

M. Baskaran, A. Dueñas, L. Aretxabaleta, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea

Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, Mondragon 20500, España

Optimización del CRTM mediante técnicas de monitorizado de procesos

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

CRTM

Monitorizado

Optimización

En el presente trabajo se demuestra la validez del sistema de monitorizado, compuesto por los sensores de caudal y presión de inyección de la inyectora, además de los sensores de presión integrados en el molde, para determinar la ventana de proceso óptima del CRTM (Compression Resin Transfer Moulding). Los sensores de la inyectora permiten monitorizar la fase de inyección, mientras que los sensores de presión integrados en el molde permiten hacer el seguimiento de las fases de compresión y curado. Para relacionar las variaciones de presión con las etapas de curado, se ha empleado un sensor eléctrico de corriente continua. El aumento de la resistencia, asociada con el comienzo del curado, se corresponde en el tiempo con la caída de la presión, que a su vez se justifica por la contracción generada durante el curado. Esta caída de presión llega a una asíntota horizontal que se corresponde con un grado de conversión del 40%. Tomando como referencia este comportamiento del sensor de presión, es posible determinar el tiempo mínimo para el desmoldeo de cada una de las piezas. Finalmente, el sistema se ha empleado para monitorizar la fabricación de prototipos con temperaturas de curado entre 80-120 °C, y se ha confirmado que los sensores identifican las piezas que se encuentran dentro de la ventana de proceso y las que no lo están.

Optimization of the CRTM process by means of monitoring techniques

ABSTRACT

Keywords:

CRTM

Monitoring

Optimization

In this work the feasibility of the monitoring system, composed of flow-rate and injection pressure sensors, in addition to the pressure sensors integrated in the mold, is demonstrated to determine the optimal process window of the CRTM (Compression Resin Transfer Molding). The sensors of the injector allow monitoring of the injection phase, while the pressure sensors integrated in the mold allow the phases of the compression and the curing to be followed. In order to relate the pressure sensor variations with the curing phase, an electric current sensor has been used. The increase of the resistance, associated with the beginning of curing, corresponds in time with the pressure drop, which in turn is justified by the contraction generated during curing. This pressure drop reaches a horizontal asymptote which corresponds to a conversion rate of 40%. Based on this behavior of the pressure sensor, it is possible to determine the minimum time for the demoulding of each of the pieces. Finally, the system has been used to monitor the manufacturing of prototypes with curing temperatures between 80-120 °C, and it has been confirmed that the sensors identify the parts that are inside the process window and those that are not.

1 Introducción

La aplicación industrial del *Carbon Fiber Reinforced polymer* (CFRP) en la producción en masa de automóviles, está empezando a utilizar procesos automatizados [1]. Una de las alternativas más prometedoras en cuanto a procesos de fabricación en masa es la combinación del RTM con la compresión, denominada CRTM (*Compression Resin Transfer Moulding*) [2,3]. En el CRTM, a diferencia del RTM convencional, el molde se mantiene parcialmente abierto en la fase de inyección, generando un espacio no ocupado por las fibras que ejerce de camino preferente de flujo para la resina sin necesidad de penetrar en la preforma. Una vez inyectada la cantidad de resina requerida, se cierran los puntos de inyección y se procede a cerrar por completo el molde, forzando a la resina a impregnar la preforma hasta saturarla y obtener el porcentaje/dimensiones finales. Esto significa que el flujo de llenado en la preforma pasa de ser en el plano a ser a través del espesor, lo que supone una reducción de varios órdenes de magnitud en lo que a longitud de flujo se refiere. Este cambio de secuencia de impregnación es la razón de la disminución del tiempo de llenado asociado al CRTM.

Si bien la puesta a punto y el control del proceso implica la especificación de variables tales como temperatura de molde y resina, reología y cinética de curado de la resina, permeabilidad de la preforma, estrategias de inyección y compresión, estos parámetros por sí solos, incluso utilizando herramientas de simulación, no son suficientes para asegurar un proceso de fabricación optimizado. Esta carencia se debe a la sensibilidad que muestra el flujo de resina a las perturbaciones de proceso y variables de material (compresibilidad y permeabilidad local), pudiendo generar posibles defectos y reducción de propiedades en la pieza final. Por lo que las técnicas de monitorizado ayudan a obtener procesos más robustos y a reducir el coste de fabricación [4].

Para ello, existen sistemas de monitorizado del llenado de los procesos de vía líquida (LCM) que dan información sobre la llegada del frente de flujo, presión interna y del curado de la resina permitiendo el monitorizado en tiempo real: la fibra óptica [5], termopares, sensores dieléctricos (AC) [6] y eléctricos (DC) [7], la tecnología de ultrasonido [8], sensores de presión [9], cámaras digitales de visión [10] y piezoeléctricos [11]. Sin embargo, muchos no son adecuados para los procesos industriales de LCM, debido a que no soportan las condiciones de procesamiento (temperatura, inyección, compresión y curado), por ser demasiado invasivas en la pieza final o incluso por su alta complejidad de uso. Además, viendo las exigencias del CRTM, el control del frente de flujo, presión interna y curado se consideran parámetros críticos de control.

El objetivo de este trabajo es demostrar la validez del sistema de monitorizado, compuesto por los sensores de caudal y presión de inyección de la inyectora y de los sensores de presión integrados en el molde, para determinar la ventana de proceso óptima del CRTM. Para calibrar e interpretar la señal del sensor de presión durante el curado, se emplea la señal registrada por un sensor DC y termopares. Para el control a tiempo real del proceso se implementa un diagrama de control

de flujo donde se detectan posibles anomalías del proceso. Este sistema de monitorizado se valida mediante la fabricación de un componente de automoción donde se detectan las perturbaciones generadas en el proceso.

2 Experimental

En la figura 1 se describe el utillaje que se ha empleado para la fabricación de un componente de automoción mediante CRTM. El molde está compuesto por un molde inferior fijo y un molde superior móvil que se amarra a una servo prensa mecánica de 400 t de Fagor. Para la inyección se utiliza una inyectora eléctrica (*2100cc Series RTM Injection System*) con la cual se controla caudal o presión constante. La inyección se realiza con un único punto de inyección, conectándose en el centro del molde superior y los puntos de vacío en los dos extremos inferiores. La estrategia de compresión se realiza mediante control de velocidad. En cuanto al monitorizado del proceso, la fuerza de cierre requerida es registrada por la servo prensa mecánica. Para controlar la impregnación de la preforma, distribución de presiones dentro del molde y conocer el nivel de conversión de la pieza cada instante, se colocan tres sensores de presión, dos en los extremos y uno en el centro. Para registrar la temperatura de la resina cada instante se introducen dos termopares.

Para poder calcular el tiempo de ciclo, es necesario optimizar el tiempo de desmoldeo. Para ello, los sensores de presión introducidos dentro del molde dan una ligera idea del grado de conversión de la resina. Este depende de la temperatura de molde que se ha utilizado para curar la resina.

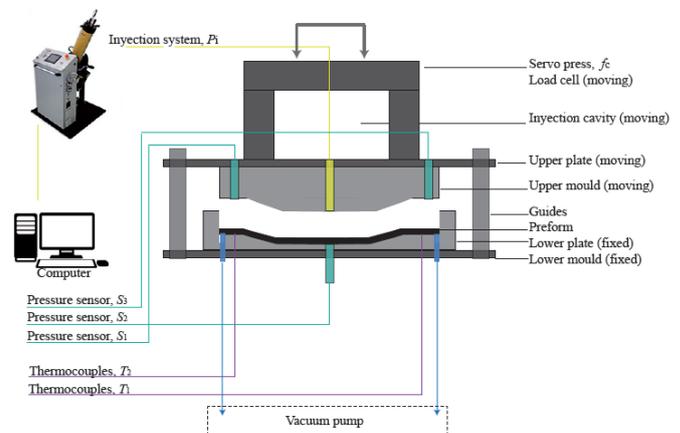


Figura 1: Esquema del molde.

2.1 Sistema de monitorizado

En la figura 2 se ha llevado a cabo un diagrama de control de proceso, con el cual, junto a los dispositivos de control de señal introducidos en el molde, se controla las diferentes etapas del procesado a tiempo real. Este diagrama no solo muestra el estado del proceso, sino que posibilita la anticipación de posibles problemas, la generación de procesos más robustos, la optimización del proceso y la posibilidad de implantar acciones correctivas a tiempo real. El diagrama de control de flujo del CRTM está dividido en 5 grupos: 1) inicio de la inyección donde por un lado se controla la presión de inyección (P_i), caudal (Q_i), y volumen inyectado (V_i), y por otro lado para controlar la progresión del frente de flujo se utilizan los



termopares (T_{1i} , T_{2i}) y sensores de presión (S_{1i} , S_{2i} , S_{3i}). Cabe destacar que debido a que el molde está parcialmente abierto, la resina no llega a todos los sensores instalados en el molde, por ello la importancia de la detección de los sensores de presión y termopares durante la fase de inyección se posiciona en un segundo plano. Al mismo instante de la inyección, se activa el inicio de la reacción de la resina 2). A continuación se da el fin de la fase de inyección 3) donde se verifica que todo el volumen de resina se ha inyectado dentro del molde (V_i). Una vez comprobado que todo el volumen ha sido inyectado se pasa a la fase de compresión 4), instante en el que se cierra el molde a velocidad constante (v_c). A continuación se aplica el vacío para extraer las posibles burbujas generadas dentro del molde (p_v) y así reducir la cantidad de poros generados en la pieza final. Por último, basándose en la ventana de proceso definido en el apartado 2.3 y en la señal de los sensores de presión (S_{1c} , S_{2c} , S_{3c}), se desmoldea la pieza 5).

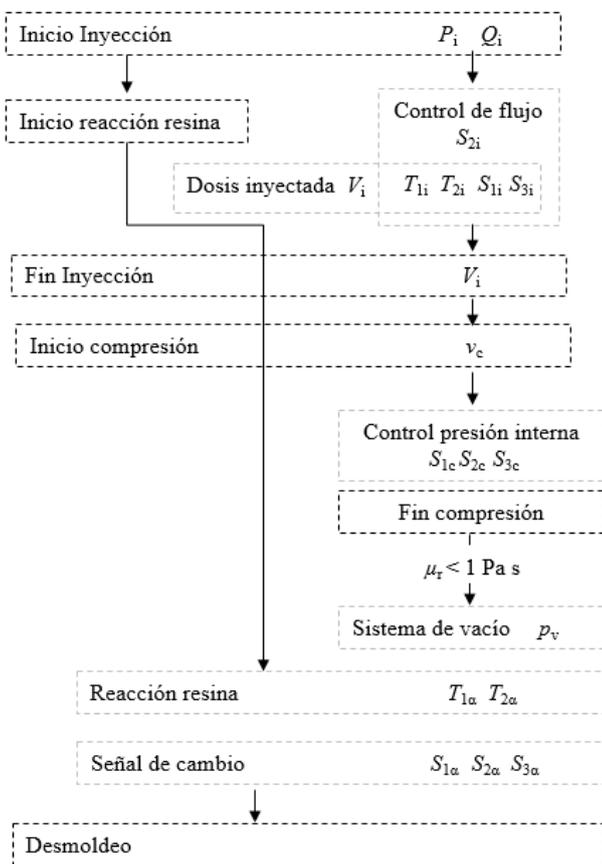


Figura 2: Diagrama de control de flujo.

2.2 Interpretación de la señal del sensor de presión

Mediante técnicas Calorimetría Diferencial de Barrido (DCS), se realiza la caracterización cinético-reológica de la resina. Sin

embargo, estos resultados se obtienen en condiciones de trabajo diferentes a las de procesado, por lo que es necesario hacer un estudio previo del comportamiento de la resina en condiciones similares al proceso de fabricación. El objetivo de esta técnica es determinar la ventana de proceso (desde la inyección hasta el desmoldeo) según la temperatura de curado. Para ello, se han utilizado sensores de presión (PX61V-0500AV) que miden en un rango de 0 a 30 bar. Para la selección del sensor de presión se debe tener en cuenta la compatibilidad que muestra con las condiciones de procesado típicas de RTM y materiales que se utilizan, la capacidad de integrar en el molde, el poder ser utilizado permanentemente sin afectar a la pieza final y mostrar el valor instantáneo de la señal.

En la fase de curado se genera una contracción que es proporcional al grado de conversión [12]. El sensor de presión detecta sucesivas alteraciones de presión, sin embargo se desconoce la relación entre la señal de sensor de presión con la del grado de curado de la resina. Para interpretar las alteraciones de presión detectadas, la señal del sensor se compara con un sensor que mide la resistividad eléctrica del material, ya que esta propiedad está directamente ligada al grado de curado del composite [6-7]. Por ello, se ha desarrollado un utillaje para la interpretación de la señal del sensor de presión. La figura 3 muestra una descripción gráfica del utillaje para el análisis del curado. El utillaje diseñado está compuesto por un molde inferior fijo y uno superior móvil donde se colocan los dos sensores. Para calentar el utillaje se utiliza un sistema de atemperación eléctrica. Una vez que las dos placas de acero hayan alcanzado la temperatura de curado, la fibra seca se impregna de resina y se introduce entre las dos placas donde se registra la señal de ambos sensores a medida que se lleva a cabo el curado. Con el objetivo de proporcionar un amplio abanico de temperaturas con las que poder estudiar y optimizar el proceso de fabricación, se analizan las temperaturas de curado de 80 °C, 100 °C y 120 °C con 3 repeticiones por cada una de las temperaturas.

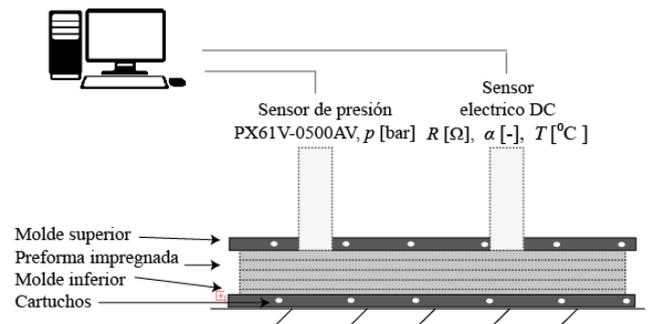


Figura 3: Esquema de la caracterización del sensor.



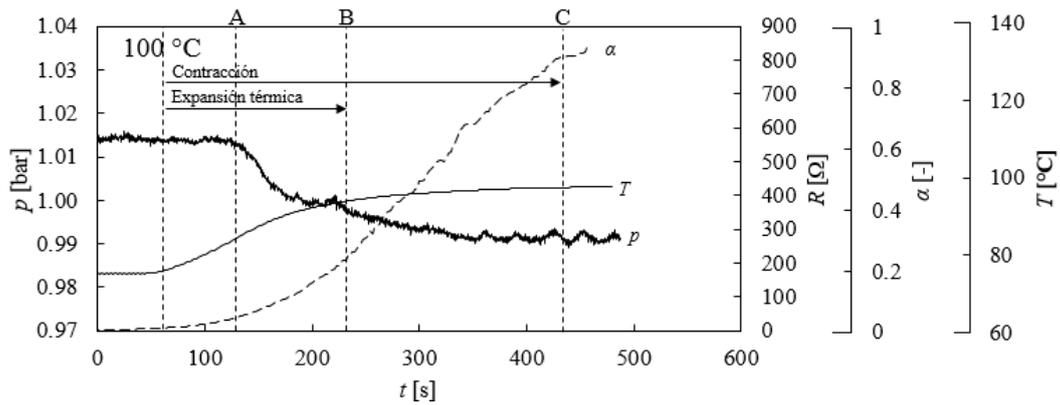


Figura 4: Señal de los sensores.

La figura 4 muestra el valor de ambos sensores en el tiempo a 100°C que es representativa de las otras temperaturas de curado estudiadas. En el eje vertical izquierdo se muestra la señal del sensor de presión (p), mientras que en el eje vertical derecho se muestra la señal del sensor eléctrico, es decir, la resistencia que muestra la resina cada instante (R), el grado de conversión equivalente (α), y la temperatura de la resina (T). En el primer tramo, hasta zona A, se da la fase de calentamiento, donde la resina al principio está en estado líquido a temperatura ambiente y sucesivamente aumenta la viscosidad hasta llegar a la gelificación e inicio de la vitrificación. A partir de este instante (zona A) el sensor detecta modificaciones de presión debidas a dos fenómenos; i) a la contracción que sufre la resina por el curado (negativa) y ii) a la expansión térmica (positiva). Entre la zona A y la C la señal del sensor eléctrico empieza a aumentar, lo que se relaciona con el aumento del grado de conversión. Por el contrario, el sensor de presión registra una caída de señal, lo que se relaciona con la contracción que sufre la resina en el curado. La caída de presión es más pronunciada en el tramo A-B, debido a que la relación entre la contracción volumétrica de la resina frente al grado de curado no es lineal, siendo mayor al inicio del curado [12]. En algunos casos el nivel de contracción puede ser tan grande, que se pierde el contacto entre el sensor y el material. Al final de la zona B, la caída de presión es menor, y el grado de conversión se encuentra entre el 0,3 y el 0,4. La rigidez y la resistencia de la matriz evoluciona con el grado de curado, y para estos niveles de conversión, según bibliografía, la epoxy alcanza niveles del 50% de las propiedades finales [12]. Por lo tanto, y dependiendo de la simplicidad del componente que se esté fabricando, la rigidez es suficientemente elevada como para desmoldar. Por último, cuando el grado de conversión está llegando a 0,8 la señal del sensor de presión tiende a estabilizarse (zona C). Este puede ser un segundo criterio de desmoldeo más conservador.

2.3 Definición de la ventana de proceso

Una vez entendido el comportamiento de los sensores de presión frente al curado se puede interpretar lo que sucede en el proceso de CRTM. La figura 5 muestra el inicio y final del curado basándose en la señal registrado por el sensor eléctrico. Por otra parte, también se representan los tiempos referidos a las fronteras entre las zonas A, B y C determinadas por los cambios de presión explicados en el apartado anterior. La señal

del sensor eléctrico, marcando el inicio y final de curado por cada temperatura. También se representan los tiempos referidos a las fronteras entre las zonas A, B y C determinadas por los cambios de presión explicados en el apartado anterior. Por último, se añade la línea que representa el tiempo de gel para cada temperatura, así como las líneas correspondientes a los grados de conversión que se asocian al desmoldeo y a la finalización del curado, 0,3 y 0,8 respectivamente. Se puede comprobar que la señal de ambos sensores coincide en el límite inicial y final del curado. La selección de la temperatura del molde, así como del tiempo de desmoldeo, se basarán en la ventana de proceso de la figura 5.

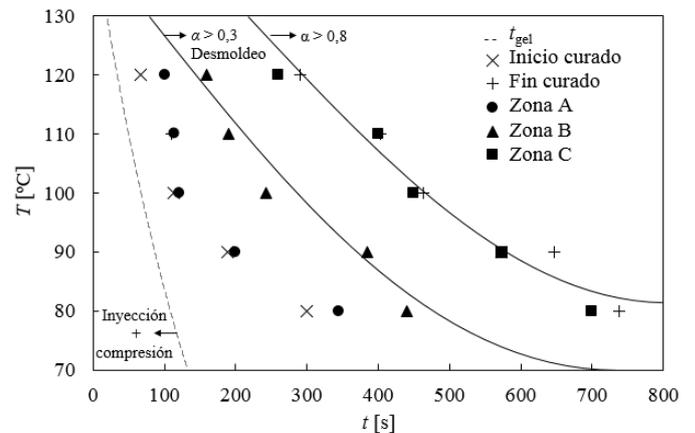


Figura 5: Ventana de procesos que relaciona la temperatura de curado con los tiempos de cada etapa.

3 Estudio de un componente de automoción

3.1 Material

Para el análisis de este estudio se ha seleccionado una barra anti-intrusión (Figura 6). El refuerzo empleado para la fabricación del prototipo es un tejido biaxial *Non-Crimp Fabric* (NCF) de fibra de carbono de 50k y 610 g/m², referencia HPT 610 C09. La preforma de la barra anti-intrusión está compuesta por cuatro telas en la parte central, y seis capas en los laterales, debido al aumento del espesor de la pieza.



Tabla 1: Resultados de la fabricación a diferentes temperaturas. t_i Tiempo de inyección, P y Q Presión y caudal de inyección, V_1 Volumen inyectado, f_c fuerza de compresión, S_{c1} Señal del sensor de presión 1, $t_g > t$ tiempo de gel y t_c tiempo de curado.

Temperatura	Fase de inyección			Fase de compresión					Fase de curado
	t_i [s]	P [bar]	Q [cm ³ /min]	f_c [t]	S_{1c}	S_{2c}	S_{3c}	$t_g > t$	t_c
80 °C	45	3	450	60	4	2,5	4	√	450
100 °C	55	5	440	140	5,5	5	5,5	√	280
120 °C	60	8	390	150	1	2	1	x	150

La resina que se ha utilizado es una resina epoxy de rápido curado (XB 3585) y endurecedor (Aradur® 3475), suministrada por Hunstman. La proporción empleada ha sido 100:21.

**Figura 6:** Prototipo de barra anti-intrusión.

La consigna de la inyectora utilizada ha sido 500 cm³/min y la limitación de 20 bar de presión de inyección. Se han estudiado tres temperaturas de curado: 80, 100 y 120 °C.

3.2 Resultados

En la tabla 1 se recogen los valores obtenidos del sistema de monitorizado descrito en la figura 2. Las piezas fabricadas a 80 y 100 °C han llegado a impregnarse correctamente, pero el tiempo de ciclo para 80 °C ha sido el doble que para 100 °C. Al mantener el molde a 100 °C, posibilita la opción de desmoldear a 145 s llegando a ratios de tiempos de ciclo competentes. Sin embargo en el prototipo curado a 120 °C, los extremos no se han impregnado. Este problema de llenado se confirma con la señal obtenida de los sensores de presión S_{c1} y S_{c3} , ya que no han detectado ninguna señal de la resina. La razón de que no haya impregnado, se debe a que el tiempo de inyección ha sido mayor que el tiempo de gel.

4 Conclusiones

Se ha validado un sistema de monitorizado, compuesto por sensores de caudal y presión de inyección de la inyectora, y de sensores de presión integrados en el molde. Se ha llevado a cabo un diagrama de control de proceso, con el cual, junto a los dispositivos de control de señal introducidos en el molde, se controla las diferentes etapas del procesado a tiempo real. Debido a que el tiempo de desmoldeo es crítico para la optimización del proceso, mediante los sensores de presión y la interpretación de la señal realizada, se determina el tiempo de desmoldeo, definiendo la venta de proceso por cada temperatura.

Este sistema se ha empleado para monitorizar la fabricación de un componente para automoción con temperaturas de curado entre 80-120 °C, y se ha confirmado que el diagrama de control

de flujo definido, identifica las piezas que se encuentran dentro de la ventana de proceso y las que no lo están.

Agradecimientos

M. Baskaran agradece al Gobierno Vasco la subvención de la beca predoctoral (PRE_2014_1_402). Los autores también agradecen al Gobierno Vasco (IT883-16, UE2015-04), a la Diputación Foral de Guipúzcoa (57/15) y a Fagor Arrasate S. Coop. por la financiación para la realización del presente trabajo.

Referencias

- [1] Koch C, Nonn A, Maidl F, Maurer T, Töpker J, Bickerton S, et al. *Influence of textile architecture by processing carbon fiber based non-crimp fabrics in automotive serial application using High-Pressure-RTM* 2016:26–30.
- [2] Merotte J, Simacek P, Advani SG. *Flow analysis during compression of partially impregnated fiber preform under controlled force*. *Compos Sci Technol* 2010;**70**:725–33.
- [3] Baskaran M, Ortiz de Mendibil I, Sarrionandia M, Aurrekoetxea J, Acosta J, Argarate U, et al. *Manufacturing cost comparison of RTM, HP-RTM and CRTM for an automotive roof*. 16th Eur Conf Compos Mater Seville, Spain, 22-26 June 2014:22–6.
- [4] Fratta C Di, Klunker F, Ermanni P. *A methodology for flow-front estimation in LCM processes based on pressure sensors*. *Compos Part A* 2013;**47**:1–11.
- [5] Gupta N, Sundaram R. *Fiber optic sensors for monitoring flow in vacuum enhanced resin infusion technology (VERITY) process*. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2009;**40**:1065–70.
- [6] R. Meier, S. Zaremba, F. Springl, K. Drechsler FG and CW. *Online process monitoring systems*. *Proceeding 11th Int. Conf. Flow Process. Compos. Mater.*, 2012.
- [7] Bickerton S, Stadtfeld HC, Steiner K V., Advani SG. *Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding*. *Compos Sci Technol* 2001;**61**:1625–37.
- [8] Luthy T, Landert M EP. *1D-permeability measurements based on ultrasound and linear direct current resistance monitoring techniques*. *J Mater Process Manuf Sci* n.d.
- [9] Amico S, Lekakou C. *An experimental study of the*



- permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding*. *Compos Sci Technol* 2001;**61**:1945–59.
- [10] Nielsen DR, Pitchumani R. *Closed-loop flow control in resin transfer molding using real-time numerical process simulations*. *Compos Sci Technol* 2002;**62**:283–98.
- [11] S. Konstantopoulos EF, R. Schledjewski. *Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods*. *eXPRESS Polym Lett* 2014;**8**:823–840.
- [12] Kravchenko OG, Li C, Strachan A, Kravchenko SG, Pipes RB. *Prediction of the chemical and thermal shrinkage in a thermoset polymer*. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2014;**66**:35–43.

