



Diseño y construcción de un sistema portátil para curado automático de materiales compuestos

| Fecha de recibido: 09 de julio del 2021 | Fecha de aprobación: 20 de noviembre del 2021 |

Andrés Marcelo Carranco Herrera

Magíster en Dirección Logística e Ingeniero en Mecatrónica

Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

Ecuador

Rol del investigador: teórico, experimental, escritura

✉ acarranco@fae.mil.ec

Cómo citar este artículo: Carranco Herrera, A. M. (2022). Diseño y construcción de un sistema portátil para curado automático de materiales compuestos. *Ciencia y Poder Aéreo*, 17(1), 81-97. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.741>



Diseño y construcción de un sistema portátil para curado automático de materiales compuestos

Design and construction of a portable system for automatic curing of composite materials

Projeto e construção de um sistema portátil para cura automática de materiais compostos

Resumen: La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), entidad líder a nivel nacional para el desarrollo aeroespacial, busca disminuir constantemente la dependencia tecnológica para el mantenimiento aeronáutico; y es en este punto que se vuelve necesario desarrollar todo tipo de herramientas tecnológicas que apoyen tareas de supervisión y mantenimiento. Una de las áreas prioritarias para la FAE es la de materiales compuestos empleados ampliamente en la fabricación de productos aeronáuticos; por ello, se plantea el diseño y la construcción de un sistema portátil para el curado automático de materiales compuestos, a fin de contribuir a la investigación, caracterización, manufactura y reparación de componentes aeronáuticos. Para alcanzar las mejores propiedades mecánicas que requiere un producto aeronáutico, a fin de que soporte las cargas a las que se verá sometido el material durante una operación de vuelo, es fundamental conseguir un buen desempeño del proceso de curado. Para el desarrollo del sistema, se utilizó una metodología conceptual con diversas alternativas de solución, orientando el esfuerzo a bosquejar, dimensionar el equipo y elegir el mejor concepto del producto. Una vez definido el concepto, se materializó el sistema precisando los subsistemas de control de vacío, que permite una redistribución de la matriz en las fibras de refuerzo del material compuesto durante el curado; el subsistema de tratamiento térmico se encarga de incrementar la temperatura del *composite* a fin de alcanzar las propiedades mecánicas necesarias. La automatización del proceso de curado de materiales compuestos genera óptimos resultados, y logra un equipo versátil, útil y robusto. Finalmente, al emplear el equipo para el propósito que fue diseñado, se evidencia la eficiencia que se tiene en el curado de materiales compuestos de manera automatizada frente a un curado manual a temperatura ambiente.

Palabras clave: control de vacío; curado; materiales compuestos; sistema portátil automático; tratamiento térmico.

Abstract: The Ecuadorian Air Force (EAF), a leading entity at the national level for aerospace development, constantly seeks to reduce technological dependence for aeronautical maintenance. It is at this point that it becomes necessary to develop all kinds of technological tools that support supervision and maintenance tasks. One of the priority areas for the FAE is composite materials widely used in the manufacture of aeronautical products. For this reason, the design and construction of a portable system for the automatic curing of composite materials is proposed to contribute to the research, characterization, manufacture and repair of aeronautical components. To achieve better mechanical properties required by an aeronautical product in order to withstand the loads to which the material will be subjected during a flight operation, it is essential to achieve good performance in the curing process. For the development of the system, a conceptual methodology was used, proposing various solution alternatives, directing the effort to sketch, size the equipment and choose the best product concept. Once the concept was defined, the system was materialized specifying the vacuum control subsystems that allow a redistribution of the matrix in the reinforcing fibers of the composite material during curing; the heat treatment subsystem is responsible for increasing the temperature of the composite in order to achieve the necessary mechanical properties. The automation of the curing process of composite materials generates optimal results, achieving versatile, useful and robust equipment. Finally, when using the equipment for the purpose for which it was designed, the efficiency of curing composite materials in an automated manner is evident compared to manual curing at room temperature.

Keywords: Vacuum control; curing; composite materials; automatic portable system; heat treatment.

Resumo: A Força Aérea Equatoriana (FAE), entidade líder em nível nacional para o desenvolvimento aeroespacial, busca constantemente reduzir a dependência tecnológica para manutenção aeronáutica. Torna-se necessário então desenvolver todos os tipos de ferramentas tecnológicas que apoiem as tarefas de supervisão e manutenção. Uma das áreas prioritárias para a FAE é a de materiais compostos, amplamente utilizados na fabricação de produtos aeronáuticos. É por isso que se propõe o projeto e construção de um sistema portátil para a cura automática de materiais compostos para contribuir com a pesquisa, caracterização, fabricação e reparo de componentes aeronáuticos. Para atingir as melhores propriedades mecânicas exigidas por um produto aeronáutico, a fim de suportar as cargas a que o material será submetido durante uma operação de voo, é essencial obter um bom desempenho no processo de cura. Para o desenvolvimento do sistema, foi utilizada uma metodologia conceitual, propondo várias alternativas de solução, direcionando o esforço a esboçar e dimensionar o equipamento, e escolher o melhor conceito de produto. Uma vez definido o conceito, materializou-se o sistema especificando os subsistemas de controle de vácuo, que permitem uma redistribuição da matriz nas fibras de reforço do material composto durante a cura. O subsistema de tratamento térmico é responsável por aumentar a temperatura do composto para atingir as propriedades mecânicas necessárias. A automação do processo de cura de materiais compostos gera ótimos resultados, obtendo equipamentos versáteis, úteis e robustos. Por fim, ao utilizar o equipamento para a finalidade para a qual foi projetado, fica evidente a eficiência da cura de materiais compostos de forma automatizada, em relação à cura manual à temperatura ambiente.

Palavras-chave: Controle de vácuo; cura; materiais compostos; sistema portátil automático; tratamento térmico.

Introducción

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), institución centenaria, históricamente ha cumplido a cabalidad su misión institucional de desarrollar la capacidad militar aeroespacial. Infortunadamente, en las últimas décadas ha existido un incremento en la dependencia tecnológica extranjera, lo que evidencia la necesidad de realizar reparaciones y mantenimiento de la mayoría de aeronaves, equipos y componentes aeronáuticos en las organizaciones de diseño y/o producción aeronáutico de origen extranjero, con los consecuentes gastos onerosos para la institución.

Hace pocos años, la FAE empezó la investigación enfocada en el área de materiales compuestos, cuya aplicación es muy amplia en sistemas aeronáuticos. Este proyecto pretende ampliar el tipo de reparaciones menores a otro tipo de reparaciones de mayor complejidad en las aeronaves de la FAE que tienen componentes fabricados con materiales compuestos. Una de las fases críticas en el procesamiento de materiales compuestos se conoce como curado y es en la cual los *composites* adquieren sus propiedades mecánicas finales. Por tanto, el presente estudio será de valor para mejorar las tareas de reparación y mantenimiento en componentes aeronáuticos y lograr una optimización de los recursos institucionales (Criollo y Yáñez, 2019).

La necesidad de disminuir la dependencia tecnológica en reparaciones de materiales compuestos para la caracterización del material compuesto, la identificación de los daños estructurales más recurrentes y la creación de componentes de material compuesto genera la necesidad de investigar en este campo de la ciencia, y desarrollar en la FAE material compuesto que posea iguales o mejores propiedades mecánicas que los productos de los fabricantes aeronáuticos y que sean utilizados como parches de reparación aeronavegables.

Los materiales compuestos son una combinación de dos o más elementos que tienen propiedades físicas, químicas y mecánicas específicas, que al combinarse obtienen propiedades que traen ventajas frente a materiales tradicionales como metales, cerámicos,

etc. Generalmente, en el material compuesto (MC) se distingue una fase continua (matriz), que son resinas epóxicas y resinas cobaltosas unidas a la fase discontinua (fibras o refuerzos), como fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de aramida, etc.

Con el antecedente planteado, un material compuesto es una combinación de dos o más fases químicamente distintas e insolubles con una interfaz reconocible, de manera que sus propiedades mecánicas son superiores a las de sus componentes cuando actúan de modo independiente (Kalpakjian y Steve, 2008).

El proceso de curado de materiales compuestos inicia con una etapa de conceptualización en la que se definen los componentes (matriz-refuerzo) del MC, considerando las propiedades mecánicas para alcanzar temperaturas requeridas, dimensiones del refuerzo y peso de la matriz a usarse. Sigue la etapa de manufactura del MC, en la que se preparan moldes y se realizan los laminados correspondientes. Finalmente, se tiene la etapa de curado, en la cual aplicando presión de vacío se absorbe todo el aire en los laminados y se redistribuye de mejor manera la matriz (resinas) en el MC; esto ayuda a obtener mejores propiedades mecánicas de los laminados y menor espesor. En paralelo, se realiza la aplicación de energía calorífica que produce la solidificación de la matriz y la unión de refuerzo y matriz para concluir en un MC.

Llevar a cabo un control automático del proceso de curado del material laminado para reparaciones estructurales tiene su importancia, en vista de que, al controlar los procesos de vacío y tratamiento térmico, los componentes laminados pueden obtener mejores propiedades mecánicas como materiales compuestos para reparaciones en componentes aeronáuticos.

El sistema portátil para el curado automático de MC consiste en un gabinete eléctrico metálico robusto al cual se le adaptaron garruchas, que permiten su transporte del taller al hangar o a la línea de vuelo para realizar reparaciones en sitio. Dispone de un cable de alimentación eléctrica, que permite energizar los subsistemas de vacío, tratamiento térmico, control e interfaz con el usuario. Dispone también de una interfaz humano-máquina (HMI: *human-machine interface*), que permite una fácil adaptación y comprensión del

funcionamiento al operador, el mismo que a partir de la información técnica (*datasheet*) de fibras y refuerzos a usarse, ingresa los datos para los tratamientos térmicos (rampas de temperatura) requeridos para el curado automático del mc.

El programa de curado de materiales compuestos requiere la generación de presión de vacío permanente, a fin de redistribuir de mejor manera la resina interlaminar que se coloca en los tejidos del refuerzo constante y, a su vez, se realiza el tratamiento térmico controlado en el laminado. Con este proceso, es posible conseguir mejorar propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, la resistencia a la tensión y compresión, y la resistencia al corte, a las que son sometidos componentes constituidos por materiales compuestos, como las alas de una aeronave en vuelo, y por componentes aeronáuticos menores.

En los equipos portables que se destinan para reparaciones de materiales compuestos de pequeño y hasta mediano calado, se encuentran equipos que de manera individual controlan las variables que actúan dentro del proceso de curado. Por ejemplo, se dispone de termostatos o controladores para mantas térmicas, bombas/generadores de vacío, etc. Así, también existen equipos que son capaces de controlar temperatura y vacío simultáneamente en periodos determinados de tiempo, y que son comercialmente distribuidos en el mercado internacional, más conocidos como Hot-Bonder, los mismos que son desarrollados para las aplicaciones aeronáuticas, automotrices y otras. Estos equipos tienen capacidades similares a las de los equipos más grandes y tradicionales (autoclaves), al tiempo que ofrecen portabilidad. (Briskheat, n.d.)

Su diseño y tamaño práctico permiten que un equipo reducido de técnicos pueda disponer del equipo en mención y trasladarse a lugares donde no hay las facilidades de un horno o una cámara autoclave para realizar el trabajo de curado de mc. Desde un punto de vista logístico, esto resulta relativamente económico en escenarios donde las aeronaves no pueden permanecer paradas luego de un percance, en cumplimiento de la planificación de las operaciones aéreas.

Una vez concluido el proceso de curado en este proyecto de investigación, se procedió a la caracterización y el análisis de las propiedades del mc. Fue

necesario aplicar ensayos destructivos a las probetas, que se desarrollaron para definir sus propiedades mecánicas. Los ensayos mecánicos simulan situaciones reales a las que se sometería el material utilizando equipos adecuados que certifiquen la validez de los resultados (Dávila *et al.*, 2011).

En este aspecto, se analizaron los diferentes ensayos estáticos que se podrían realizar para determinar las propiedades mecánicas. El ensayo a compresión es un método que permite definir las propiedades mecánicas del material como: resistencia máxima a la compresión, deformación por compresión máxima, módulo de elasticidad a compresión, relación de Poisson en compresión y deformación de transición. Este ensayo se lleva a cabo bajo los lineamientos de la norma ASTM D3410/D3410M (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2016).

El ensayo de flexión se utiliza para comprobar la resistencia de las fibras exteriores del laminado y el módulo de Young de materiales compuestos homogéneos y poliméricos. La probeta en este ensayo aplica una carga hasta alcanzar la mayor deformación de las fibras en las laminaciones exteriores. El ensayo a flexión se realiza con base en la norma ASTM D790-17 “*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*” (American Society for Testing and Materials, 2021).

Finalmente, el ensayo analizado y aplicado en este proyecto de investigación fue el ensayo de tensión (tracción), el cual representa uno de los métodos destructivos más eficientes para establecer las propiedades mecánicas del material, ya que se somete a una probeta normalizada a una carga axial de tensión hasta producir la rotura (Carvajal, 2020). Dicho ensayo se realizó con base en la norma ASTM D3039/D3039M-14, con la cual se determinan las propiedades mecánicas de componentes sometidos a tracción (American Society for Testing and Materials, 2019).

Esta norma entrega los lineamientos de la geometría y la cantidad necesaria de probetas a ensayarse para obtener resultados confiables. Así, estipula cinco ensayos efectivos para validar los resultados y considera también dimensiones de las probetas a ensayarse (largo, ancho y espesor), material y orientación de las fibras, etc.

Método y descripción de la metodología

Diseño del sistema

El desarrollo del sistema busca alcanzar principalmente un diseño óptimo, modularidad, facilidad de uso y seguridad industrial. Para ello, fue necesario estudiar las especificaciones técnicas de los materiales previo al diseño e implementación de la maleta portátil para el curado del mc. Así también se analizó el *software* que se utiliza en el desarrollo del control, y junto al HMI, se busca un equipo robusto desde el punto de vista físico-estructural y a la vez versátil desde la perspectiva del usuario en el manejo del sistema.

Modularidad

Los equipos y sistemas del sector industrial día a día se proyectan hacia la reducción de los tamaños físicos de sus componentes y hacia la mejora de los diversos sistemas. Una manera óptima de lograr este cometido es por medio del modularidad, que permite analizar y dar mantenimiento al sistema, de modo que no se interrumpa el funcionamiento de los demás subsistemas, teniendo en cuenta constantemente las características establecidas por el fabricante de manera independiente. En su disposición funcional (véase figura 1), el sistema utiliza energía eléctrica, materiales y señales de entrada para a través del proceso funcional intrínseco obtener materiales compuestos con propiedades mecánicas específicas.



Figura 1. Estructura funcional sistema portátil automatizado de curado de MC
Fuente: elaboración propia.

Subsistema de vacío

El sistema de vacío se diseñó de tal manera que el control de los parámetros (presión y caudal) logren su funcionamiento eficiente. El objetivo principal del subsistema de vacío es realizar la redistribución de la matriz que se presenta en estado líquido en los espacios interlaminares de las fibras de refuerzo y retirar la formación de burbujas de aire en los materiales compuestos con el fin de obtener óptimas propiedades mecánicas en los laminados, se observa la estructura funcional de mencionado subsistema

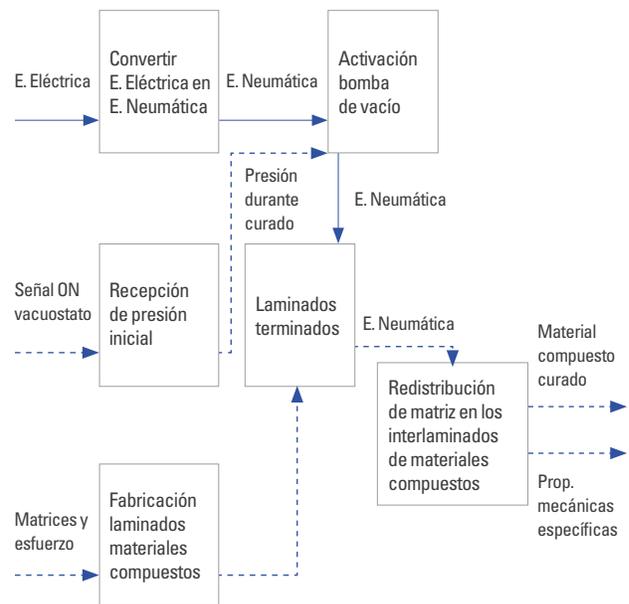


Figura 2. Estructura funcional subsistema de vacío
Fuente: elaboración propia.

El subsistema de vacío para el curado de los materiales compuestos está conformado por una bomba de vacío, un acumulador de vacío, un interruptor de presión de vacío (vacuostato), un instrumento de medición de presión de vacío (vacuómetro), ventosas, mangueras de conexión y bolsas de vacío, además de algunos accesorios (sellos, mangueras y racores), como se observa en la figura 3. Estos elementos permiten establecer las condiciones físicas necesarias para realizar el curado de materiales compuestos por vacío.

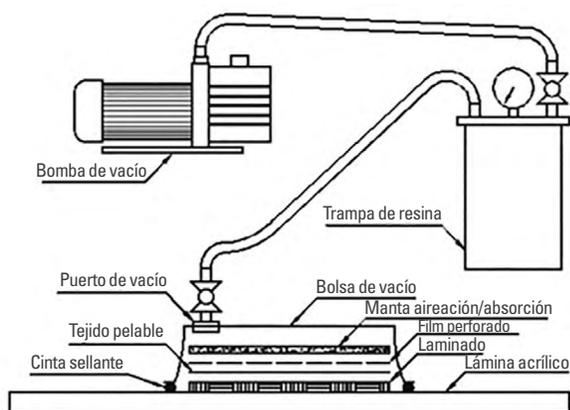


Figura 3. Esquema general de un sistema de bolsa de vacío

Nota. Principales componentes de un subsistema de vacío.

Fuente: Tomado de Arruti (2016, p. 24).

Para una optimización de los equipos, se hizo el levantamiento de la información de la cantidad de tiempo que la bomba permanece prendida en los procesos de curado; se determinó que la bomba permanece encendida como mínimo de 30 a 45 minutos y alcanza fácilmente los 100 °C de temperatura en funcionamiento constante, y al ser refrigerada por aire, se ve limitado su tiempo de vida útil. Así, se hicieron pruebas de campo para determinar la tendencia al incremento de temperatura durante un periodo de 20 minutos, con lo que se obtuvieron los valores definidos en la tabla 1.

Tabla 1. Incremento de temperatura de bomba de vacío Becker VT 4.8 en funcionamiento continuo

ORD	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
1	1	36
2	2	44
3	4	57
4	6	68
5	8	77
6	10	84
7	12	90
8	15	97
9	18	99
10	20	99

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia, la temperatura de operación sobre los 15 minutos se mantiene casi constante sobre los 95 °C, lo cual está limitando el tiempo de vida útil de la bomba. Por este motivo, se diseñó un circuito de control electrónico-neumático que es automatizado por la acción del vacuostato, que define una presión de vacío mínima a la que se desea prender la bomba y otra presión de vacío máxima que bordeará los 28-30 pulgadas de mercurio (Hg) a nivel del mar y varía en función de la altitud del lugar de prueba.

Al ser esto una parte fundamental pero aún insuficiente, fue necesario utilizar un tanque reservorio de vacío, el cual acumula el vacío interior a través de la operación de la bomba para después alimentar y producir o mantener el vacío a los enfundados del laminado de materiales compuestos. De esta forma, se optimizó el funcionamiento de la bomba de vacío, se incrementó su tiempo de vida útil y se evitó el recalentamiento que se evidenciaba cuando se operaba manualmente.

En la figura 4, se puede observar el diseño de la conexión neumática del subsistema de vacío para corroborar lo antes mencionado.

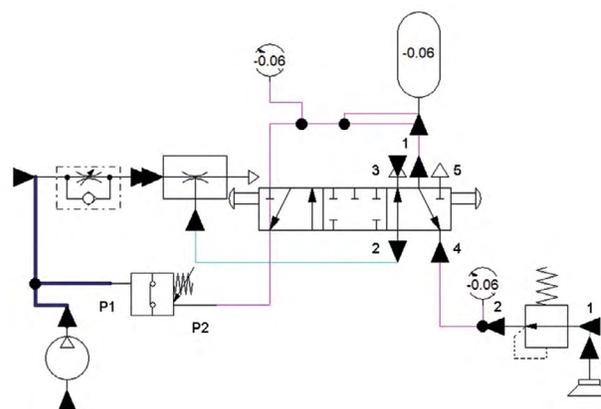


Figura 4. Diseño de circuito neumático

Fuente: elaboración propia.

La bomba que se usa es una bomba de vacío de paletas sin aceite y refrigerado por aire, cuyas características técnicas y de operación se resumen en la tabla 2.

Tabla 2.
Características técnicas de la bomba de vacío

ORD	Magnitud	Valor	Unidades
1	Tensión nominal	120	Voltios
2	Potencia	420	Watts
3	Fase	1	
4	Masa	11,5	Kilogramos
5	Máximo volumen de aspiración	9,1	Metros cúbicos / hora
6	Revoluciones máx.	3200	RPM

Fuente: VT 4.8. Becker (<https://www.becker-international.com/de/en/>).

Acumulador de vacío

Con la finalidad de brindar a la bomba de vacío un tiempo apreciable de reposo y que no permanezca encendida durante el proceso de curado de materiales compuestos, se utiliza un tanque acumulador de vacío metálico para conectar a la bolsa de vacío que contiene el laminado de materiales compuestos.

Vacuómetro

El vacuómetro es el instrumento de medición que se utiliza para medir presiones de vacío o negativas. La presión de vacío es inferior a la presión atmosférica.

Vacuostato

El vacuostato controla automáticamente la acción de una bomba de vacío para prenderla y apagarla según se disponga de los valores de presión predeterminados mecánicamente a través de tornillos.

Mangueras

Para la conducción del aire en el proceso de vacío, es necesario utilizar mangueras de poliuretano para conexión entre la bomba, el tanque acumulador de vacío, el proceso enfundado de laminado, el vacuostato y el vacuómetro.

Ventosas

Las ventosas son componentes que, tras aplicar una presión negativa del aire (vacío), se adhieren a las

superficies poco porosas. La diferencia de presión entre la atmósfera en el exterior de la ventosa y la cavidad de baja presión en el interior de la estructura es lo que mantiene la ventosa sujeta a la superficie.

Subsistema de tratamiento térmico

El objetivo principal del subsistema de tratamiento térmico es generar un programa de calentamiento a los laminados, de tal forma de endurecer y compactar la matriz del MC con las fibras de refuerzo en un solo, para alcanzar óptimas propiedades mecánicas en los laminados, en la figura 5 se observa la estructura funcional de mencionado subsistema.

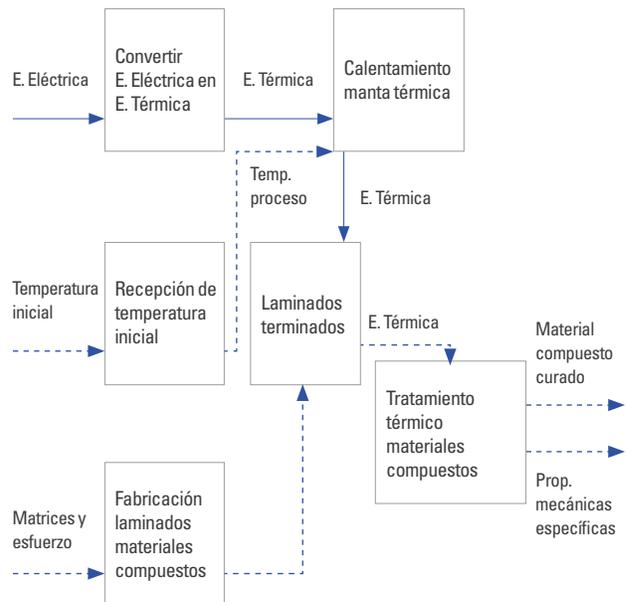


Figura 5. Estructura funcional del subsistema de tratamiento térmico
Fuente: elaboración propia.

El subsistema de tratamiento térmico consta de actuadores principales como la manta térmica que, por conducción directa de calor, incrementa la temperatura del laminado de matriz y refuerzo combinados. Se realiza el curado apegado a las rampas de temperatura establecidas para alcanzar unas propiedades mecánicas específicas. Un esquema de este proceso se observa en la figura 6.



Figura 6. Esquema general del sistema térmico
 Nota: Principales componentes del subsistema térmico.
 Fuente: elaboración propia.

Para la activación de las mantas, la maleta de curado automático permite el paso de corriente alterna a través de un SSR (relé de estado sólido), que hace las veces de interruptor para la alimentación de la manta de acuerdo con la señal de salida emitida desde el controlador lógico programable (PLC).

Manta térmica

La manta térmica está compuesta por resistencias eléctricas flexibles que están completamente cubiertas por una capa de silicón que ayuda a redistribuir el calor generado durante su alimentación eléctrica, transformando la energía eléctrica en energía térmica. La manta térmica o calefactora dispone de un cordón eléctrico de alimentación con cables que tienen un aislante especial capaz de soportar temperaturas superiores a los 150 °C.

Termopar tipo J

Un termopar es el tipo de sensor de temperatura más usado en la industria. Suele estar formado por dos

conductores de distinto material, cuyo extremo se encuentra unido mediante una soldadura (Alzate et al., 2007).

Desarrollo del algoritmo

El desarrollo del algoritmo parte de la gráfica mostrada en la figura 7, la cual está formada por tres rampas de ascenso de temperatura, cuatro estados estacionarios de temperatura y una rampa de descenso de temperatura. Se puede observar que el primer estado estacionario corresponde a un estado inicial, que puede ser interpretado como la temperatura ambiente hasta un instante de inicio del sistema. Secuencialmente, se observan las rampas de temperatura de curado del mc con sus consecuentes temperaturas de estado estable.

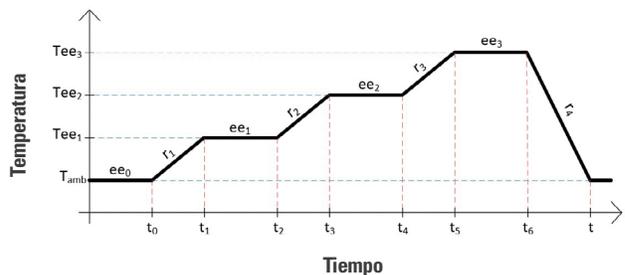


Figura 7. Rampas del sistema de curado
 Fuente: elaboración propia.

Se optó por el diseño de un sistema que simule de manera digital el comportamiento de una rampa analógica. Por lo tanto, cada rampa de incremento de temperatura está conformada por un grupo de escalones, tal como se observa en la figura 8.

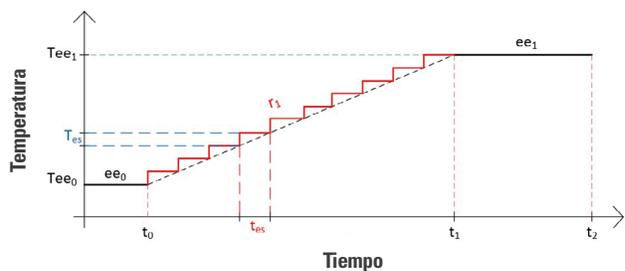


Figura 8. Rampas del sistema de curado
 Fuente: elaboración propia.

La principal característica de estos escalones es que todos tienen el mismo incremento de temperatura en un intervalo de tiempo, cuya duración es la misma para todos los que conforman la simulación de rampa.

Control PID temperatura

Los estados estacionarios de temperatura corresponden a los valores ingresados por el usuario desde la interfaz de usuario HMI, en los cuales la temperatura se mantiene estable por un determinado intervalo de tiempo. Para que las mantas térmicas mantengan los estados estacionarios, es indispensable el uso de un controlador, y se empleó un controlador PID.

Subsistema de alojamiento e interfaz de usuario

En el diseño y la elección de los sistemas de alojamiento e interfaz, se partió del criterio de uso de estándares, funcionalidad y utilidad. Debido a la aplicación del sistema, se requiere tener características de portabilidad, lo cual condiciona y limita el peso y las dimensiones del equipo. Por ello, se ha optado por el uso de un equipo de alojamiento estándar en la industria para aplicaciones como esta. Únicamente se han realizado modificaciones correspondientes para tomacorrientes, puntos de conexión neumático, instrumentos de medición y HMI. El sistema de alojamiento seleccionado es un gabinete metálico de dimensiones 400 x 600 x 200 mm.

Interfaz con el usuario

En vista de que el equipo será operado por personal variado, se necesita una HMI que sea interactiva, fácil de entender y que cumpla con los requerimientos mínimos de seguridad, confiabilidad y eficiencia. Este dispositivo permite hacer diseños de HMI que son bastante gráficos y detallados del proceso que se está realizando y de las acciones que se ejecutan. Además, al ser una pantalla táctil, da mucha accesibilidad y facilidad de uso con cualquier tipo de operador. Así se observa en la figura 9.



Figura 9. Pantallas de interfaz con el usuario HMI

Fuente: elaboración propia.

Verificación experimental

Para evaluar las virtudes del equipo, se planteó el análisis de dos variables presentes en el proceso de curado de materiales compuestos: presión de vacío y tratamiento térmico; se evaluaron los datos a través del diseño experimental factorial como se tiene en la tabla 3, que permite el estudio del efecto de cada factor sobre las salidas a analizar del experimento. Así, con dos factores y dos niveles en cada factor, el experimento factorial tendrá en total cuatro combinaciones de tratamiento y será un diseño factorial de 2x2.

Tabla 3. Variables DOE factorial 2x2

Factores	Niveles	
Temperatura	65 °C	50 °C
Presión de vacío	19 In. Hg	17 In. Hg

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4, se observa la matriz de combinaciones de los factores antes mencionados para su posterior ensayo a tracción, a fin de definir las propiedades mecánicas de las probetas.

Tabla 4. Matriz de combinaciones de los factores

Combinación	Temperatura (°C)	Presión de vacío (In. Hg)
1	65	19
2	65	17
3	50	19
4	50	17

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, las propiedades mecánicas a analizar después del ensayo de tracción, y que son también las variables de salida en las que se enfoca el análisis posterior a la aplicación del diseño experimental, son las siguientes:

- Esfuerzo último de tensión
- Módulo de elasticidad

Una vez diseñado y fabricado el sistema portátil para el curado automático de materiales compuestos, se procede a emplear el equipo y a realizar el curado de los materiales compuestos.

Preparación de las probetas

Inicialmente, se define la cantidad de probetas necesaria para el ensayo a tracción. Para ello, es necesario remitirse a la norma ASTM D3039/D3039M-17 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. Esta norma entrega los lineamientos de la geometría y la cantidad necesaria de probetas a ensayarse, como se observa en la tabla 5 (ASTM, 2019).

Tabla 5.
Parámetros de fabricación de probetas

Parámetro	Especificación
Forma	Sección transversal rectangular constante
Largo mínimo	Agarre de las mordazas + 2 veces el ancho
Ancho	A requerimiento
Tolerancia del ancho	$\pm 1\%$ del ancho
Espesor	A requerimiento
Tolerancia del espesor	$\pm 4\%$ del espesor
Espesor del tab.	A requerimiento
Material del tab.	A requerimiento
Orientación de la fibra del tab.	A requerimiento
Ángulo del tab.	5° a 90°, inclusive

Fuente: Norma ASTM D3039/D3039M-17 (ASTM, 2019).

De acuerdo con la norma ASTM D3039, se ensayaron cinco probetas efectivas de dimensiones 130x15 mm, esto debido a que se tendrá una longitud de agarre de la mordaza de 50x15 mm (ASTM, 2019).

Se realizó el laminado utilizando como refuerzo la fibra de vidrio 800 Roving y como matriz la resina de poliéster, distribuyendo equitativamente la resina sobre la superficie completa de las fibras para su posterior enfundado y sellado del material, para aplicar vacío junto al tratamiento térmico y para completar el proceso de curado a través del presente proyecto, como se observa en la figura 10.



Figura 10. Proceso de laminado y preparación para el curado.
A) Laminación. B) Sellado y enfundado. C) Colocación de mantas térmicas.
D) Programación del curado en la maleta de curado automático

Fuente: elaboración propia.

Ensayo a tracción

El ensayo a tracción, como se observa en la figura 11, se llevó a cabo con la ayuda de una máquina de ensayos universales SHIMADZU AGS-x Plus y según los lineamientos de la norma ASTM D3039, la cual indica que se debe hacer el ensayo a una velocidad de cabezal de 2 mm/min, con al menos cinco muestras válidas.

Una vez terminados los ensayos de tracción, se aceptan los datos obtenidos del *software* que almacena y graba las mediciones, y se obtiene el gráfico fuerza vs. deformación de la probeta.

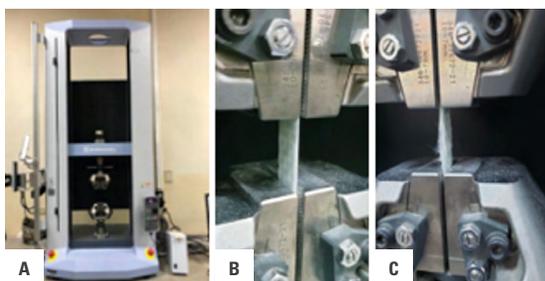


Figura 11. Ensayos a tracción. A) Máquina de ensayos universales SHIMADZU. B) Probeta durante el ensayo a tracción. C) Probeta posensayo

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos a flexión y compresión salen del alcance del presente proyecto, que pretende demostrar la eficiencia del proceso de curado que se evidencia con los resultados del ensayo a tracción. Los mencionados ensayos será factible realizarlos en futuros trabajos de investigación.

Resultados

De acuerdo con los datos obtenidos, se organizó la información y se calculó el esfuerzo a tracción, definiendo la resistencia última a la tensión (S_{ut}), la resistencia a la rotura y el módulo de elasticidad de las probetas. A continuación, se detallan los valores obtenidos de los veinticinco ensayos efectivos a tracción para calcular las propiedades mecánicas, como se observa en la tabla 6.

Con los datos generados, se procede al cálculo de las propiedades mecánicas de esfuerzo de tracción y deformación unitaria, tomando en consideración que la longitud inicial de la probeta es la de la zona de trabajo, es decir, 30 mm; y finalmente se presenta el módulo de elasticidad del material, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 6.

Datos obtenidos durante el ensayo a tracción

Orden ensayos	Código	Fuerza máxima (n)	Fuerza rotura (n)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Área sección (lxe) (mm ²)	Δl (mm)
1	2500_A1	11492	10618	15,07	2,20	33,15	4,41
2	2500_A2	12081	11805	15,00	2,17	32,55	5,90
3	2500_A3	10659	10526	14,95	2,24	33,49	5,12
4	2500_A4	10813	10733	14,93	2,20	32,85	4,93
5	2500_A5	10758	10009	14,99	2,13	31,93	6,59
6	5017_B1	11492	10618	15,10	1,77	26,73	4,41
7	5017_B2	10965	10713	15,15	1,86	28,18	4,34
8	5017_B3	11245	10758	15,30	1,86	28,46	4,18
9	5017_B4	9642	8934	14,76	1,84	27,16	3,88
10	5017_B5	10342	9485	15,28	1,87	28,57	3,82
11	5019_C1	10671	10520	15,07	1,80	27,13	4,26
12	5019_C2	10403	10121	14,79	1,72	25,44	4,55
13	5019_C3	10171	9694	15,07	1,93	29,09	4,51
14	5019_C4	10837	10744	15,05	1,93	29,05	3,70
15	5019_C5	9809	9472	14,91	1,94	28,93	3,85
16	6517_D1	9762	9445	15,16	1,82	27,59	3,96
17	6517_D2	10403	10121	14,81	1,78	26,36	4,55
18	6517_D3	10853	10809	14,53	1,74	25,28	4,78
19	6517_D4	9912	9758	14,75	1,86	27,44	3,96
20	6517_D5	12035	11855	15,19	1,88	28,56	5,06
21	6519_E1	9762	9445	15,07	1,94	29,24	3,96
22	6519_E2	12446	12446	15,27	1,99	30,39	4,37
23	6519_E3	11268	11133	15,13	1,92	29,05	4,22
24	6519_E4	12304	12304	15,30	1,92	29,38	4,46
25	6519_E5	10673	10651	15,27	1,93	29,47	3,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.
Resumen de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo a tracción

Orden ensayos	Código	Esfuerzo último tensión (S_{ut}) (MPa)	Esfuerzo a la rotura (MPa)	$E=\delta/l$	$E=\sigma/\epsilon$ (MPa)
1	2500_A1	346,62	320,26	0,15	2357,99
2	2500_A2	371,15	362,67	0,20	1887,21
3	2500_A3	318,29	314,32	0,17	1865,00
4	2500_A4	329,20	326,77	0,16	2003,26
5	2500_A5	336,94	313,48	0,22	1533,86
6	5017_B1	429,98	397,28	0,15	2925,01
7	5017_B2	389,12	380,18	0,14	2689,77
8	5017_B3	395,14	378,03	0,14	2835,96
9	5017_B4	355,03	328,96	0,13	2745,06
10	5017_B5	361,94	331,95	0,13	2842,48
11	5019_C1	393,39	387,82	0,14	2770,33
12	5019_C2	408,94	397,86	0,15	2696,32
13	5019_C3	349,70	333,30	0,15	2326,15
14	5019_C4	373,09	369,89	0,12	3025,07
15	5019_C5	339,11	327,46	0,13	2642,44
16	6517_D1	353,81	342,32	0,13	2680,37
17	6517_D2	394,62	383,93	0,15	2601,92
18	6517_D3	429,27	427,53	0,16	2694,19
19	6517_D4	361,29	355,68	0,13	2737,05
20	6517_D5	421,43	415,13	0,17	2498,63
21	6519_E1	333,91	323,06	0,13	2529,59
22	6519_E2	409,58	409,58	0,15	2811,76
23	6519_E3	387,89	383,24	0,14	2757,50
24	6519_E4	418,85	418,85	0,15	2817,35
25	6519_E5	362,15	361,40	0,12	2984,76

Fuente: elaboración propia.

Descripción del DOE factorial completo

Para el desarrollo del diseño experimental por método factorial completo, se considera inicialmente la combinación de las dos variables (temperatura y presión de vacío) con los dos niveles definidos en cada una.

Se crea un análisis estadístico DOE de tipo factorial, se selecciona el tipo de diseño de dos niveles y dos

factores con número de réplicas o ensayos (se hicieron cinco). A continuación, se genera la tabla de combinaciones y se realiza el análisis DOE factorial completo.

Tras detallar las variables de entrada y salida y los niveles, se procede a generar la tabla de combinaciones, a las cuales se les agregan las salidas antes calculadas, como se observa en la tabla 8. Con esto, solo faltaría hacer el análisis del DOE factorial completo para una tabulación de resultados.

Tabla 8.
Matriz para análisis DOE factorial completo

Ord	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	Temperatura (°C)	Presión de vacío (in Hg)	Sut (Mpa)	Esfuerzo rotura (Mpa)	Módulo elasticidad (Mpa)
1	1	1	1	50	17	429,98	397,28	2925,01
2	2	1	1	65	17	353,81	342,32	2680,37
3	3	1	1	50	19	393,39	387,82	2770,33
4	4	1	1	65	19	333,91	323,06	2529,59
5	5	1	1	50	17	389,12	380,18	2689,77
6	6	1	1	65	17	394,62	383,93	2601,92
7	7	1	1	50	19	408,94	397,86	2696,32
8	8	1	1	65	19	409,58	409,58	2811,76
9	9	1	1	50	17	395,14	378,03	2835,96
10	10	1	1	65	17	429,27	427,53	2694,19
11	11	1	1	50	19	349,70	333,30	2326,15
12	12	1	1	65	19	387,89	383,24	2757,50
13	13	1	1	50	17	355,03	328,96	2745,06
14	14	1	1	65	17	361,29	355,68	2737,05
15	15	1	1	50	19	373,09	369,89	3025,07
16	16	1	1	65	19	418,85	418,85	2817,35
17	17	1	1	50	17	361,94	331,95	2842,48
18	18	1	1	65	17	421,43	415,13	2498,63
19	19	1	1	50	19	339,11	327,46	2642,44
20	20	1	1	65	19	362,15	361,40	2984,76

Nota: Obtenido del análisis estadístico
Fuente: elaboración propia

Análisis de resultados

Posterior al ensayo de tracción, se analizan visualmente las probetas y se verifica que todas se encuentren dentro de lo establecido en la norma, con lo que evidenció que las probetas efectivas se rompieron en el límite de la zona de trabajo.

Los resultados se analizan mediante inferencia estadística, usando los datos obtenidos en los diferentes ensayos para generalizar un comportamiento de acuerdo con cada una de las condiciones impuestas y para generar una predicción de fidelidad de los valores encontrados, evitando de esta manera errores o incertidumbres subjetivas.

Los métodos utilizados son: diseño experimental completo para las cuatro combinaciones, bajo el curado en condiciones forzadas, y el análisis de varianza ANOVA con los cinco diferentes tipos de laminados creados.

Inicialmente, se realiza el análisis DOE factorial de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia de los factores en el esfuerzo último a la tensión.

En la figura 12, se observa que los factores de temperatura y presión de vacío no son significativos para la variación del esfuerzo último a la tensión obtenido del ensayo a tracción. Únicamente se puede destacar que con los niveles de presión de vacío seleccionados presentan mayor incidencia que los niveles de temperatura.

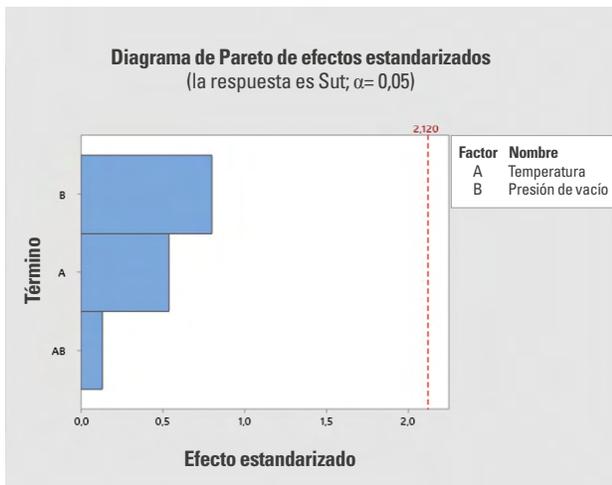


Figura 12. Análisis de Pareto considerando incidencia de factores en esfuerzo último a la tensión
Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza el análisis DOE de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir el comportamiento del módulo de elasticidad.

En la figura 13, se observa que los factores de temperatura y presión de vacío no son significativos para la variación del esfuerzo último a la tensión obtenido del ensayo a tracción. Pero el diagrama muestra que una interacción entre estos factores adquiere mayor importancia en el módulo de elasticidad de las probetas.

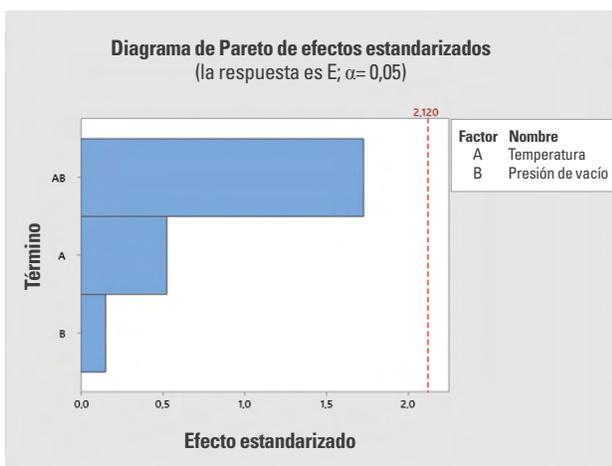


Figura 13. Análisis de Pareto considerando incidencia de factores en el módulo de elasticidad
Fuente: elaboración propia.

Análisis ANOVA

Este tipo de análisis lo que busca es definir cuál de las combinaciones y laminados ensayados presentan las mejores prestaciones respecto a las variables de salida analizadas. Primero, se realiza el análisis ANOVA de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia en el esfuerzo último a la tensión.

En la figura 14, se observa claramente que la combinación entre temperatura 65 °C y presión de vacío 17 In. Hg. (6517) genera el mayor esfuerzo último a la tensión, definiéndolo como el más resistente con un valor de 392 086 MPa. Cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan mejores resistencias mecánicas a la tensión que las probetas curadas a temperatura ambiente, que en promedio alcanzó 340 442 MPa.

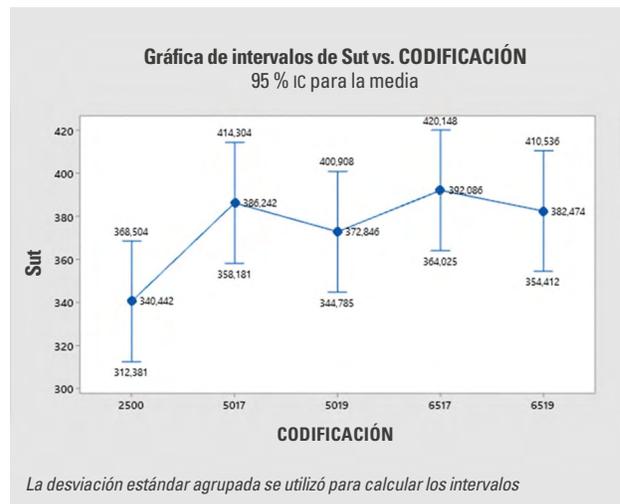


Figura 14. Gráfica de valores obtenidos de esfuerzo último a la tracción en cinco tipos curados
Fuente: elaboración propia.

En la figura 15, se observa que la combinación 5017 (temperatura 50 °C y presión de vacío 17 In. Hg) genera el mayor módulo de elasticidad con 2807,66 MPa en promedio, lo que sería a causa de tener la menor deformación unitaria que se concluye como la más frágil.

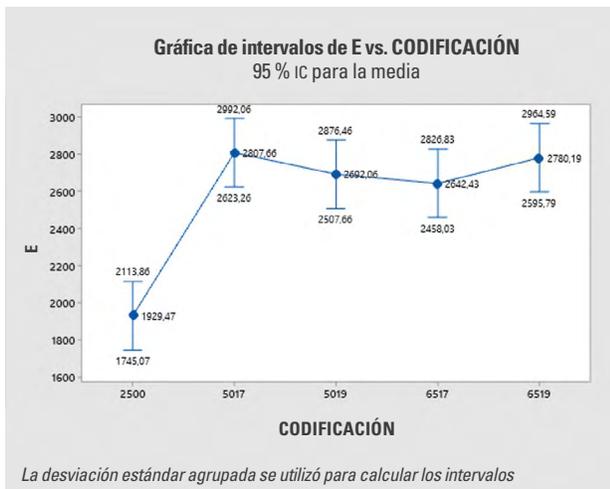


Figura 15. Gráfica de valores obtenidos para módulo de elasticidad cinco tipos laminados

Fuente: elaboración propia.

Discusión

Los métodos usados para el análisis de resultados de los ensayos mecánicos a tracción son: diseño experimental completo para las cuatro combinaciones bajo el curado en condiciones forzadas y el análisis de varianza ANOVA con los cinco diferentes tipos de laminados creados.

Primero, se realiza el análisis DOE factorial de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia de los factores en el esfuerzo último a la tensión.

En el análisis DOE, se obtiene un resultado que no es dependiente de ninguno de los factores de entrada como la presión de vacío o el tratamiento térmico, los cuales tampoco tienen una incidencia definitiva en los resultados obtenidos del esfuerzo último a la tensión que soportan las probetas de materiales compuestos. Así, se define que las variables de entrada serían trabajos posteriores a realizar el curado de los materiales compuestos, con otros valores que evidenciarán la incidencia de las variables en las propiedades de los materiales compuestos. Únicamente se puede destacar que los niveles de presión de vacío seleccionados (17 y 19 pulgadas de mercurio) presentan mayor incidencia que los niveles de temperatura.

El comportamiento del módulo de elasticidad, considerando las variables de entrada de temperatura y presión de vacío, no es significativo para la variación de este parámetro. Sin embargo, se evidencia que una interacción entre estos factores adquiere mayor importancia en el módulo de elasticidad de las probetas.

En el análisis ANOVA realizado, se definieron las combinaciones de factores de entrada que presentaron mejores resultados en los factores de salida del análisis (esfuerzo a la tensión y módulo de elasticidad), y en los laminados ensayados presentan las mejores prestaciones respecto a las variables de salida analizadas.

Respecto al esfuerzo último a la tensión, se observa claramente que la combinación entre temperatura 65 °C y presión de vacío 17 In. Hg. (6517) genera el mayor esfuerzo último a la tensión, con un valor de 392 086 MPa. Adicionalmente, es importante definir que la combinación 6519 presenta menor esfuerzo último a la tensión, lo cual se traduce en que esta combinación ofrece menores prestaciones mecánicas. Cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan mejores resistencias mecánicas a la tensión que las probetas curadas a temperatura ambiente, que en promedio alcanzó 340 442 MPa.

A su vez, se concluye que la combinación 5017 (temperatura 50 °C y presión de vacío 17 In. Hg) genera el mayor módulo de elasticidad con 2807,66 MPa en promedio, lo cual sería a causa de tener la menor deformación unitaria que se concluye como la más frágil. Así también cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan mayor módulo de elasticidad que las probetas curadas a temperatura ambiente, que en promedio alcanzó 1929,47 MPa, con lo que se evidencia que esta última es la más dúctil entre todas.

Valga este estudio para realizar una comparación con probetas obtenidas del borde de ataque del ala del avión A-29B Supertucano de la FAE. Se realizaron diversos ensayos mecánicos del material del componente aeronáutico antes mencionado, y se obtuvo en promedio de los ensayos a tracción realizados un esfuerzo último de 365,46 MPa (Carvajal, 2020).

Con este antecedente, y tras una comparación con los resultados obtenidos con las diferentes combinaciones de curado de los laminados de fibra de vidrio Roving 800 y resina de poliéster, se obtuvieron valores de esfuerzo último a la tracción entre 372 y 392 MPa, según la combinación de las variables de presión de vacío y temperatura de curado, como se encuentra detallado en la figura 13. Con esto, se puede concluir que el proceso de curado utilizando el sistema portátil automático para el curado de materiales compuestos brinda alta eficiencia para obtener características mecánicas similares a las que se tienen en aeronaves que operan actualmente en la FAE.

Conclusiones

- Se hizo una revisión de las normas ASTM, que definen la metodología de ensayos, para delimitar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos; directamente en los ensayos realizados se usó la norma ASTM D3039/D3039M-17 que se focaliza en el ensayo a tracción.
- Se diseñó y construyó un circuito de control electrónico-neumático al subsistema de vacío para optimizar el funcionamiento de la bomba de vacío, incrementar el tiempo de vida útil al evitar el recalentamiento, y ahorrar energía por los amplios periodos de tiempo que la bomba permanece apagada, en contraste a su funcionamiento constante al que se veía sometido cuando se operaba de manera manual.
- Se diseñó un circuito de potencia a través del uso de un relé de estado sólido (SSR) que recibe la señal de un controlador PID, a fin de conseguir una alimentación eléctrica controlada durante el incremento de temperatura por las rampas de ascenso de los procesos de curado y en los periodos prolongados en que se requiere una temperatura estable.
- Se diseñó una HMI para el manejo de la pantalla de manera fácil e intuitiva, que facilite el manejo por parte de cualquier usuario que pueda

ingresar sus datos y evitar errores que afecten el proceso de curado de materiales compuestos.

- Se diseñó, manufacturó y construyó una estructura robusta y portable para albergar y transportar el sistema de control automático del proceso de curado de materiales compuestos, a fin de garantizar un rápido despliegue en cualquier tipo de áreas, ya sea en talleres y laboratorios o en hangares de mantenimiento aeronáutico.
- Se realizó el laminado de MC en fibra de vidrio y resina de poliéster y el curado mediante el sistema portátil automático, con lo que se obtuvieron propiedades mecánicas en el material similares a las existentes en el borde de ataque del avión A-29B.

Referencias

- Alzate Rodríguez, E. J., Montes Ocampo, J. W., & Silva Ortega, C. A. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectrónicos. *Scientia Et Technica*, 1(34). <https://doi.org/10.22517/23447214.5509>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear*. ASTM D3410/D3410M-03. https://www.astm.org/d3410_d3410m-03.html
- American Society for Testing and Materials (astm). (2019). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM D3039/D3039M-08. https://www.astm.org/d3039_d3039m-08.html
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM D790-07. <https://www.astm.org/d0790-07.html>
- Aranburu, A. y Vallejo, F. J. (2019). Desarrollo y automatización de nuevo proceso de fabricación de *composites* basado en preimpregnados de curado ultravioleta. *Materiales Compuestos*, 3(3), 21-28. <https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/485>
- Arruti, J. (2016). La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi. *Revista Ingeniería UC*, 23(1), 22-29. <https://www.redalyc.org/journal/707/70745478004/html/>

- Cambell F. C. (2004). *Manufacturing Processes For Advanced Composites*. Elsevier.
- Carvajal Dias, A. B. (2020). *Caracterización del material compuesto del borde de ataque de la pieza P/N 314-19390-402 del avión A-29 Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana* [trabajo de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. Repositorio institucional ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/21702>
- Criollo Calderón, L. G., y Yáñez Merchán, P. D. (2019). *Modelación computacional y determinación de propiedades mecánicas del perfil alar del avión DA-20-C1 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana* [trabajo de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. Repositorio institucional ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/21001>
- Dávila, J. L., Galeas, S. y Guerrero, V. H. (2011). *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*. Editorial Escuela Politécnica Nacional.
- Herrera Jumbo, L. M. & Vásquez Torres, E. A. (2011). *Diseño, programación e instalación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno lindberg para el laboratorio de tratamientos térmicos* [trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio institucional EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3993?mode=full>
- Jimenez O. and Escamilla A. (2008)., “*Mejora el proceso de fabricación de elementos estructurales para construcciones en base a arreglos espaciales. REPORTE FINAL,*” Queretaro, Kalpakjian, S. y Steve, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Education.
- Mezzacasa, R., Segura, M., Irastorza, X., Harismendy, Y. y Sehrschon, H. (2019). Fabricación flexible, eficiente y automatizada de componentes en composite de altas prestaciones. *Materiales Compuestos*, 3(3), 30-34. <https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/486>
- Mendoza-Nava1 H., Talavera-Ortega M., Estrada-De los Santos F., Mendoza-Facio , Jimenez-Arévalo O. (2014). *Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono fabricados por el método de infusión para aplicaciones aeronáuticas. Revista Avances de Ingeniería Mecánica A.C. UNAM*
- Miravete, A. (2012). Capítulo I Materias Primas. En A. Miravete, *Materiales compuestos. Volumen 1*. Editorial Reverté.
- Núñez Valle, M. J. y Pantoja Ponce, G. F. (2008). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de vacío (liposuccionador)* [trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1688/1/15T00396.pdf>