesis nula, indicando que no existe una influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo.
	F	F crítico	
	0,01886633	9,5520945	

HIPÓTESIS 2	CARBONO		En la hipótesis dos se evidencia que el F calculado es menor que el F crítico, con lo cual la hipótesis nula se acepta, indicando que no hay influencia del coeficiente sobre el esfuerzo máximo.
	F	F crítico	
	0,22518213	7,70864742	
	VIDRIO		El coeficiente influye sobre el esfuerzo máximo dado que el F calculado es mayor que el F crítico, rechazando así la hipótesis nula.
	F	F crítico	
	44,35247	7,70864742	

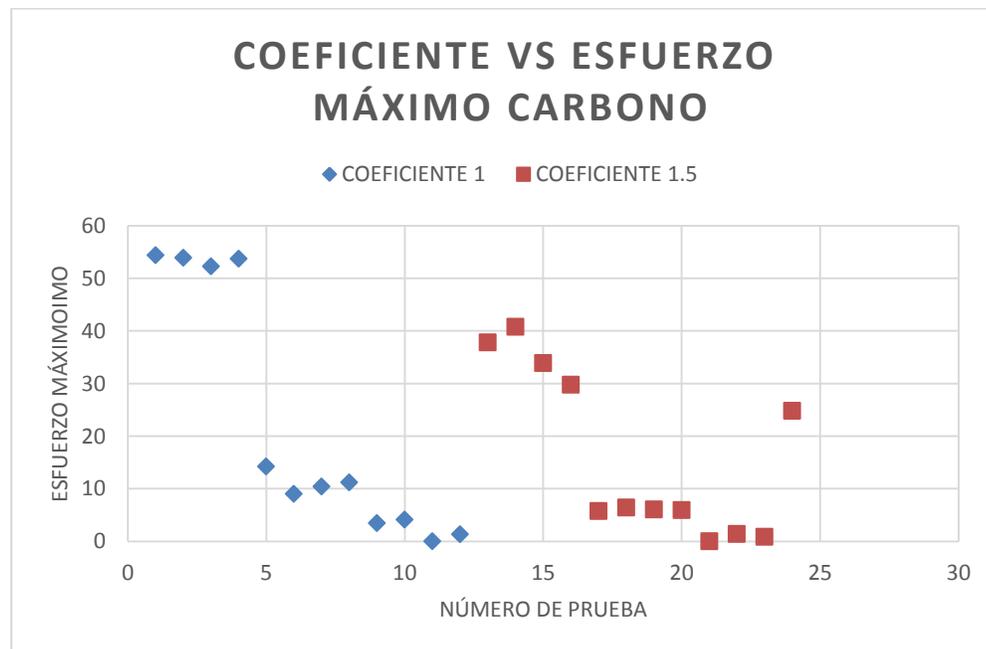
5.2 Influencia del coeficiente, ángulo y esfuerzo máximo

Para el análisis de las fracturas de las probetas se toma como base los datos obtenidos de los ANOVA dado que estos indican si existe una interacción entre los parámetros en este caso el coeficiente, ángulo y el esfuerzo máximo.

5.2.1 Influencia del coeficiente

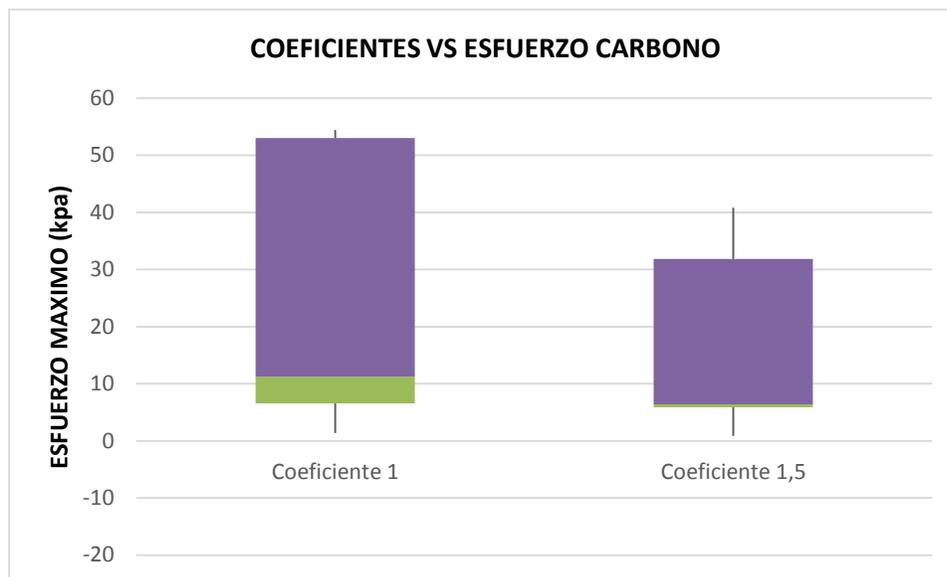
Tabla 5.25 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Carbono

Datos esfuerzo máximo CARBONO					
	Probeta	Esfuerzo Máximo (kpa)		Probeta	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1	1	54,4	COEFICIENTE 1.5	13	37,8
	2	53,9		14	40,8
	3	52,3		15	33,9
	4	53,7		16	29,8
	5	14,23		17	5,75
	6	9		18	6,41
	7	10,4		19	6,08
	8	11,21		20	5,96
	9	3,47		21	0
	10	4,14		22	1,42
	11	0		23	0,85
	12	1,35		24	24,8



Gráfica 5.15 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Carbono

En la gráfica 5.15 se puede observar que los datos obtenidos para las pruebas de la 1 a la 4, y de la 13 a la 16, las cuales corresponden a la orientación de 0° para los dos diferentes tipos de coeficientes, estas presentan valores de esfuerzo máximo altos con respecto a los datos obtenidos de la orientación de 45° que comprende las pruebas de la 5 a la 8, y de la 17 a la 20, para la orientación de 90° las pruebas corresponden de la 9 a la prueba 12, y de la 21 a la 24. Sin embargo, tiene un comportamiento similar de acuerdo a los valores entre los valores de coeficiente 1 y coeficiente 1,5.

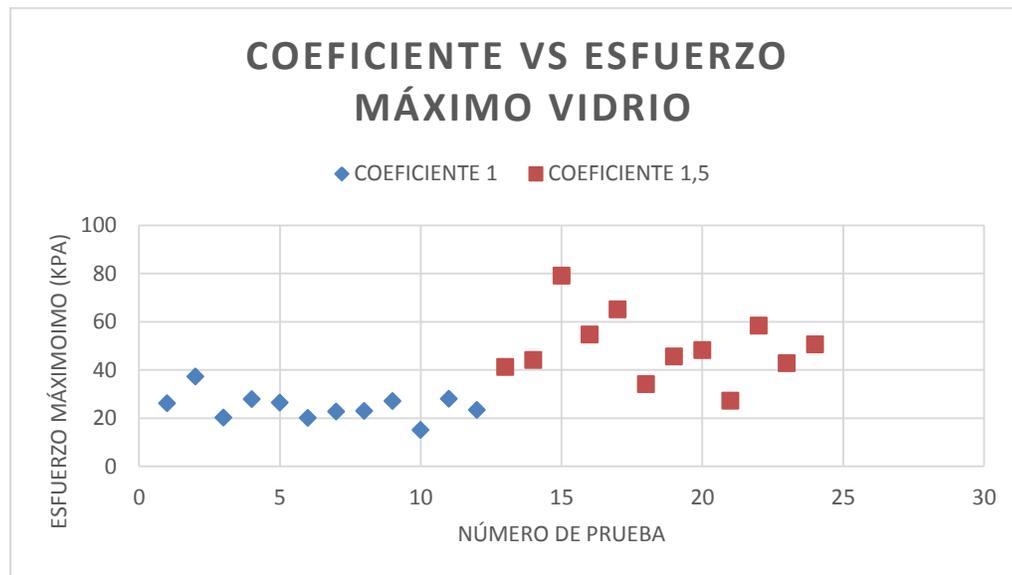


Gráfica 5.16 Diagrama de caja carbono, coeficientes vs esfuerzo

Como se puede observar en la gráfica 5.16 la variación de cada coeficiente con respecto a la media global no es amplia corroborando la aceptación de la hipótesis nula, indicando que no hay influencia del coeficiente sobre el esfuerzo máximo.

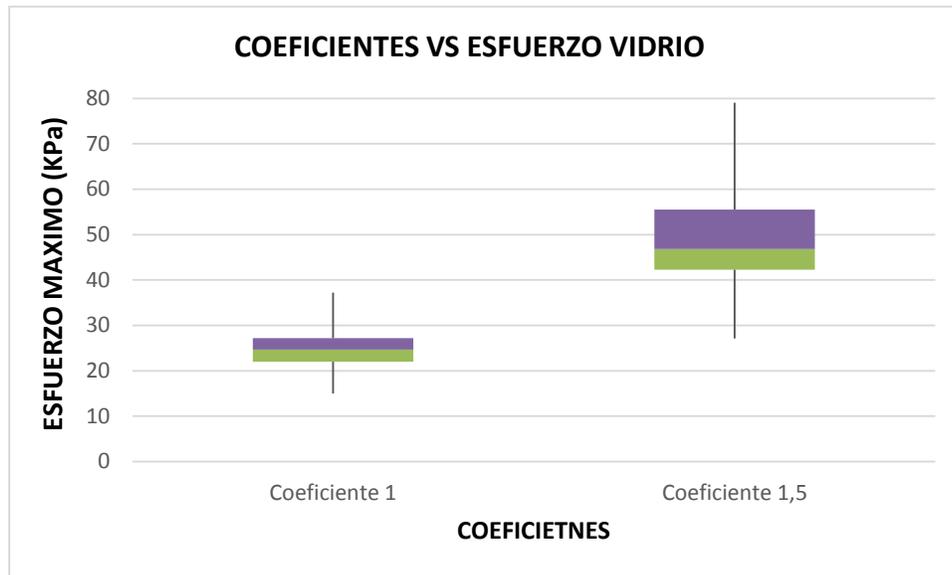
Tabla 5.26 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Vidrio

	Probeta	Esfuerzo Máximo (kpa)		Probeta	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1	1	26,1	COEFICIENTE 1,5	13	41,1
	2	37,2		14	44
	3	20,2		15	79,1
	4	27,83		16	54,56
	5	26,4		17	65,1
	6	20		18	34
	7	22,6		19	45,5
	8	22,93		20	48,1
	9	27		21	27,1
	10	15		22	58,3
	11	27,9		23	42,7
	12	23,3		24	50,5



Gráfica 5.17 Coeficientes Vs esfuerzo máximo Vidrio

Observando la gráfica 5.17, es notorio que la tendencia es semejante entre los esfuerzos de coeficiente 1 y 1.5, sin embargo se obtienen valores mayores para el esfuerzo máximo del coeficiente 1.5.

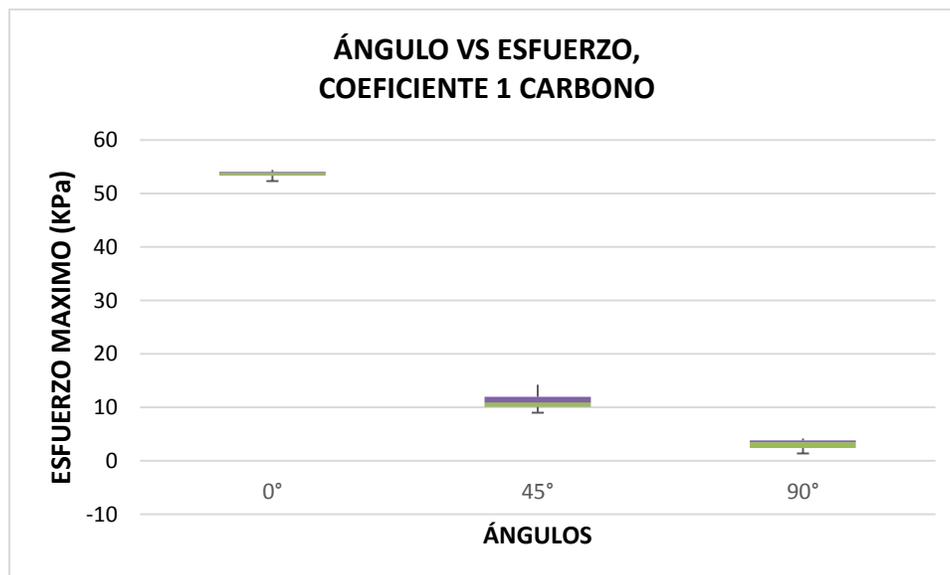


Gráfica 5.18 Diagrama de caja vidrio, coeficientes vs esfuerzo

Se incrementa el valor del esfuerzo crítico cuando hay un aumento en el coeficiente como se observa en la gráfica 5.18 también se observa una variación en los datos con respecto a la media global. Se comprueba que existe una influencia entre el coeficiente y el esfuerzo máximo rechazando la hipótesis nula.

Tabla 5.27 Orientación Vs esfuerzo máximo coeficiente 1 carbono

	Orientación	Número de Prueba	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1	0°	1	54,4
		2	53,9
		3	52,3
		4	53,7
	45°	5	14,23
		6	9
		7	10,4
		8	11,21
	90°	9	3,47
		10	4,14
		11	0
		12	1,35

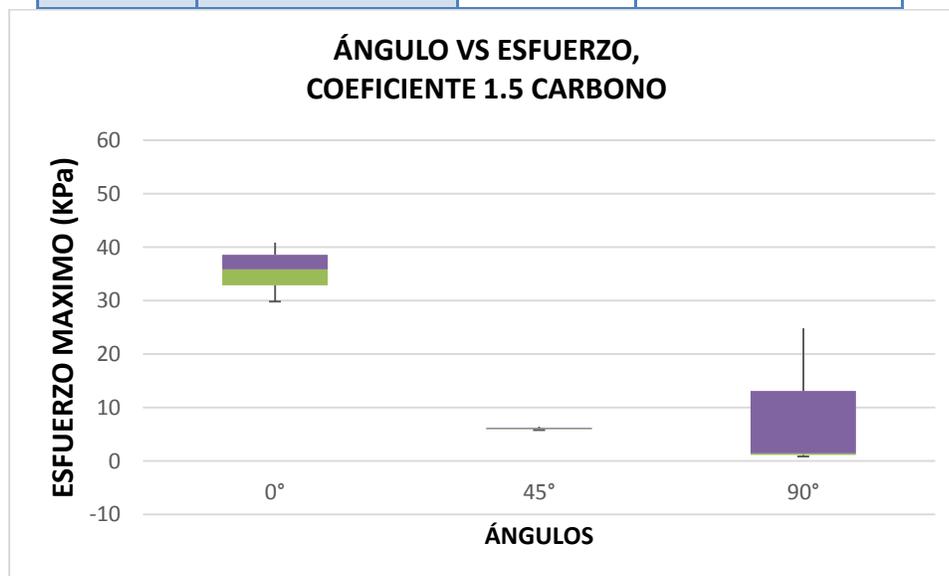


Gráfica 5.19 Diagrama de caja carbono - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1

En la gráfica 5.19 se observa diferentes comportamiento de los grupos de datos de acuerdo a su orientación, obteniendo valores más altos de esfuerzo máximo para una orientación de 0° , esto se refleja en el tipo falla del material, donde se observa un desprendimiento de la fibra por trituración de la misma. El dato de la prueba número 11 fue un resultado nulo debido a que la probeta ya se encontraba vencida.

Tabla 5.28 Orientación Vs esfuerzo máximo coeficiente 1.5 carbono

	Orientación	Número de Prueba	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1,5	0°	13	37,8
		14	40,8
		15	33,9
		16	29,8
	45°	17	5,75
		18	6,41
		19	6,08
		20	5,96
	90°	21	0
		22	1,42
		23	0,85
		24	24,8

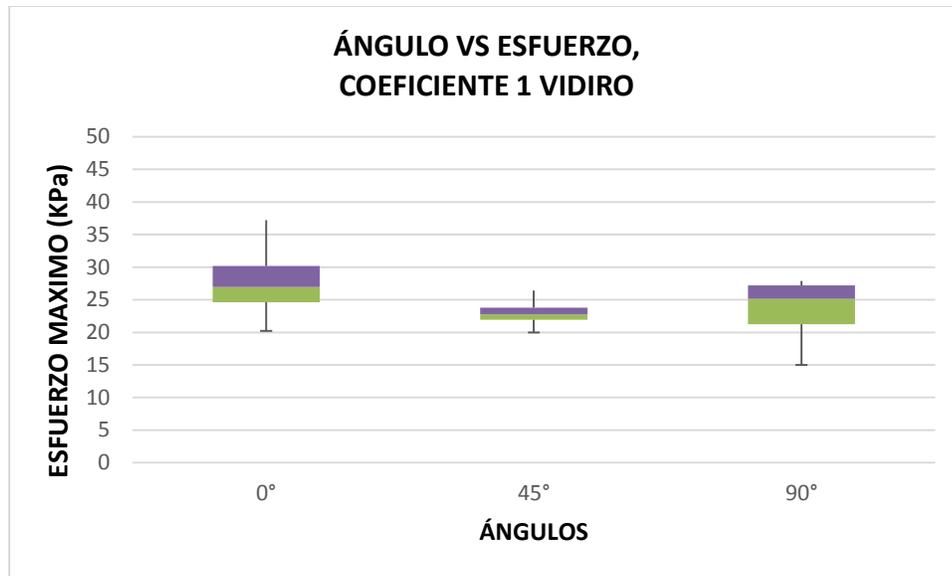


Gráfica 5.20 Diagrama de caja carbono - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.5

En los datos obtenidos para el coeficiente 1.5 se muestra que en la gráfica 5.20 existe una tendencia similar a la gráfica 5.19. Esto soportado en la hipótesis uno, la cual habla de la influencia del ángulo sobre el esfuerzo máximo. Se generaron dos valores diferentes para la orientación de 90°, para la prueba número 21 se obtiene un valor igual a 0 debido a que la probeta presentaba una fractura, al momento de realizar la prueba la maquina no censa esta prueba, siendo el valor mínimo de esta orientación y para la prueba número 24 se da un valor igual a 24,8 kpa, siendo el valor máximo también de esta orientación. Esto se presentó ya que el aditamento entro en contacto con el área de estudio, provocando que el material pudiera acomodarse sobre el mismo aditamento alterando de manera positiva el resultado del esfuerzo máximo.

Tabla 5.29 Orientación Vs esfuerzo máximo coeficiente 1 vidrio

	Orientación	Número de Prueba	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1	0°	1	26,1
		2	37,2
		3	20,2
		4	27,83
	45°	5	26,4
		6	20
		7	22,6
		8	22,93
	90°	9	27
		10	15
		11	27,9
		12	23,3

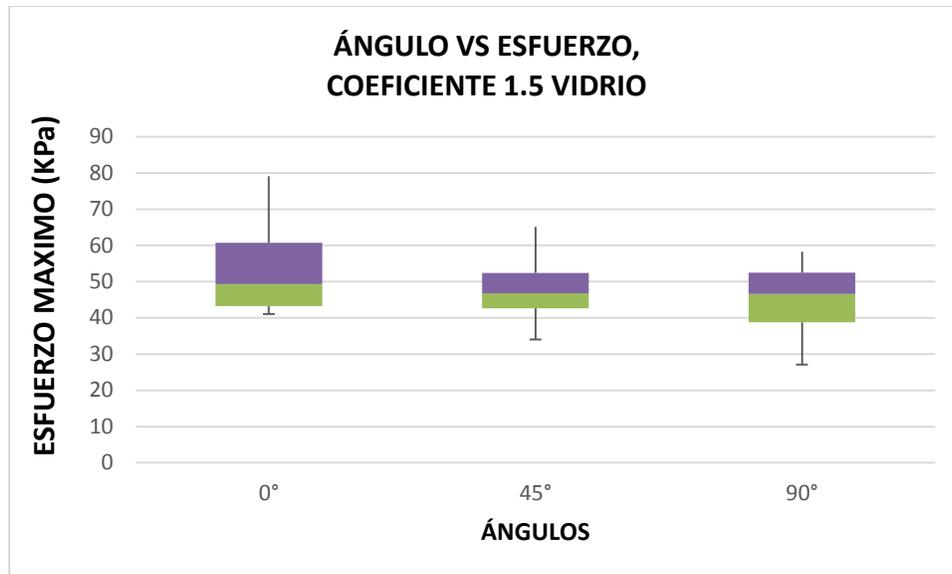


Gráfica 5.21 Diagrama de caja vidrio - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1

En la gráfica 5.21 y 5.22 se observa que no hay una interacción de la orientación sobre el esfuerzo máximo sin importar el tipo de coeficiente, la tendencia de los resultados es similar variando solamente para los valores del coeficiente 1,5 donde se obtiene un valor promedio más alto de esfuerzo máximo.

Tabla 5.30 Orientación Vs esfuerzo máximo coeficiente 1.5 vidrio

	Orientación	Número de Prueba	Esfuerzo Máximo (kpa)
COEFICIENTE 1,5	0°	13	41,1
		14	44
		15	79,1
		16	54,56
	45°	17	65,1
		18	34
		19	45,5
		20	48,1
	90°	21	27,1
		22	58,3
		23	42,7
		24	50,5

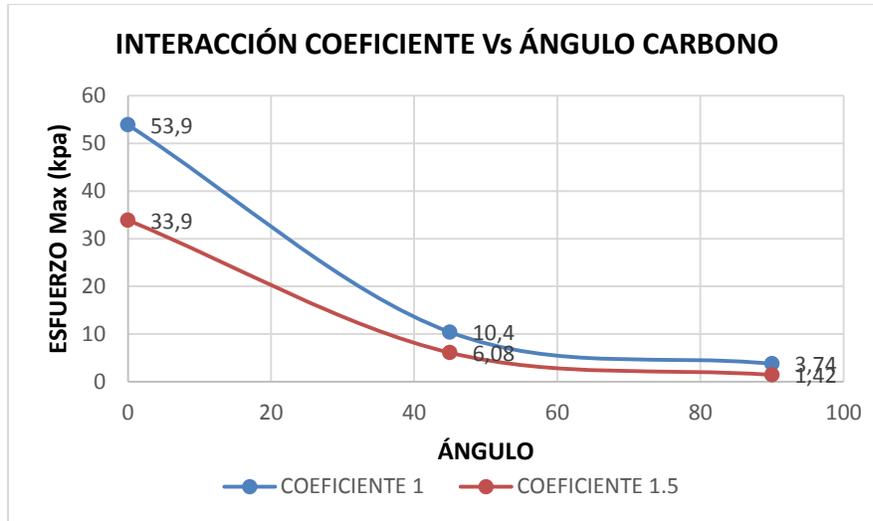


Gráfica 5.22 Diagrama de caja vidrio - ángulo vs esfuerzo, coeficiente 1.5

El proceso de elaboración de cada una de las gráficas de caja se encuentra en el anexo C 5-1 donde se detallan cada uno de los puntos que se utilizaron para la elaboración de las gráficas.

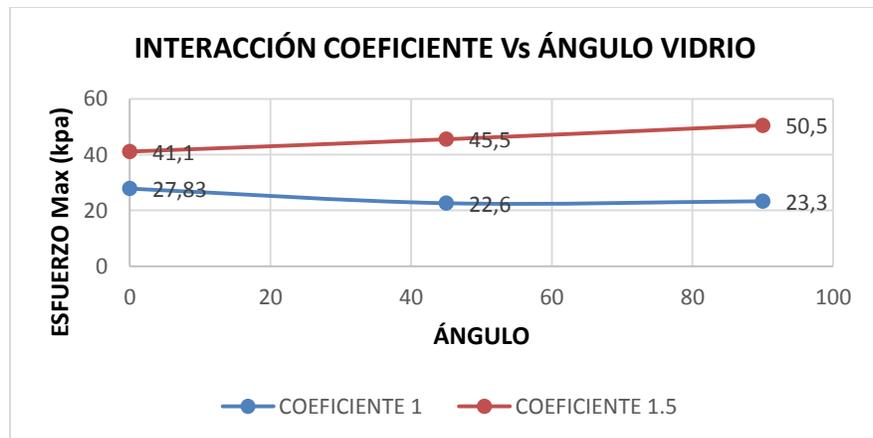
5.2.2 Interacción entre Coeficiente y Ángulo

En la gráfica 5.23 se observa que no se traslapan la línea de la dispersión de los datos lo que implica que no existe una interacción entre los parámetros de ángulo y coeficiente para el material de carbono confirmando las hipótesis planteadas anteriormente en donde solo hay una influencia del ángulo para este material. Así se generen y se estudien más coeficientes y orientaciones diferentes nunca se generara una interacción entre estos dos factores.



Gráfica 5.23 Interacción coeficiente vs ángulo

Para el material de vidrio gráfica 5.24 se evidencia que el comportamiento de la gráfica es igual a la gráfica 5.23 donde los datos no se superponen, demostrando que no hay una interacción entre los dos parámetros analizados y respaldando los resultados de los análisis de varianza en donde para el material de vidrio hay una influencia del coeficiente mas no del ángulo.



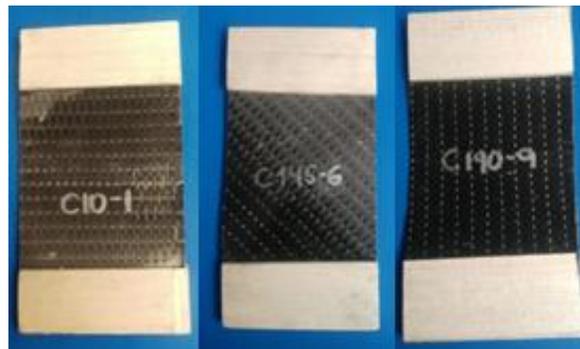
Gráfica 5.24 Interacción coeficiente vs ángulo vidrio

La fractura de la fibra inicia con defectos superficiales. Para el material de carbono se encontraron dos tipos de fallas como se puede observar en la figura 5.12, para visualizar las fracturas de las gráfica dirigirse al Anexo B 4-2, se presenta en las probetas de 0° trituración de la fibra, evidenciándose un desprendimiento del material debido a una inestabilidad de la matriz como se encontró en la referencia (Wu., 1997).

Al aumentar la carga se genera un pliegue a lo largo de la lámina; en este caso el fallo de la fibra depende en gran parte de la interacción entre la fibra y la matriz, por lo tanto si la matriz tienes pequeños defectos estos influirán a lo largo de la lámina.

También se puede observar que para las probetas de 45° y 90°, según Tsai-Wu en el año 1997, el comportamiento de la falla de la matriz con respecto al esfuerzo a la cual está sometida se presenta en una orientación de 45° y 0°, respectivamente, con respecto al eje de carga (Wu., 1997).

Figura 5.12 Tipos de fracturas por orientación Carbono



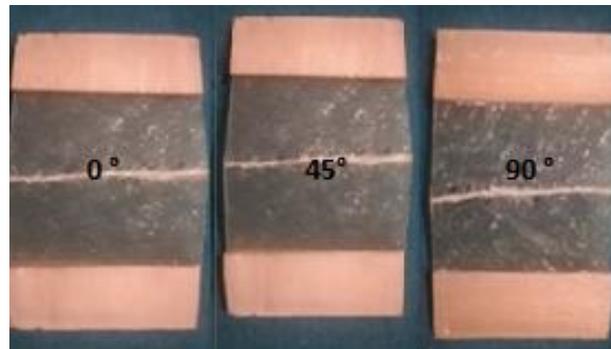
Los materiales compuestos sometidos a compresión producen micro-pandeo. Este fallo es cuadrático, al igual que los criterios asociados con modos de fallo de Tsai-Wu y Christensen, se deduce a partir de la invariancia no cambia al aplicarle transformaciones ante rotación (en la dirección de la fibra). Dicha invariancia es debida a que sus propiedades físicas no dependen de la carga transversal de estos materiales (Castillo, 2016).

Rey (2011) Expone otros tipos de falla de material encontrados en las pruebas con material carbono, uno de estos fallos es el despegamiento de la fibra donde se evidencia una fractura con relieve (Rey, 2011).

En la figura 5.13 se observa que la banda de corte se presenta en las tres orientaciones de manera semejante. Debido a que el material es multidireccional, el rendimiento y la falla de la banda no se presentan con una orientación determinada para cada ángulo como se nombra en la referencia (Wu., 1997), si no que se presenta siempre a 0° con respecto al eje de la carga.

De igual manera Rey para las pruebas de vidrio se encuentra un tipo de fallo agrietamiento frágil donde la causa de la fatiga se genera por una carga cíclicamente repetida y esta se inicia y se propaga durante el mismo ciclo (Rey, 2011).

Figura 5.13 Tipos de fracturas por orientación Vidrio



VI CONCLUSIONES

El diseño del aditamento cumplió con la función de distribuir las cargas uniformemente a lo largo de las probetas. El agarre diseñado para el aditamento logro fijar y centrar la probeta para poder ser ensayada correctamente. Esto validado a través de un cálculo de tolerancias geométricas y de planicidad cumpliendo así con la norma ASTM C364 / C364M.

Las fuentes de error en las pruebas de pandeo de materiales compuestos prepreg unidireccional de carbón 9.0oz/sq - 12K y Prepreg 7781 E-Glass se pueden dar cuando se genera una carga que no esté totalmente centrada o no sea uniforme a lo largo del tab. De igual manera el mal montaje de las probetas en el aditamento puede interferir en la prueba generando datos erróneos.

En el material compuesto pre-preg unidireccional de carbón 9.0oz/sq - 12K y Prepreg 7781 E-Glass de carbono se observó una clara influencia de la orientación sobre el esfuerzo máximo, donde para cada una de las orientación de generaron diferentes comportamientos con respecto al tiempo de pandeo y fallas, en la orientación de 0° para los dos coeficientes se obtuvo un tipo de falla de trituración de fibra. Esto soportado bajo el rechazo de la hipótesis nula.

Para el material pre-preg de vidrio 7781 E-Glass fue totalmente contrario dado que para este material la orientación no influyo sobre el esfuerzo máximo, esto comprobado a través de un análisis de varianza que se desarrolló, lo cual género que se aceptara la hipótesis nula. El comportamiento de este material para los dos coeficientes evaluados fue diferente obteniendo valores más elevados de esfuerzo crítico para coeficiente 1.5.

De igual manera esto fue aprobado mediante el análisis de varianza rechazando la hipótesis nula, y se evidencio en la fractura de las diferentes probetas, donde se obtuvo un tipo de falla de formación de banda de corte.

De acuerdo a los datos obtenidos se evidencio que por más que se generen cambios en los coeficientes y orientaciones no existirá una interacción entre estos dos factores, puesto que se realizó una gráfica de dispersión, gráfica 5.23 de datos reflejando claramente que esta relación entre factores no se genera ya que no se traslapan los datos.

Al momento de realizar las pruebas de pandeo para material pre-preg de vidrio 7781 E-Glass se obtuvieron valores mayores de esfuerzo máximo (32 Kpa – 58 Kpa) en el coeficiente de 1.5 lo que confirmo que al ser un material multidireccional el factor que tiene mayor influencia es el del coeficiente.

La falla del material carbono se presentó siempre por la orientación del hilado de la fibra, en las probetas de 45° el pandeo se generó en la misma dirección del tejido de la fibra ocasionando así la falla sobre la línea de pandeo, de acuerdo al análisis de varianza se evidencio que existe una influencia del ángulo sobre el esfuerzo máximo, Esto no sucede en un material multidireccional como lo es el pre-preg de fibra de vidrio donde su condición multidireccional no influye en la ruptura de la probeta.

VII RECOMENDACIONES

- Se recomienda al realizar el diseño experimental para el cálculo de réplicas que se van a obtener, tener en cuenta el intervalo de confianza (CI), con el aumento de este intervalo se incrementarían la cantidad de réplicas a fabricar, por tal motivo se debe tener en cuenta el material disponible para su fabricación.
- Con el fin de generar un mayor agarre entre los tabs y del aditamento que se diseñe o las mordazas que están disponibles en el laboratorio de la máquina universal de ensayos, se recomienda fabricar los tabs con tabla de balsa, esto con el fin de evitar que las probetas se deslicen dentro del agarre y no se generen datos en el laboratorio.
- Si se desea realizar un aditamento para las pruebas que se realicen, es recomendable tener en cuenta que las mordazas que prensan el tab, no presenten algún tipo de movimientos que pueda intervenir en el desarrollo de las pruebas, ya que estas mordazas pueden entrar en contacto con el área de estudio y ayudan a que el material se acomode, provocando alteración en los valores que se obtendrán.
- Con las probetas del material prepreg unidireccional Carbon Fabric 9.0oz/sq 12k, a orientación de 90° , se debe ser cuidadoso en su manipulación, ya que estas probetas son frágiles y se puede generar una fractura mínima que influenciaría en las pruebas.

- Se debe usar las herramientas adecuadas que se nombran dentro del anexo A 3-6, esto con el fin de facilitar el corte y que no se produzca algún tipo de astilla o fisura en el área de estudio del material, también con el fin de evitar que se disminuya el área de estudio que se desee evaluar.
- En este trabajo la velocidad de las pruebas fue de 1 mm /seg, sin embargo se debe seguir los parámetros de velocidad de la norma ASTM 2954-15 con ayuda del paper Failure behaviour of carbon fibre/epoxy composites in pin-ended buckling and bending tests.
- Para próximos trabajo en los cuales se trabaje con materiales preimpregnados se recomienda realizar un estudio teórico microfotografía con el cual se pueda evaluar el tipo de fallas presentadas donde se pueda realizar un contraste entre ellas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, D. D. (1 de enero de 2014). *CW*. Obtenido de Composites World:
<https://www.compositesworld.com/articles/buckling-of-composite-material-compression-specimens>
- Addison Montoya, J. P. (2015). Diseño de los elementos del acero sometidos a flexotracción y flexocompresión. Venezuela: REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA.
- Analysis, A. F. (2016). *Auto FEM Analysis*. Obtenido de Structural Finite Element Analysis for Auto CAD: <http://autofem.com/en/products/autofem/autofem-thermal-analysis.html>
- Cardenas, J. (06 de Noviembre de 2015). *Networkianos*. Obtenido de
<http://networkianos.com/anova-de-un-factor-que-es-como-analizar/>
- Castillo, E. (06 de Septiembre de 2016). ANÁLISIS DE CRITERIOS DE FALLO PARA MATERIALES COMPUESTOS. Valencia.
- D2915, A. (2017). *ASTM.ORG*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D2915.htm>
- D3410M-16, A. D. (2016). *ASTM*. Obtenido de Método de prueba estándar para propiedades de compresión de materiales compuestos de matrices de polímeros con sección de instrumentos no soportados por carga de corte: www.astm.org/Standards/D3410.htm
- E2954, A. (2015). *ASTM.ORG*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/E2954.htm>
- E9-09, A. (2017). *Métodos de prueba estándar de pruebas de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente*. *astm.org*.
- Gallo, J. R. (2011). *El ala es considerada uno de los mayores logros de la ingeniería aeronáutica. Combina en un sólo componente una estructura eficiente, un componente multifuncional y una ligereza asombrosa*. Ecuador.
- Gazechim. (Octubre de 2016). *Gazechim Composites Iberica*. Obtenido de
<http://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/prepreg.html>
- Glast, F. (2017). *Fibre Glast Developments Corporation*. Obtenido de
https://www.fibreglast.com/category/PrePreg_Fabrics
- Gürdal, Z. H. (1985). El efecto de las máquinas tragamonedas en el comportamiento de pandeo y post-bloqueo de las placas laminadas. *astm.org*, (págs. 82-87).
- Jamison, R. y. (1980). Predicción de la carga crítica de pandeo para un laminado de grafito / epoxi. (págs. 14-16). *astm.org*.

- K. Padmanabhan, K. (1995). Failure behaviour of carbon fibre/epoxy composites in pin-ended buckling and bending tests. (págs. 201-206). ELSEVIER.
- K. Padmanabhan, K. (1995). Failure behaviour of carbon fibre/epoxy composites in pin-ended buckling and bending tests. *Composites*, 201-206.
- Khong, P. (1999). Diseño óptimo de laminados para máxima resistencia al pandeo y peso mínimo. *astm.org*, 25-32.
- López, R. C. (2014). *ENSAYO A COMPRESIÓN DE LAMINADOS UNIDIRECCIONAL CARBONO/EPOXY. UN ESTUDIO COMPARATIVO*. Sevilla: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA.
- Marshall, R. S. (1988). *Pandeo de un sublaminado dañado en un laminado con impacto*. *astm.org*.
- Megson, T. (2013). *Aircraft Structures*. ELSEVIER.
- NTPT. (2016). *North Thin Ply Technology*. Obtenido de Servicios de Ingeniería: <https://www.thinplytechnology.com/services/engineering-services>
- O.T. Thomsen, K. K. (2010). Caracterización experimental de los parámetros que controlan la falla compresiva de en Compuestos de fibra de carbono unidireccional ., (pág. 10).
- Rey, J. (04 de 2011). Falla de los materiales compuestos.
- Ruiz, D. B. (2006). *Diseño de fabricación en fibras de carbono de un compensador de giro de una aeronave*. Cádiz: Universidad de Cádiz.
- Santillana, J. S. (2008). PANDEO. En J. S. Santillana, *PANDEO* (pág. Tema 10). Salvador.
- Software, M. S. (1972). *Minitab18*. Recuperado el 2018, de Statistical: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>
- Sohail, S. (Septiembre de 2014). *Memoria*. Obtenido de Determinación del coeficiente de esbeltez de columnas mediante MEF: <https://dugi-doc.udg.edu/browse?type=author&value=Safeer%2C+Sohail>
- Useche, L. S. (2004). FALLA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS. *Scientia et Technica Año, 6*.
- Vilar, J. (2006). *Estadística 2*. España: Publicaciones de la UDC.
- Wu., J. W. (1997). *Advance in applied mechanics Vol.33*. San Diego CA: ACADEMIC PRESS.
- Zhou, L. y. (2005). *En el cálculo de la carga de pandeo elástico de estructuras a partir de datos experimentales*. Obtenido de ASTM.org: https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/TESTEVAL/PAGES/JTE11753.htm

ANEXOS

ANEXO A 3-1 Propuestas de aditamentos para implementación en ensayo de pandeo.

ANEXO A 3-2 Planos acople máquina universal de ensayos.

ANEXO A 3-3 Mecanizado del aditamento.

ANEXO A 3-4 Configuración software máquina universal de ensayos.

ANEXO A 3-5 Montaje probetas máquina universal.

ANEXO A 3-6 Elaboración de probetas.

ANEXO B 4-1 Suavización gráficas documento y Gráficas de resultados Excel.

ANEXO B 4-2 Registro fotográfico de falla prueba de pandeo.

ANEXO C 5-1 Análisis de tendencia y ANOVA documento Excel.