

Ensayo expositivo

Comparación entre los procesos industriales para el conformado de piezas con materiales compuestos

Recibido: 25-09-2019 Aceptado: 29-06-2020 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Las piezas conformadas con materiales compuestos, comúnmente polímeros reforzados con fibra, tienen una amplia aceptación en muchas industrias porque ofrecen ventajas significativas respecto a los materiales convencionales, como alta resistencia mecánica, peso ligero, resistencia a la corrosión, entre otras. La selección del método de fabricación más rentable es importante para el rediseño o fabricación de piezas nuevas para la industria automotriz, aeroespacial, naval, química, construcción, militar, energía, etc. El objetivo del presente artículo es comparar los principales métodos de conformado con materiales compuestos, como pultrusión, moldeado por transferencia de resina RTM, compuesto de moldeo en lámina SMC, infusión de resina, enrollamiento de filamento y pre-impregnado. Para la selección del método de conformado más conveniente se deben considerar las propiedades físicas deseadas en la pieza, como son su geometría, resistencia mecánica, tamaño, acabado superficial, así como, factores relacionados con la productividad como son la tasa de producción, costo de maquinaria y costo de maquinado de moldes.

Abstract

Parts shaped from composite materials, usually fiber reinforced polymers, are widely used in many industries because they offer significant advantages over conventional materials such as increased mechanical strength, as well as being light weight, corrosion resistant, and other advantages. Selecting the most profitable manufacturing method is important for the redesign or manufacture of new parts for the automotive, aerospace, naval, chemical, construction, military, energy industries as well as others. The aim of this article is to compare the main shaping methods incorporating composite materials, such as pultrusion, resin transfer molding RTM, sheet molding compound SMC, resin infusion, filament winding and pre-impregnated composite. For selecting the most appropriate shaping method, the required physical properties of the part must be considered, such as geometry, mechanical strength, size, surface finished, etc., as well as factors related to productivity, production rate, cost of machinery and cost of machining molds.

Résumé

Les pièces en matériaux composites, généralement des polymères renforcés de fibres, sont largement acceptées dans de nombreuses industries car elles offrent des avantages significatifs par rapport aux matériaux conventionnels, tels qu'une résistance mécanique élevée, un poids léger, une résistance à la corrosion, entre autres. La sélection de la méthode de fabrication la plus rentable est importante pour la refonte ou la fabrication de nouvelles pièces pour les industries automobile, aérospatiale, navale, chimique, de la construction, militaire, énergétique, etc. L'objectif de cet article est de comparer les principales méthodes de formage avec des matériaux composites, tels que la pultrusion, le moulage par transfert de résine RTM, le composé de moulage en feuille SMC, l'infusion de résine, l'enroulement filamentaire et la préimpregnation. Pour sélectionner la méthode de formage la plus pratique, les propriétés physiques souhaitées de la pièce doivent être prises en compte, telles que sa géométrie, sa résistance mécanique, sa taille, sa finition de surface, ainsi que des facteurs liés à la productivité tels que le taux de production, le coût de machines et coût d'usinage des moules.

Teth Azrael Cortés Aguilar^{1*}
Adriana Tovar Arriaga²

Palabras clave: Materiales compuestos, procesos industriales, moldeado.
Keywords: Composite materials, industrial processes, composite molding.
Mots-clés: Matériaux composites, procédés industriels, moulage.

Introducción

La manufactura de piezas con materiales compuestos es importante en varios sectores industriales, como hélices para generadores eólicos, autopartes para el sector automotriz, componentes de construcción e infraestructura urbana, cascos para embarcaciones navales, fuselajes para el sector aeroespacial, sistemas de armamento para la industria militar, tuberías para la industria química, componentes para drones y robots industriales, etc.

¹ CIATEQ Unidad Jalisco

²Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Enriquez, campus Zapopan

Correspondencia:

*teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx

Algunas de las ventajas de las piezas conformadas con materiales compuestos son sus propiedades físicas, como reducción en peso, resistencia al impacto, rigidez, químicamente inerte, estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y al desgaste, etc. Para algunas piezas, la sustitución de procesos de conformado con metales por procesos de conformado con materiales compuestos, puede incidir en la reducción de costos de producción. Además la pieza conformada con materiales compuestos se puede diseñar con ciertas propiedades físicas adecuadas para una determinada aplicación. Por ejemplo, los rieles dieléctricos fabricados con fibras de vidrio y resina mediante pultrusión para una escalera de extensión usada para el mantenimiento de instalaciones eléctricas, no solo cumpliría con una norma sobre el aislamiento eléctrico para este tipo de escaleras, también lograría reducir los costos de producción al seleccionar materiales de menor precio y procesos más rentables.

Identificar y comparar los principales métodos de conformados con materiales compuestos aporta información relevante para la toma de decisiones sobre la selección del método de manufactura que se escogerá para la fabricación de piezas nuevas o para el rediseño de piezas que se desean mejorar en sus propiedades y costos de producción.

Materiales compuestos

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interface discreta y reconocible que los separa. Debido a ello, son heterogéneos, es decir sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. En todos los materiales compuestos se pueden distinguir dos com-

ponentes bien diferenciados, la matriz o fase continua y el refuerzo o fase discontinua, (ver la figura 1).

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda embebido, se pueden usar materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo. Las funciones de la matriz son, mantener las fibras en su posición, transferir la carga a las fibras, evitar la propagación de fisuras, determinar las propiedades físicas, eléctricas y químicas, también delimita el rango de temperatura que puede soportar el material compuesto. Durante el proceso de formado de la pieza, la matriz cumple la función de proteger a las fibras, además de las propiedades de la matriz, dependerá el acabado superficial y la capacidad del material compuesto para adaptarse en moldes de geometrías complejas, generalmente en procesos que no involucrarán etapas posteriores al acabado (Stupenengo, 2011). Bajo cargas compresivas es la matriz la que soporta el esfuerzo, (ver figura 2a), en tracción la matriz transfiere la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las fibras, de manera que éstas sean las que soporten el esfuerzo, (ver figura 2b).

La matriz de orgánica puede ser *termoplástica* (polipropileno, policarbonatos y poliamidas como el nylon), *Termoestables* (poliéster insaturado, resinas epoxis, resinas vinil-éster y fenoles) y *elastómeros* (poliuretanos y siliconas). Bajo condiciones de carga constante la deformación de los termoplásticos se incrementa con el tiempo, por la acción del calor puede fundirse y moldearse fácilmente, manteniendo la forma al enfriarse.

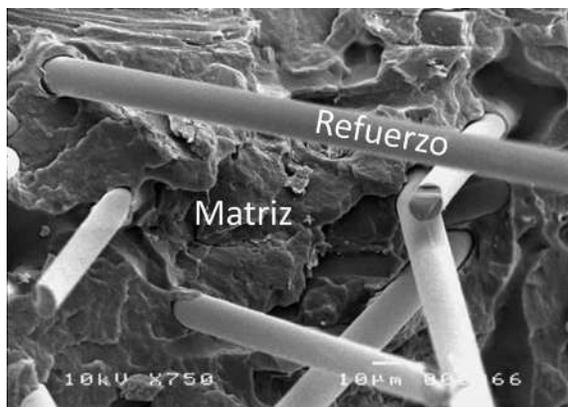


Figura 1. Imagen de microscopio de barrido electrónico para un material compuesto con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de polipropileno.

Fuente: Thwe y Liao, (2003) Environmental effects on bamboo-glass/polypropylene hybrid composites, *Journal of Material Science*. 38(2), 363-376.

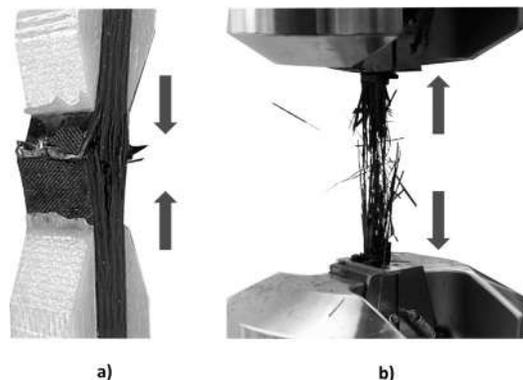


Figura 2. Prueba de esfuerzo en materiales compuestos a) compresión, b) tracción.

Fuente: a) Paiva, J. M. F. de, Mayer, S. y Rezende, M. C. (2005). Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *Materials Research*, 8(1), 91-97. b) IMR Lab Test (2019) Composite testing, Recuperado el 2 Agosto 2019 de <https://www.imrtest.com/tests/composite-testing>.

Las matrices orgánicas termoestables tienen una estructura entrecruzada, son infusibles e insolubles, sus propiedades con isotrópicas y su principal característica es soportar temperaturas más elevadas en continuo que las matrices termoplásticas, sin embargo, cuando se supera la temperatura de distorsión térmica, se inicia la degradación del material.

Las matrices metálicas presentan una mejor resistencia al calor que las termoestables, también ofrecen una mayor resistencia mecánica y tenacidad, como resistencia al impacto y ruptura. Los metales más usados son aleaciones de aluminio, cobre, titanio, etc. Sus desventajas son mayor densidad y dificultad en su proceso de formado. Se utilizan como refuerzo fibras de carburo de silicio.

Las matrices cerámicas usan materiales como oxido de silicio y oxido de aluminio, los cuales tienen como propiedad principal una temperatura de fusión por encima de la mayoría de los metales. Sin embargo, su principal inconveniente es su obtención mediante pulvimetalurgia. Se utilizan refuerzos de fibras cortas de carburo de silicio o nitruro de boro.

El material de refuerzo tiene como propósito agregar alguna propiedad que la matriz no posee, como incrementar la resistencia, la rigidez mecánica, la resistencia a la abrasión o mejorar su comportamiento a temperaturas elevadas. El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. En general el refuerzo es más efectivo cuanto menor sea el tamaño de las partículas o el diámetro de la fibra y más homogéneamente estén distribuidas en la matriz. Las fibras más utilizadas son de vidrio, carbono y aramida debido a su alta resistencia de tracción. La fibra de vidrio es la más comúnmente usada por su bajo costo, tiene propiedades de tracción comparable a la de carbón y aramida. La fibra de carbono tiene una alta resistencia mecánica y alta rigidez, pero son poco resistentes al rozamiento y al impacto de baja energía. La aramida es un filamento orgánico derivado del petróleo, tiene una alta resistencia al impacto, a la corrosión y

a temperaturas elevadas. Su coeficiente de tracción es similar a la fibra de carbono, pero su resistencia a la compresión es baja. Se distribuyen comercialmente como Kevlar (DuPont, 2019), Twaron y Technora (Teijin, 2019).

Métodos de conformado con materiales compuestos

En algunas industrias el formado de piezas sigue siendo una operación manual mediante técnicas como *wet lay up* y *spray up*, donde la calidad de la pieza depende de la habilidad y experiencia del trabajador, además estos procesos exponen al trabajador a sustancias peligrosas para su salud. Por el contrario, con métodos como pultrusión, moldeado por transferencia de resina RTM, láminas SMC, infusión de resina, enrollamiento de filamento y pre-impregnado se pueden reducir riesgos a la salud del trabajador mediante el control de emisiones y procesos automatizados, además un control adecuado de los parámetros de proceso en estos métodos permite alcanzar una calidad competitiva y reducir la variabilidad en la producción de las piezas.

Pultrusión

El proceso de pultrusión (ver la figura 3), es continuo y se utiliza para la fabricación de piezas con un perfil transversal constante, como postes, varillas, molduras automotrices, etc. En la etapa de alimentación las fibras de refuerzo pasan por una placa perforada para su alineación y por una etapa de pre moldeo donde se agrega un tejido o MAT para reforzar la fibra. Después las fibras se impregnan de resina y pasan a una etapa de pre-conformado para ajustar la orientación de las fibras y el tejido antes de entrar al molde. La resina se puede aplicar de cuatro formas: baño de inmersión, baño cerrado, molde de inyección de resina y rollos de fibra pre-impregnados. En la etapa de moldeado se da forma a la sección transversal de la pieza y mediante la aplicación de calor al troquel se endurece la resina.

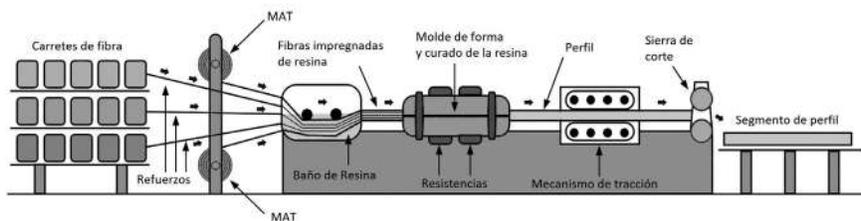


Figura 3. Proceso de pultrusión. Fuente: Ishida Hatsuo, *Pultrusion process for preparing composites*. U. S. Patent 5294461, 15 Marzo 1994.

La aplicación del calor se lleva a cabo mediante resistencias eléctricas en la parte externa al molde y consta de tres fases: pre-calentamiento de la matriz y del refuerzo, activación del catalizador de polimerización y curado del material, (ver la figura 4). El perfil que sale del molde es termoestable y pasa hacia un mecanismo de tracción continuo que jala el material a una velocidad constante. Finalmente, una sierra de disco, corta el perfil con la longitud deseada (Baran, 2015). Este método produce una pieza cada 3 o 6 min de acuerdo a la longitud del perfil y del control del proceso, para parámetros típicos como los que se muestran en la tabla 1.

Moldeado por transferencia de resina RTM

El moldeado por transferencia de resina (ver la figura 5), se considera como un proceso de molde cerrado de baja presión. En dicho proceso, se colocan refuerzos de fibra en el interior de un molde, y una vez cerrado y bajo presión, se inyecta o transfiere la resina catalizada al interior del mismo. Para reducir el tiempo de curado de las piezas se puede aplicar calor sobre el molde. El tiempo de operación de moldeado puede ir de 3 a 10 de acuerdo al tamaño de la pieza (U.S. Department of Energy, 2015). Los moldes deben soportar una presión una presión hidrostática de 2 bar a 10 bar y la presión de inyección de la resina de 1.5 bar a 10 bar, para valores típicos. En consecuencia, la mayoría de los moldes se construyen de acero, aluminio o cobre (Miravete, 2009). La extracción del aire se realiza mediante vacío a través de respiraderos colocados estratégicamente en el molde. Las resinas que

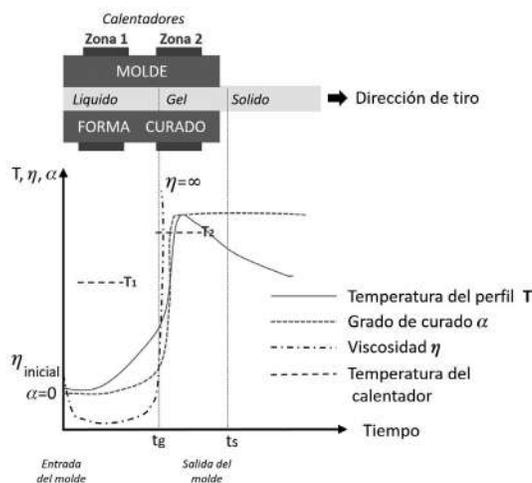


Figura 4. Ciclo de curado típico para un proceso de pultrusión de resina termoestable.
Fuente: Baran I. (2015). Cure Cycle during Pultrusion. En Pultrusion: State of the art Process Models (pp 20-21), Shropshire: Smithers Rapra.

se utilizan para RTM como epoxis, poliéster y vinil-ester deben tener viscosidades bajas de entre 80 cps y 250 cps a 25°C, para facilitar el bombeo y asegurar una buena impregnación de los refuerzos. Además, las resinas deben permanecer en estado de gel el tiempo necesario para garantizar el llenado completo del molde. Los refuerzos más utilizados son fieltros MATS de hilos continuos, fibra de vidrio cortado y estructuras textiles en forma de tejidos, es indispensable que el refuerzo se pueda adaptar a superficies de formas complejas y facilitar el flujo de la resina durante la impregnación. Los porcentajes de fibra/resina en RTM varían entre 25/75 y hasta un 50/50 (Besednjak, 2005). El proceso de moldeado por transferencia de resina se utiliza para la fabricación en serie de piezas automotrices, navales, aeronáuticas, etc. que requieren de cierta resistencia mecánica.

Compuesto de moldeado en lámina SMC

El compuesto de moldeado en láminas es al mismo tiempo un proceso (ver la figura 6) y un material de compuesto reforzado. Los aditivos agregados a la lámina permiten su almacenamiento durante meses. El compuesto es un material de poliéster reforzado con fibra de vidrio o de carbono preparado para procesos de moldeado por compresión en ciclos cortos de 1 a 2 min de duración (U.S. Department of Energy, 2015). Las láminas SMC se fabrican en un proceso continuo mediante la dispersión de fibras de vidrio o de carbono cortadas y depositadas sobre una cubierta con resina de poliéster, vinil-ester o epoxi. La lámina se debe de poder cortar con poco esfuerzo y se debe de adaptar fácilmente al molde de formado y curado. Se utiliza para la fabricación de partes auto-

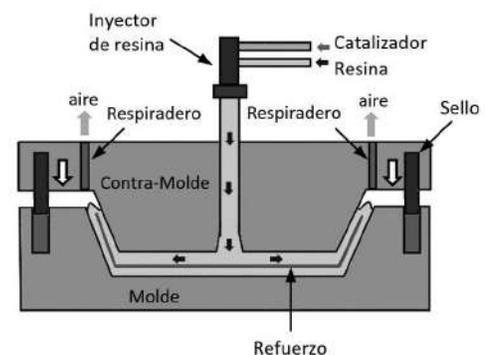


Figura 5. Proceso de moldeado por transferencia de resina RTM.
Fuente: Matsen M. R. & Peterson K. E. Apparatus for resin transfer molding composite parts, E.U. Patent 2195156B1, Boeing Co., 13 Septiembre 2007.

Tabla 1. Parámetros típicos del proceso de pultrusión.

Ancho [m]	Velocidad tracción [m/min]	Fuerza de Tracción [kN]	Longitud del molde [m]	Volumen fibra [%]	Porosidad [%]
3	0.4 - 3	45 - 90	0.6 - 1	30 - 65	1 - 5

motrices con baja resistencia mecánica en procesos de alto volumen y costo bajo de producción. La matriz de SMC es termoestable y contiene porcentajes de refuerzo de vidrio o carbono que varían del 10 al 60%, pero el estándar es de 35% con fibras orientadas aleatoriamente por peso (BFG, 2017).

Infusión

La infusión, (ver la figura 7), consiste en la fabricación de piezas de material compuesto mediante vacío para lograr la impregnación de las fibras de refuerzo con resinas termoestables de baja viscosidad de 20 cps a 400 cps, el porcentaje de fibra puede depender del grosor de la pieza; para componentes aeronáuticos es del 40% al 60% para 2.9 mm de grosor (Abdurohman et al., 2018). El vacío favorece el flujo de la resina en todas las direcciones del laminado, incluso en la sección transversal, logrando optimizar el espesor final de la pieza, pero esto sólo se consigue si el material de refuerzo es permeable. El proceso se realiza sobre un molde estaco rígido y un molde flexible o bolsa de vacío. Se utiliza una red de distribución de la resina o peel-ply, normalmente de nylon, para conseguir una textura en la superficie que permita realizar otro proceso sin un lijado posterior. El proceso de curado de la resina se puede realizar calentado el molde (Garnider, 2012). Este método permite fabricar piezas de grandes dimensiones a bajo costo, como cascos para embarcaciones, hélices para generadores eólicos, componentes aeronáuticos, etc.

Pre-impregnado

Los materiales compuestos pre-impregnados reducen el riesgo de una impregnación deficiente. El

material compuesto se controla en términos de su grosor y porcentaje de fibra, la cual puede llegar a ser de hasta el 70%. Los materiales pre-impregnados presentan una baja porosidad, menor al 1% y debido a su alta concentración de refuerzos tiene un buen rendimiento mecánico, además el proceso de moldeado es fácil debido a que la resina ya está impregnada en el material, sin embargo, el material pre-impregnado requiere de refrigeración durante su almacenamiento y traslado. El tiempo de moldeado típico es de 5 a 10 min por pieza (U.S. Department of Energy, 2015). Usualmente el curado se hace por calor en autoclave. El costo de producción por pieza es más alto que en otros procesos, porque requiere de la producción del material pre-impregnado previo a la manufactura de la pieza, su aplicación principal es la fabricación de piezas únicas y prototipos. En la fabricación de materiales pre-impregnados (ver la figura 8), se pueden utilizar robots para mejorar la distribución de los refuerzos y la resina sobre una superficie determinada (Mtorres, 2019).

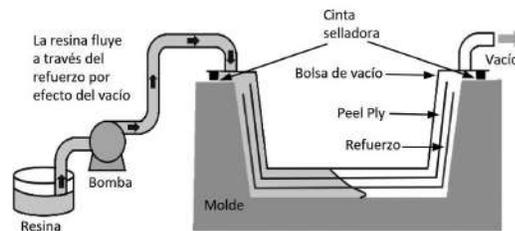


Figura 7. Proceso de moldeo por infusión de resina. Fuente: Verma K. K., Didesh B.L., Gaddikeri K. M. & Sundaram R., (2014). Challenges in Processing of a Cocured Wing Test Box Using Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERIT), Procedia Material Science, 6, 331-340.

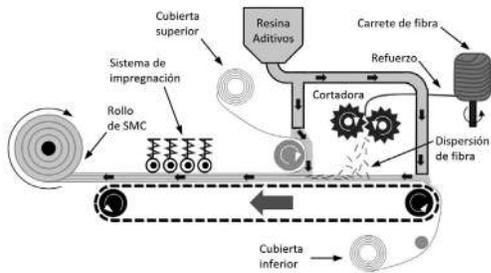


Figura 6. Proceso de fabricación de láminas SMC. Fuente: Rohrbacher F., Spain P. L. y Fahlsing R. A. Process for forming a composite structure of thermoplastic polymer and sheet molding compound, U. S. Patent 4959189A, Septiembre 26, 1988.

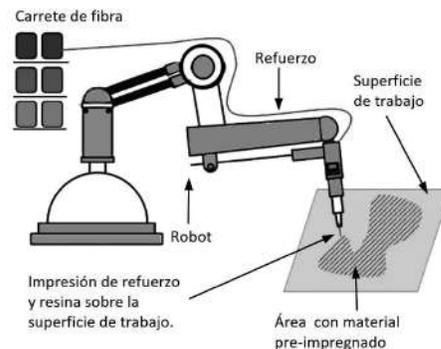


Figura 8. Proceso impresión del material pre-impregnado Fuente: Elaboración propia

Enrollamiento de filamento

Al proceso de enrollamiento de filamento continuo, (ver la figura 9), también se le conoce como proceso Drostholm (Drostholm y Meyer, 1976), inicia con fibras de varios carretes que se desenrollan y ordenan mediante peines separados para pasar a una etapa de impregnación de resina, después la fibra se tensa y se enrolla sobre un molde de revolución montado sobre un mandril. Finalmente se realiza el curado de la resina mediante la aplicación de calor y el desmolde de la pieza; sin embargo, en algunas ocasiones el molde puede llegar a ser parte de la pieza final. El enrollamiento sobre el molde puede seguir un patrón circular, polar y helicoidal. Las velocidades de trabajo típicas son de 90-100 m/min para fibra de vidrio y de 15-30 m/min para fibra de carbono y aramida. Este método se utiliza para la fabricación de tuberías y de piezas aeroespaciales.

Resultados

En la figura 10 se muestra un esquemático comparativo entre la tasa de producción contra el tamaño de la pieza fabricada para los procesos industriales de conformado con materiales compuestos. Usualmente, procesos de infusión y enrollamiento de filamentos se utilizan para producir piezas únicas de gran tamaño. El proceso de pre-impregnado se suele utilizar para la fabricación de prototipos y la operación de moldeado puede ser manual o con brazos robóticos. En el proceso RTM el tamaño de la pieza está restringido al tamaño del molde maquinado; se recomienda para la producción de piezas con buena calidad en su acabado superficial y una resistencia mecánica ajustada a la geometría de la pieza. El proceso de pultrusión es continuo, su tasa de producción es alta pero las formas de las piezas que se logran fabricar se restringen a perfiles de sección transversal constante y la resistencia mecánica de las piezas depende de la orientación de los refuerzos. El proceso SMC es adecuado para fabricar en ciclos cortos piezas con baja

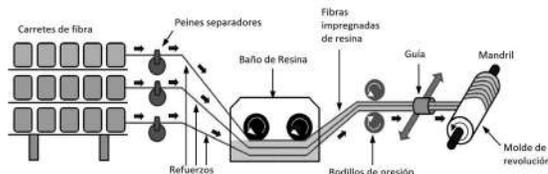


Figura 9. Procesos de manufactura de conformado por enrollamiento de filamento.
Fuente: Elaboración propia.

resistencia mecánica pero el tamaño de la pieza está limitado a las dimensiones de la lámina.

En la tabla 2 se muestra un comparativo entre los procesos de conformado con materiales compuestos. Los métodos de pultrusión, RTM y SMC se clasifican como de molde cerrado, mientras que los métodos de Infusión, pre-impregnado y enrollamiento de filamento se clasifican como de molde abierto. La operación de moldeado mediante pultrusión, SMC, enrollamiento de filamento y pre-impregnado no requieren de personal experto debido a la automatización del proceso, por otro lado, los procesos de RTM e infusión requieren de una distribución homogénea de los refuerzos y una velocidad correcta durante la infusión de la resina para evitar la formación de huecos. Mediante los procesos RTM y SMC se logra un buen acabado superficial en las dos superficies de la pieza, con el método de infusión solo una de las superficies tiene buen acabado superficial. Con los métodos de pultrusión, pre-impregnado y enrollamiento de filamento se puede llegar a necesitar una etapa posterior al moldeado de la pieza para obtener el acabado superficial deseado. Las piezas fabricadas con pre-impregnado y enrollamiento de filamento tienen buena resistencia mecánica debido a su alto porcentaje de fibra, baja porosidad y a la capacidad del proceso para orientar las fibras. El porcentaje de fibra para piezas fabricadas mediante pultrusión e infusión es similar, pero la porosidad de la pieza dependerá

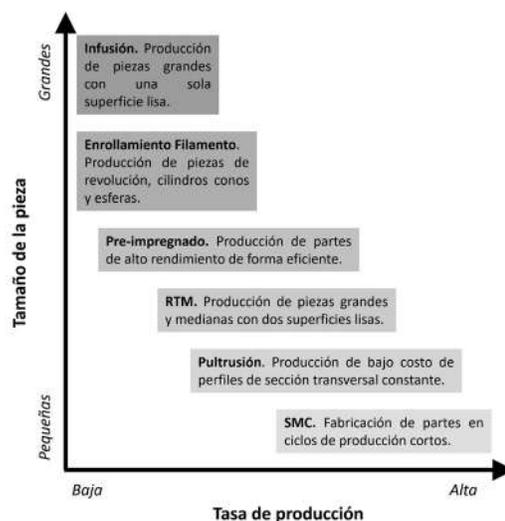


Figura 10. Esquema comparativo de la tasa de producción de piezas contra el tamaño de la pieza para los procesos de conformado con materiales compuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Comparación entre los procesos de conformado con materiales compuestos.

		Porcentaje de fibra	Porosidad	Acabado superficial	Costo de operación	Personal experto
Molde cerrado	Pultrusión	30-65	Alto	Bajo	Alto	NO
	RTM	25-50	Medio	Alto 2S	Medio	SI
	SMC	35	Medio	Alto 2S	Bajo	NO
Molde Abierto	Infusión	40-60	Alto	Medio 1S	Medio	SI
	Pre-impregnado	70	Bajo	Medio	Alto	NO
	En. de filamento	70-80	Bajo	Bajo	Alto	NO

del control del proceso, además en infusión se puede controlar la orientación de las fibras, pero no para piezas de pultrusión. En la fabricación de piezas mediante moldeo de láminas de SMC no se tiene control sobre la distribución de los refuerzos y algunas geometrías con cavidades en el molde pueden debilitar la resistencia mecánica de la pieza. El método RTM permite fabricar piezas con una resistencia mecánica aceptable para procesos de producción de alto volumen. Los costos de operación altos están vinculados con aquellos procesos que requieren de maquinaria especial, pero para grandes volúmenes de producción el costo de fabricación por pieza puede ser rentable.

Conclusiones

En el presente artículo se abordaron las nociones básicas de los materiales compuestos, después se describieron los seis procesos industriales más importantes para el conformado de partes y las características principales de las piezas que se obtienen de tales procesos. La selección adecuada del método de conformado con materiales compuestos depende de la resistencia mecánica deseada en la pieza, la cual a su vez depende del porcentaje de fibra, de la distribución de los refuerzos, de la porosidad en la matriz y del diseño de la pieza para soportar esfuerzos en lugares específicos. También se deben tomar en cuenta las dimensiones de la pieza, su forma y el acabado superficial, por ejemplo, para piezas de forma cilíndrica de grandes dimensiones el método de enrollamiento de filamento es más adecuado que el método de pultrusión, además permite controlar la orientación de los refuerzos para aplicaciones donde se requiere soportar una alta presión en el interior, como en una tubería o un tanque presurizado. La producción mediante moldeo de láminas SMC es rápido pero no se recomienda para piezas que deban

soportar grandes esfuerzos mecánicos. El moldeo mediante el método de pre-impregnado es fácil de realizar, las piezas tienen una buena resistencia mecánica pero el costo de producción del material pre-impregnado, traslado y almacenamiento es alto, en consecuencia se recomienda preferentemente para el conformado de piezas únicas o prototipos. La inversión inicial para procesos de pultrusión, enrollamiento de filamento y pre-impregnado es alta debido al uso de maquinaria especializada, para un proceso continuo, como es el caso del método de pultrusión, la rentabilidad de la operación dependerá de la tasa de producción.

El método de transferencia de resina RTM es el más adecuado para la fabricación de un volumen regular de piezas de tamaño medio con una buena resistencia mecánica, por ejemplo para el conformado de autopartes en la industria automotriz, pero el tamaño del molde está restringido a su maquinado. Para la fabricación de piezas de grandes dimensiones para la industria naval y aeroespacial el método de infusión es el más utilizado, sin embargo la calidad de las piezas dependerá del correcto control del proceso.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó dentro del programa de doctorado en manufactura avanzada en la unidad Jalisco de CIATEQ en colaboración con el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, adscrito al Tecnológico Nacional de México.

Bibliografía

- Abdurehman, K., Satrio, T., Muzayadah, N., & Teten. (2018). A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites. *Journal of Physics Conference Series*, 1130(1), 1–10.
- Baran I. (2015). Cure Cycle during Pultrusion. En *Pultrusion: State of the art Process Models* (pp 20-21), Shropshire: Smithers Rapra.

- Besednjak A. (2005). RTM. En *Materiales Compuestos en Procesos de fabricación de embarcaciones* (105-110), Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- BFG (2017). Compuesto de moldeo en láminas SMC, Recuperado el 2 Julio 2019 de <http://www.bfgarchitecture.com/pt/smc>.
- Drosthholm F. H. & Leonard S. Meyer, L. S. *Method for making tubular resin elements such as pipes*. U. S. Patent 4081302A, 21 Junio 1976.
- DuPont (2019). *Kevlar fiber*, Recuperado el 7 Agosto 2019 de <https://www.dupont.com/brands/kevlar.html>.
- Garnider, G. (2012). *The evolution of infusion*, Recuperado el 2 Septiembre 2019 de <https://www.compositesworld.com/articles/the-evolution-of-infusion>.
- IMR Lab Test (2019). *Composite testing*, Recuperado el 2 Agosto 2019 de <https://www.imrtest.com/tests/composite-testing>.
- Ishida Hatsuo, *Pultrusion process for preparing composites*. U. S. Patent 5294461, 15 Marzo 1994.
- Matsen M. R. & Peterson K. E. *Apparatus for resin transfer molding composite parts*. E.U. Patent 2195156B1, Boeing Co., 13 Septiembre 2007.
- Miravete, A. (2009). *Processing and Manufacturing*. Stanford University, Recuperado el 10 Julio 2019, de <http://ae.metu.edu.tr/~ae469/AM.Manufacturing.pdf>.
- Mtorres, (2019). *Laboratorio I+D para Materiales Compuestos*. Recuperado el 16 de Agosto 2019 de <https://www.mtorres.es/es/aeronautica/laboratorio>.
- Paiva, J. M. F. de, Mayer, S. y Rezende, M. C. (2005). Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *Materials Research*. 8(1), 91-97.
- Rohrbacher F., Spain P. L. y Fahlsing R. A. *Process for forming a composite structure of thermoplastic polymer and sheet molding compound*. U. S. Patent 4959189A, Septiembre 26, 1988.
- Stupenengo, F. (2011). Materiales compuestos. En Kirshenbaum, J. M., Guía didáctica, *Materiales y materias primas*. Buenos aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología-Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Teijin (2019). *Products*. Recuperado el 10 Agosto 2019, de <https://www.teijinaramid.com/>.
- Thwe, M. M. & Liao, K. (2003). Environmental effects on bamboo-glass/polypropylene hybrid composites. *Journal of Material Science*. 38(2), 363-376.
- U.S. Department of Energy (2015). *Advanced Composites Materials and their Manufacture Technology Assessment*, Recuperado el 6 Junio 2019, de <https://www.energy.gov/>.
- Verma K. K., Didesh B.L., Gaddikeri K. M. & Sundaram R., (2014). Challenges in Processing of a Cocured Wing Test Box Using Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERIT), *Procedia Material Science*, 6, 331-340.