

Factor de permeabilidad experimental para infusión en aspas-aerogenerador

¹José Gerardo Zamudio Herrera, ²Alejandro González Canales y Jorge Alberto Díaz Pacheco
¹jozhe1013@gmail.com

¹ y ² CIATEQ, Parque Industrial Bernardo Quintana,
Querétaro, México

Resumen

Predecir el tiempo de saturación de una resina sobre un material de refuerzo mejora el proceso de infusión en los moldes utilizando el proceso de moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (*vacuum assisted resin transfer molding*, VARTM). Para ello, se utiliza el factor de permeabilidad, definido por las ecuaciones de flujo de fluidos a través de medios porosos; para calcularlo, se deben conocer la estructura del material, sus propiedades físicas y el comportamiento de la resina durante el proceso de infusión. En este trabajo, se obtienen factores de permeabilidad utilizando la Ley de Darcy, a partir de datos experimentales de la velocidad del frente de resina y de la caída de presión en el proceso de infusión, bajo las condiciones específicas de fabricación de estas aspas. Con los factores de permeabilidad, obtenidos para el material de refuerzo utilizado en las tres direcciones de flujo (X, Y y Z), se pueden calcular tiempos de infusión de la resina en el aspa muy parecidos a la realidad.

Palabras clave: factor de permeabilidad, Ley de Darcy, moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM), plásticos reforzados con fibras (FRP), materiales compuestos, medio poroso, frente de resina, impregnación, aspas de aerogeneradores

Abstract

Predicting the resin saturation time over a reinforcement material can improve the infusion process on the one side molds when vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) is used. The Permeability Tensor of preform, defined by the fluid flow equations through porous media, is used for that purpose. To estimate it, the material structure, physical properties and the resin behavior during the infusion process must be known. In this work, the Permeability Tensors are obtained using Darcy's Law, from experimental data of the resin front velocity and the pressure drop during the infusion process, under specific manufacturing conditions for these blades. With the Permeability Tensors, obtained from the used reinforcement materials with the three flow directions (X, Y and Z), the resin infusion times in the blade, close to the real ones, can be calculated.

Keywords: permeability factor, Darcy's law, vacuum assisted resin transfer molding (VARTM), fiber reinforced plastics (FRP), composite materials, porous media, resin flow front, impregnation, wind turbines' blades

Artículo arbitrado

Recibido:
11 de abril de 2019

Aceptado:
16 de julio de 2019

Introducción

Los materiales compuestos que demuestran una alta relación resistencia-peso son preferidos para la fabricación de aspas de aerogeneradores (turbinas eólicas), lo que lleva a la investigación en su proceso de fabricación. El proceso de moldeado por transferencia de resina asistida por vacío (*vacuum assisted resin transfer molding*, VARTM) es la técnica de manufactura comúnmente utilizada para las aspas de aerogeneradores fabricadas con resina epóxica reforzada de fibras de vidrio o de carbono. El VARTM es un proceso de moldeado que utiliza presión de vacío para introducir la resina en el material de refuerzo seco, el cual es colocado sobre un molde abierto (molde de un solo lado) y posteriormente sellado con una bolsa de vacío. La resina líquida entra a la estructura a través de líneas de alimentación colocadas estratégicamente y se extrae por líneas de succión diseñadas para impregnar las fibras del material de refuerzo [1]. La impregnación de las fibras se lleva a cabo transfiriendo la resina a través de los poros del material de refuerzo acomodados sobre las superficies del molde.

En las aspas de aerogeneradores, es necesario lograr una saturación de resina en el material de refuerzo con una relación de volumen de fibras (*fiber volume fraction*, FVF) de al menos 50%. Además, durante el proceso de VARTM, se deben evitar zonas secas o porosidades, que son defectos de manufactura comunes en este proceso y afectan directamente el desempeño mecánico del material; para ello, es útil calcular el tiempo de saturación de resina sobre los moldes del aspa. El objetivo de este trabajo es obtener, de manera experimental, los factores de permeabilidad de la resina que fluyen en diferentes direcciones y para los diferentes materiales comúnmente utilizados en las aspas obteniendo la caída de presión en cada una de las tres direcciones de flujo, así como la velocidad promedio del frente de resina, para después poder calcular el factor de permeabilidad.

Se propone un arreglo experimental representativo del acomodo y la cantidad de capas de fibra de la raíz del aspa, ya que es una de las zonas más propensas a

presentar los defectos de manufactura previamente mencionados.

Método

Se proponen pruebas de infusión de resina para las tres direcciones de flujo principales, utilizando las siguientes designaciones, ilustradas en la Figura 1:

X: flujo de resina en sentido paralelo al larguero principal (a lo largo del eje del aspa).	Y: flujo de resina en sentido perpendicular al larguero principal y paralelo a la superficie del molde.	Z: flujo de resina en sentido normal a la superficie del molde y a las capas del material de refuerzo.
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------

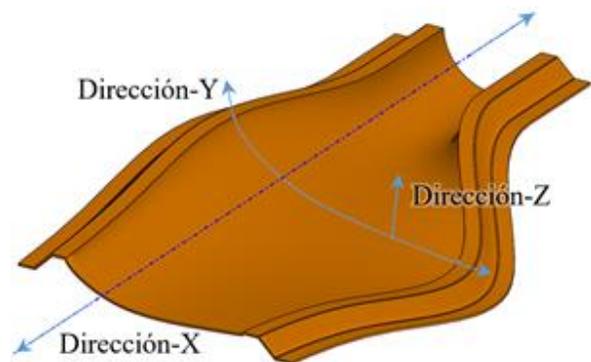


Figura 1. Direcciones de flujo de resina sobre el molde. Fuente: elaboración propia.

La raíz del aspa es uno de los detalles estructurales más difíciles de impregnar durante el proceso de VARTM; por ello, los cupones experimentales se eligen con el material de refuerzo representativo de este lugar del aspa. Para estos experimentos, los cupones se componen de 30 capas de fibra de vidrio triaxial (TRIAX, $0^\circ/\pm 45^\circ$, Saertex, 1173 g/m^2) impregnadas de resina epóxica (Hexion, resina EPIKOTE MGS RIMR 135 – agente de curado EPIKURE MGS RIMH 137); con esto, se espera obtener paneles de aproximadamente 24.6 mm de espesor, característico de un aspa de aerogenerador de 30 kW, clase III-S, de 6 metros de longitud.

Las dimensiones generales de los cupones prueba se ilustran en la Figura 2.

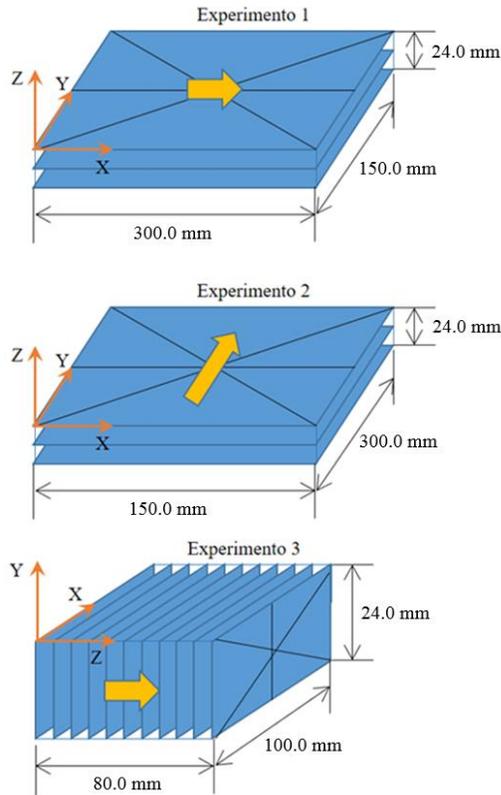


Figura 2. Dimensiones generales de los cupones de prueba. Fuente: elaboración propia.

La caída de presión para las diferentes direcciones se obtiene con la diferencia entre la presión que logra la bomba de vacío, con el canal de entrada abierto, y la presión registrada en la entrada de la resina abierta, una vez que se colocan los refuerzos y se sellan con la bolsa de vacío.

La presión alcanzada por la bomba de vacío es de 85 kPa (25 inHg) por debajo de la presión atmosférica. Bajo esta presión, se realizan las pruebas de vacío previas al inicio del flujo de resina. Esta prueba consiste en someter a vacío el cupón de prueba, cerrar los ductos de entrada y salida por 15 minutos y registrar el cambio de presión. La prueba de vacío se considera satisfactoria si el cambio de presión es menor de 17 kPa (5 inHg) a lo largo de los 15 minutos.

La velocidad promedio del frente de resina se obtiene dividiendo el tiempo que le toma en llegar del canal de entrada al canal de salida sobre la distancia que hay entre dichos canales. La velocidad del frente de resina se toma solo en la capa superior del material de

refuerzo y el promedio se toma en tres posiciones: en el centro y en los lados izquierdo y derecho del arreglo.

Una vez obtenidas la caída de presión y la velocidad del frente de resina en las tres direcciones, podemos calcular el factor de permeabilidad (K) utilizando la ley de Darcy, la cual ofrece una solución simple para describir la relación entre velocidad y caída de presión (ecuación 1).

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \rightarrow K = \frac{u\mu L}{(p_1 - p_2)} \quad (1)$$

Donde:

- u es la velocidad del frente de resina.
- $\mu = 210 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (@ 30°C) es la viscosidad de la mezcla de resina.
- L es la distancia entre el canal de entrada y de salida.
- $p_1 - p_2$ es la diferencia de presión entre la entrada y la salida de resina.

Experimentos

Experimento 1. Se dispuso el canal de salida de resina (succión) a 265 mm de la entrada, con las fibras orientadas a $0^\circ/\pm 45^\circ$ con respecto del eje-X, *i.e.* en el mismo sentido del flujo de la resina. El arreglo se muestra en la Figura 3.

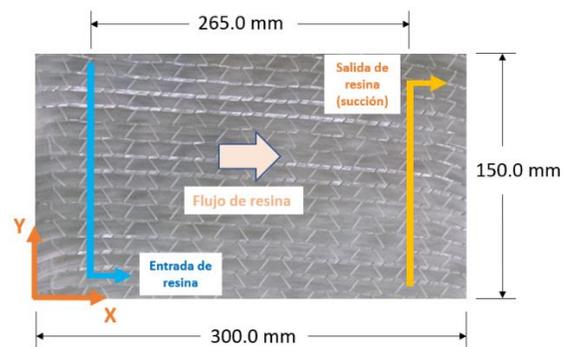


Figura 3. Dimensiones y arreglo de fibras del cupón de prueba del experimento 1. Fuente: elaboración propia.

Para este experimento, utilizando un Manómetro AIRTECH de 0 a -100 kPa (0 a -30 inHg) con un porcentaje de error en la medición de +/- 3% del valor de la lectura, se registra una caída de presión de 3 kPa (1 inHg) durante la prueba de vacío. El arreglo para la infusión de este experimento se muestra en la Figura 4.

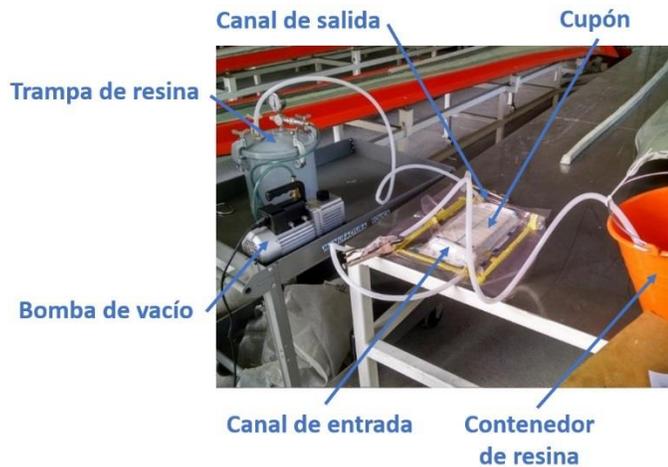


Figura 4. Arreglo para la infusión del experimento 1. Fuente: elaboración propia.

Una vez mezclada la resina con el catalizador, inició la infusión registrando una temperatura inicial de la mezcla de 27.4 °C. La infusión de resina se debe completar antes de que la mezcla alcance la temperatura de catalización (60 °C).

Durante la infusión, se observa que el frente de resina corre a mayor velocidad por los costados del arreglo del cupón que en el centro de la resina; esto se muestra en la Figura 5. También se muestra el registro del avance del frente de resina en el tiempo.

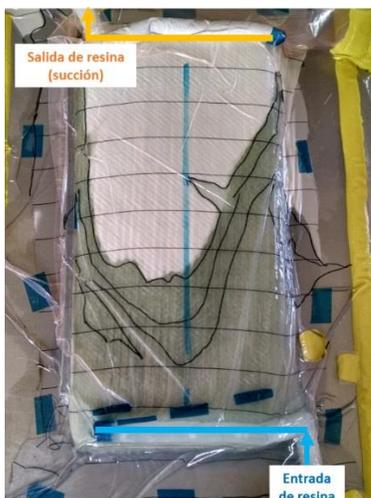


Figura 5. Registro del frente de resina para el experimento 1 a los 10 minutos de iniciar la infusión de resina. Fuente: elaboración propia.

Experimento 2. Se dispuso la salida de resina a 265 mm de la entrada, con las capas de fibras triaxiales orientadas en sentido transversal al flujo de resina, *i.e.*

a 90°/±45° con respecto del eje-Y, como se muestra en la Figura 6.

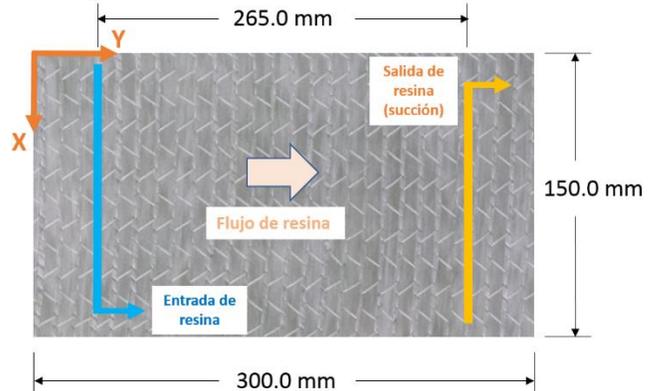


Figura 6. Dimensiones y arreglo de fibras del cupón de prueba del experimento 2. Fuente: elaboración propia.

Para este experimento, la caída de presión durante la prueba de vacío es nula. La temperatura inicial de infusión registrada de fue 22.3 °C.

El comportamiento del frente de resina también corrió a una velocidad mayor a los lados del arreglo que en el centro. Esto se ilustra en la Figura 7.



Figura 7. Registro del frente de resina para el experimento 2 a los 10 minutos de iniciar la infusión de resina. Fuente: elaboración propia.

Experimento 3. Se fabricó una caja de acrílico para colocar 100 capas de material triaxial dispuestas verticalmente para formar un espesor de 82 mm. El flujo de resina se conduce a través de ellas y la salida se coloca a 80 mm de la entrada (ver Figura 8).

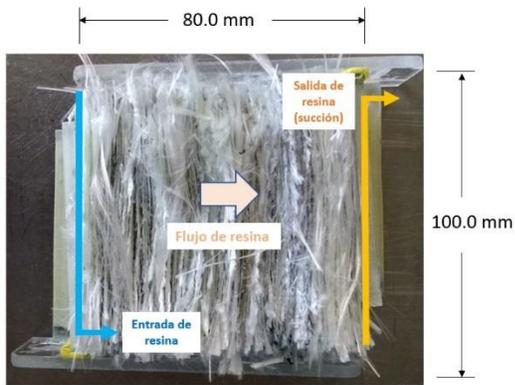


Figura 8. Dimensiones y arreglo de fibras del cupón de prueba del experimento 3. Fuente: elaboración propia.

En la prueba de vacío, se registra una caída de presión de 14 kPa (4 inHg). Para este experimento, la temperatura inicial de infusión fue de 22.0 °C. El comportamiento del frente de resina también corrió a mayor velocidad por los lados del arreglo que al centro. Esto se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Registro del frente de resina para el experimento 3 a los 10 minutos de iniciar la infusión de resina. Fuente: elaboración propia.

Resultados

Experimento 1. El tiempo total de infusión fue de 50 minutos y se registró una temperatura final de la mezcla de 35.3 °C. El producto de este experimento se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Resultado de la infusión del experimento 1. Fuente: elaboración propia.

La infusión de resina fue satisfactoria, ya que saturó completamente el material de refuerzo. El peso final del material impregnado fue de 2.2 kg; considerando que el peso del material de refuerzo es 1.6 kg, el peso de la mezcla de resina (resina y catalizador) es de 0.6 kg y representa el 37.5% del peso del material de refuerzo (1.6 kg). De esta manera, podemos determinar que la cantidad de mezcla necesaria para saturar una cantidad dada de material de refuerzo es de poco más de 1/3 de su peso (del material de refuerzo).

La caída de presión de vacío en dirección “X” obtenida en el arreglo fue de 25 kPa (7.5 inHg).

La velocidad promedio del frente de resina se obtiene con las velocidades en los tres lados del arreglo y es igual a 13.1 mm/min.

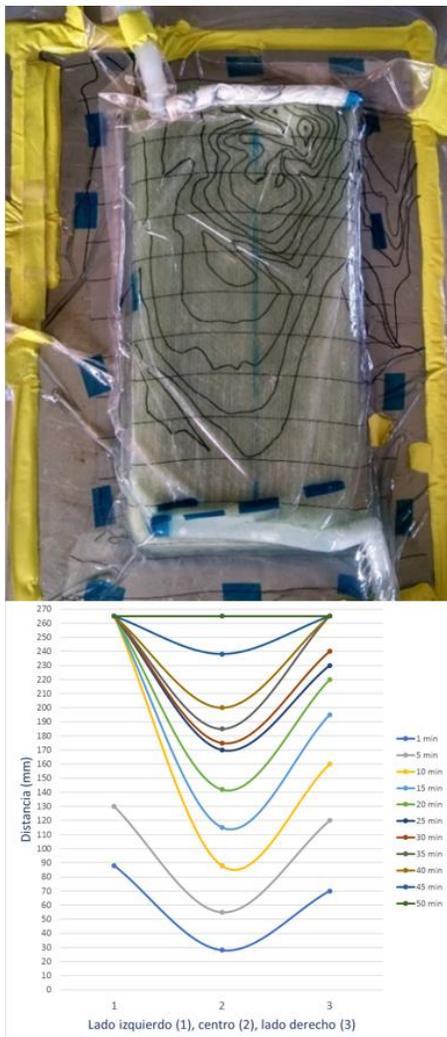


Figura 11. Registro del avance del frente de resina, real y simplificado, para el experimento 1. Fuente: elaboración propia.

El registro del avance del frente de resina para el sentido X, real y simplificado, se ilustra en la figura 11.

Con la velocidad de flujo y la caída de presión, obtenemos el factor de permeabilidad en sentido “X”, utilizando la Ley de Darcy [2] para el movimiento de fluidos en medios porosos (ecuación 1).

$$K_x = 4.79 \times 10^{-10} m^2$$

Experimento 2. La infusión de resina tuvo una duración de 2 horas y se registró una temperatura final de la mezcla de 32.1 °C.

La infusión de resina no fue satisfactoria, ya que no se saturó completamente el material de refuerzo, debido a lo cual quedó una zona seca cerca del canal de salida de resina; este defecto de manufactura se muestra en la Figura 12. Sin embargo, se pudieron obtener los datos necesarios para calcular el factor de permeabilidad.



Figura 12. Resultado de la infusión del experimento 2. Fuente: elaboración propia.

El peso final del material de refuerzo completamente saturado fue de 2.2 kg, similar al experimento 1. De esta manera, se comprueba que la cantidad de la mezcla de resina necesaria para saturar completamente el material de refuerzo es de aproximadamente 37.5% del peso total del material de refuerzo.

La caída de presión de vacío en dirección “Y” obtenida en el arreglo fue de 17 kPa (5 inHg). Con el registro del avance del frente de resina en sentido “Y”, como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtiene la velocidad media del frente de resina de 4.3 mm/min.

Con estos datos se calcula el factor de permeabilidad en sentido “Y”:

$$K_y = 2.37 \times 10^{-10} m^2.$$

Experimento 3. La infusión de resina terminó con un tiempo total de infusión de 27 minutos y una temperatura final de la mezcla de 27.6 °C.

La infusión de resina fue satisfactoria, ya que saturó completamente el material de refuerzo. El peso final del material de refuerzo completamente saturado fue de 0.85 kg (figura 14). En este caso, el peso del

material de refuerzo sin saturar es de 0.63 kg y el peso de la mezcla de resina (resina y catalizador) es de 0.22 kg lo representa el 34.9% del peso del material de refuerzo.

La caída de presión de vacío en dirección “Z”, obtenida en el arreglo, fue de 20 kPa (6 inHg) y la velocidad aproximada del frente de resina es de 4.2 mm/min. Esta velocidad se obtiene con el registro del avance del frente de resina, mostrado en la figura 13.

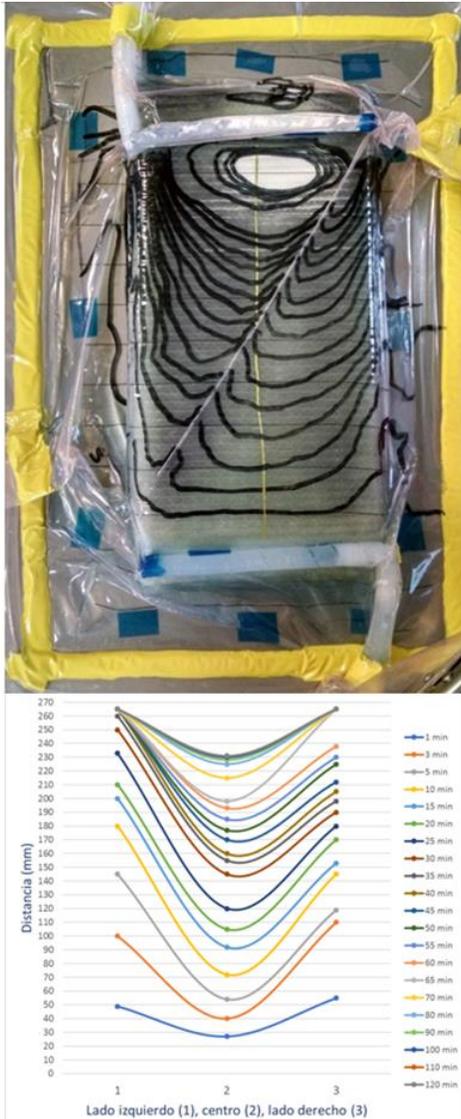


Figura 13. Registro del avance del frente de resina, real y simplificado, para el experimento 2. Fuente: elaboración propia.

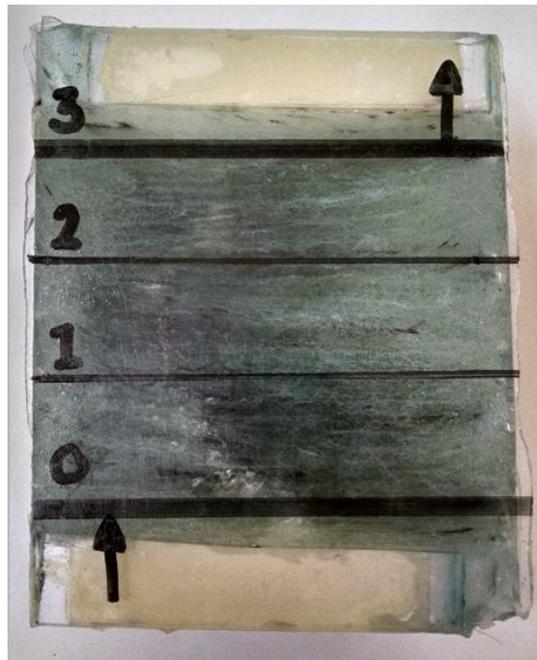


Figura 14. Resultado de la infusión del experimento 3. Fuente: elaboración propia.

Con la velocidad del flujo y la caída de presión, podemos calcular el factor de permeabilidad en sentido “Z”:

$$K_z = 1.80 \times 10^{-11} m^2$$

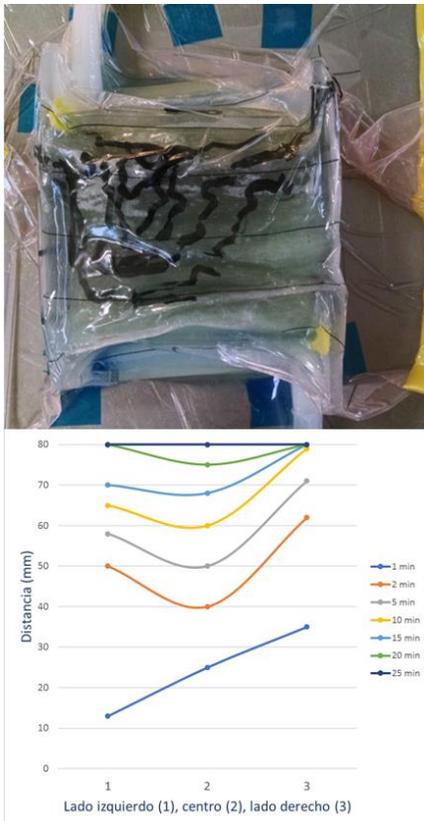


Figura 15. Registro del avance del frente de resina, real y simplificado, para el experimento 3. Fuente: elaboración propia.

Con los factores de permeabilidad obtenidos en las direcciones “X”, “Y” y “Z”, se puede calcular el tiempo de llenado de los moldes de los cascarones aerodinámicos del aspa. Estos moldes forman el lado succión (LS) y el lado presión (LP) del aspa.

Análisis

Cálculo del tiempo de llenado del molde lado succión utilizando factores de permeabilidad experimentales.

Usando la ley de Darcy (ecuación 1), obtenemos la velocidad del frente de resina, desde el canal de entrada (ubicado sobre el eje del aspa) hasta el canal de salida (ubicado perimetralmente sobre el molde). Esto se ilustra en la Figura 16.

El tiempo de llenado de la manguera del canal de entrada de resina (“X”) se despreciará. Una vez lleno el canal de entrada, se considerará que el frente de resina fluirá del canal de entrada de resina (A) hacia la base del material de refuerzo (B) en dirección “Z”.

Cuando el frente de resina llegue a la superficie del molde, el total del flujo de resina se dividirá hacia el borde de salida (C) y el borde de entrada (D) con dirección “Y”, suponiendo la misma cantidad de resina en ambas direcciones.

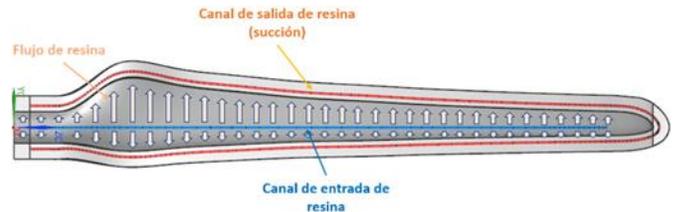


Figura 16. Arreglo de sistema de vacío en molde lado succión. Fuente: elaboración propia.

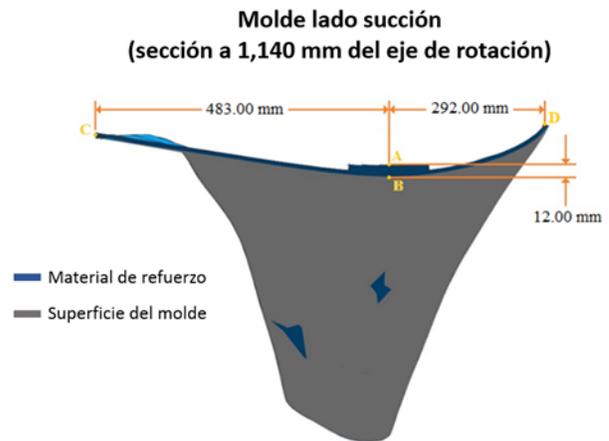


Figura 17. Sección para análisis de flujo del molde lado succión. Fuente: elaboración propia.

La Figura 17, muestra una de las secciones utilizadas para el análisis de flujo del molde de la concha del lado succión del aspa. En este caso, se muestran la sección más ancha del aspa y las distancias desde el eje del aspa, donde se ubica el canal de entrada de resina, hasta los bordes del molde, donde se ubican los canales de salida.

Se calcula el tiempo de llenado partiendo del “Punto A”, sobre la superficie del conjunto de capas de material de refuerzo, al “Punto B” ($L = 0.012$ m).

$$u_z = 1.31 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$t = 9 \text{ s}$$

Una vez que el frente de resina llega al “Punto B”, se calcula el tiempo que toma para que el frente de resina llegue al borde de salida “Punto C” ($L = 0.483$ m) (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

$$u_{YC} = 4.28 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$t = 1129 \text{ s} \approx 19 \text{ min}$$

El flujo de resina en el “Punto B” también se dirige hacia el borde de entrada (“Punto D”), debido al tipo de arreglo del canal de salida ubicado perimetralmente sobre el molde. El tiempo que tarda el frente de resina en llegar del “Punto B” al “Punto D” es ($L = 0.292$ m) (figura 16):

$$u_{YD} = 7.08 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$t = 413 \text{ s} \approx 7 \text{ min}$$

Cálculo del tiempo de llenado del molde lado presión utilizando factores de permeabilidad experimentales

Para el molde presión, se tomarán las mismas consideraciones que para el molde lado succión. Por lo tanto, la velocidad del frente de resina en dirección “Z” es:

$$u_Z = 1.31 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

Al igual que en el molde lado succión, el tiempo que tarda la resina en pasar del canal de entrada de resina “Punto A” hacia la base del molde es de 9 segundos (Figura 18).

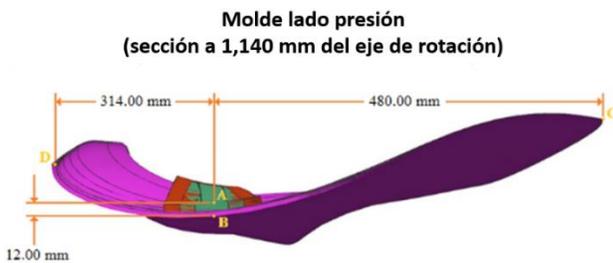


Figura 18. Sección para análisis de flujo del molde lado presión. Fuente: elaboración propia.

Una vez que el frente de resina llega al “Punto B”, se calcula el tiempo que toma para que el frente de resina llegue al borde de salida “Punto C” ($L = 0.480$ m).

$$u_{YC} = 4.30 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$t = 1115 \text{ s} \approx 19 \text{ min}$$

De la misma manera que en el molde lado succión, el flujo de resina en el “Punto B” también se dirige hacia el borde de entrada (“Punto D”); el tiempo que tarda el frente de resina en llegar del “Punto B” al “Punto D” es ($L = 0.314$ m):

$$u_{YD} = 6.58 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$t = 477 \text{ s} \approx 8 \text{ min}$$

Ambos moldes, LP y LS, tienen prácticamente el mismo tiempo de llenado.

El tiempo de saturación de resina obtenido utilizando los Factores de Permeabilidad experimentales es muy parecido a lo que se observa en el proceso de manufactura real ejecutado en el CIATEQ. La Figura 19 muestra las marcas del frente de resina en el molde del lado presión del aspa durante la infusión. Las líneas se marcaron cada 5 minutos; además, coincide el tiempo de saturación de resina en la superficie con el tiempo calculado utilizando los factores de permeabilidad experimentales.

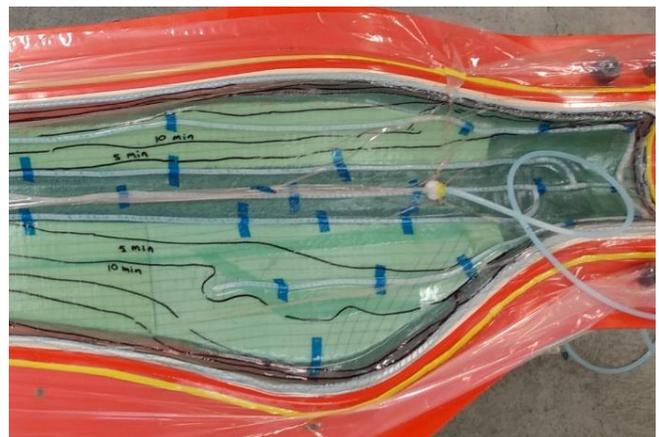


Figura 19. Marcas del frente de resina en el molde de lado presión de un aspa. Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

Se obtuvieron los factores de permeabilidad experimentales en las tres direcciones de flujo de resina del molde del aspa (“X”, “Y” y “Z”), los cuales están dentro del rango esperado de 10^{-9} a $10^{-13} m^2$ para materiales compuestos [3].

Se obtuvieron los tiempos de llenado utilizando la Ley de Darcy para flujo lineal de fluidos incompresibles y los factores de permeabilidad conseguidos en los tres experimentos, los cuales son muy parecidos a los tiempos de llenado reales utilizando la infusión con control de flujo de resina. Sin embargo, hay que tomar en cuenta lo siguiente:

- a. El acomodo de las fibras utilizado en la infusión del aspa combina material de refuerzo con direcciones diferentes, *i.e.* fibras de vidrio y de carbono unidireccionales en el ala de viga (*spar cap*), del cual se debe obtener su respectivo factor de permeabilidad para las tres direcciones principales, a fin de poder realizar una estimación más adecuada del tiempo de llenado del aspa.
- b. Hay que tomar en cuenta que, en la sección analizada (máxima cuerda del aspa), también se utilizan núcleos para formar paneles sándwich, lo que puede generar desviaciones en los resultados de infusión del aspa con respecto de los obtenidos experimentalmente utilizando solo el refuerzo de fibra de vidrio triaxial.
- c. Los cálculos realizados para obtener las velocidades del frente de resina son unidimensionales, lo que puede arrojar resultados diferentes durante la infusión real en el aspa, donde además se utilizan otros materiales que ayudan al transporte de resina, tales como la malla de flujo.
- d. La variación de temperatura respecto del tiempo, que afecta la viscosidad de la resina, no está considerada en la velocidad calculada.

Los factores de permeabilidad obtenidos experimentalmente para la fibra de vidrio triaxial pueden ser utilizados en programas computacionales especializados para predecir con precisión la dinámica del fluido dentro de moldes con un arreglo sencillo. Para arreglos más complejos, como el de un aspa, se requiere información similar de todos los materiales utilizados para lograr resultados más exactos. Sin embargo, los factores de permeabilidad obtenidos para las fibras triaxiales son útiles para conformar un arreglo preliminar de infusión para el aspa, que puede ser exitoso si se toma en cuenta el comportamiento de la resina en las tres dimensiones.

Se confirmaron tiempos de llenado mayores en frentes de flujo de resina corriendo en sentido transversal a la orientación de las fibras del material de refuerzo, con lo cual se respaldan publicaciones y trabajos de investigación anteriores [3,4].

Con los experimentos realizados, se comprobó que el tiempo y la estrategia de infusión de resina depende de la orientación y el tipo de fibras (unidireccionales, bidireccionales, etcétera), así como de la cantidad de capas y tipo de material (carbono o vidrio) colocados sobre la superficie del molde.

También se comprobó que la cantidad de mezcla de resina más catalizador, utilizado para impregnar totalmente cierta cantidad de material de refuerzo, es un poco más de 1/3 del peso de dicho material. Esto es importante para que, en un proceso controlado de infusión, podamos determinar la cantidad exacta de resina a utilizar, lo cual nos ayudará a saber que la saturación fue completa cuando la resina haya sido utilizada en su totalidad.

Reconocimientos

Este trabajo se realizó como parte del proyecto P09: “Desarrollo de aspas para pequeños aerogeneradores, hasta 50 kW”, que es uno de los proyectos estratégicos aprobados por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética, de la convocatoria 2013-03: “Centros Mexicanos de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico)”. El objetivo general del proyecto P09 es el desarrollo tecnológico para el diseño, la manufactura y pruebas estáticas de aspas de aerogeneradores de baja potencia, una de 10 kW y otra de 30 kW [5].

Referencias

1. Deepak V., Garvit J. y Rajneshh D. (2017). *Materials science and engineering - concepts, methodologies, tools, and applications - 20.3.2.1 advantages*. (pp. 505). IGI Global. Information Resources Management Association.
2. Bai-Jian W., Yu-Sung C., Yuan Y. y Jun F. (2014). Online estimation of local permeability in resin transfer molding (pp. 2290). ANTEC - Proceedings of the Technical Conference & Exhibition, Las Vegas, Nevada, USA, April 28-30, 2014. Society of Plastics Engineers.
3. Hsun Y., Tsu-Min H., Chih-Chung H., Yu-Sung C., Yuan Y. y Rong-Yeu C. Through 3D simulation to study resin transfer molding (RTM) process with sandwich structure and gravity effects (pp. 2905). ANTEC - Proceedings of the Technical Conference & Exhibition, Orlando, Florida, USA, March 23-25, 2015. Society of Plastics Engineers.
4. Hoa S.V. Principles of the manufacturing of composite materials, Lancaster, Pennsylvania. DEStech Publications, 2009; pp. 180-181.
5. <http://www.cemieeolico.org.mx/>