



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i3>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

Analytical model for the pultrusion manufacturing process of composite materials with a thermosetting matrix

Modelo analítico para o processo de fabricação por pultrusão de materiais compósitos com matriz termofixa

Katherine Yajaira Morales-Cunuhay^I
kymorales@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8376-2227>

Rogelio Paul Arcos-Castillo^{II}
rparcos@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9055-9462>

María Fernanda Mogro-Borja^{III}
mfmogro@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6539-0762>

Fredin Fernando Pozo-Parra^{IV}
fpozop@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7189-1320>

Fausto Andrés Jácome-Guevara^V
fajacome1@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3470-5813>

Correspondencia: kymorales@espe.edu.ec

***Recibido:** 30 de octubre del 2022 ***Aceptado:** 11 de noviembre del 2022 * **Publicado:** 08 de diciembre del 2022

- I. Ingeniera Petroquímica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- II. Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Motores, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- III. Magíster en Manufactura y Diseño Asistido por Computador, Ingeniera Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- IV. Máster en Ingeniería Matemática y Computación, Licenciado en Ciencias de la Educación, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Quevedo, Ecuador.
- V. Magíster en Ingeniería Mecánica mención Manufactura, Ingeniero Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.

Resumen

El siguiente artículo tiene como objetivo presentar un modelo analítico para el procesamiento de materiales compuestos con matriz termoestable a través del proceso de fabricación de pultrusión, el problema consistió en encontrar la distribución de temperatura y el grado de conversión dentro del material compuesto a lo largo del molde de calentamiento y la fuerza de tracción requerida para tirar el material compuesto a una velocidad de tracción determinada. El modelo se validó experimentalmente, donde se determinaron los valores de las constantes en el modelo y se verificó la validez del mismo. También se validó numéricamente, donde se utilizaron cálculos numéricos mediante la técnica de elementos finitos para poder estimar valores de temperatura y el grado de conversión del material, dichos cálculos fueron realizados por pasos, e iterativamente se llegó a los resultados a través de las diferentes ecuaciones planteadas para las geometrías del molde y condiciones de procesamiento. Las distribuciones de temperatura calculadas y experimentales dentro del material compuesto indican que a medida que la fibra impregnada con resina entra en el molde de calentamiento, la temperatura comienza a subir desde el área en contacto con la pared del molde; por lo tanto, al principio, la temperatura de la superficie del compuesto se vuelve más alta que en el centro. Además, se evidenció en base a la distribución del grado de conversión, que la reacción de curado de la resina viniléster es mucho más rápida que la de la resina epoxi.

Palabras clave: Materiales compuestos; Pultrusión; Temperatura; Grado de conversión.

Abstract

The following article aims to present an analytical model for the processing of composite materials with a thermosetting matrix through the pultrusion manufacturing process, the problem consisted in finding the temperature distribution and the degree of conversion within the composite material throughout the process. heating mold and the tensile force required to pull the composite material at a given tensile speed. The model was validated experimentally, where the values of the constants in the model were determined and its validity was verified. It was also validated numerically, where numerical calculations were used through the finite element technique to be able to estimate temperature values and the degree of conversion of the material, said calculations were carried out in steps, and iteratively reached the results through the different equations. raised for the geometries

of the mold and processing conditions. The calculated and experimental temperature distributions within the composite material indicate that as the resin-impregnated fiber enters the heating mold, the temperature begins to rise from the area in contact with the wall of the mold; therefore, at first, the temperature of the surface of the compound becomes higher than in the center. In addition, it was evidenced based on the distribution of the degree of conversion, that the curing reaction of the vinyl ester resin is much faster than that of the epoxy resin.

Keywords: Composite materials; Pultrusion; Temperature; Conversion degree.

Resumo

O seguinte artigo tem como objetivo apresentar um modelo analítico para o processamento de materiais compósitos com matriz termoendurecível através do processo de fabricação por pultrusão, o problema consistiu em encontrar a distribuição de temperatura e o grau de conversão dentro do material compósito ao longo do processo. força de tração necessária para puxar o material compósito a uma determinada velocidade de tração. O modelo foi validado experimentalmente, onde foram determinados os valores das constantes no modelo e verificada a sua validade. Também foi validado numericamente, onde foram utilizados cálculos numéricos através da técnica de elementos finitos para poder estimar valores de temperatura e o grau de conversão do material, os referidos cálculos foram realizados em etapas, e de forma iterativa chegaram aos resultados através dos diferentes equações levantadas para as geometrias do molde e condições de processamento. As distribuições de temperatura calculadas e experimentais dentro do material compósito indicam que quando a fibra impregnada com resina entra no molde de aquecimento, a temperatura começa a subir a partir da área em contato com a parede do molde; portanto, a princípio, a temperatura da superfície do composto torna-se mais alta do que no centro. Além disso, foi evidenciado com base na distribuição do grau de conversão, que a reação de cura da resina éster vinílica é muito mais rápida que a da resina epóxi.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Pultrusão; Temperatura; Grau de conversão.

Introducción

El proceso de pultrusión es un proceso de fabricación de bajo costo y gran volumen de producción en el que las fibras impregnadas de resina se arrastran a través de un molde para fabricar un

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

componente, el proceso es similar al de la extrusión de metales, con la diferencia de que, en lugar de empujar el material a través de la matriz en el proceso de extrusión, se tira/tracciona de él en el proceso de pultrusión (Baran, 2015). Este proceso crea componentes de sección transversal constante y longitud continua (ver Figura 1), por ende, tiene una alta productividad.

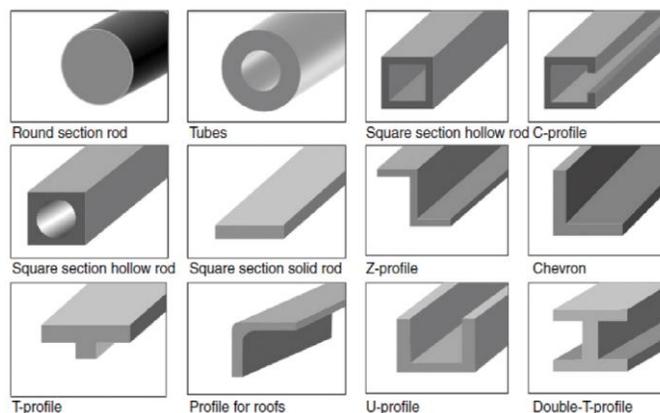


Figura 1. Componentes de sección transversal constante.

En el proceso de pultrusión pueden utilizarse tanto matrices termoestables como termoplásticas, aunque las matrices termoestables son las más populares (Baran, 2015). La pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable consta de dos procesos (impregnación + curado) como se observa en la Figura 2. La fibra (fiber roving creel) pasa por un baño de resina (resin bath), una vez impregnada con resina líquida entra en un molde de calentamiento (heating die) donde se induce la reacción química debido a la elevada temperatura, para salir del mismo curado a través de un extractor (puller) (Kim et al., 1997).

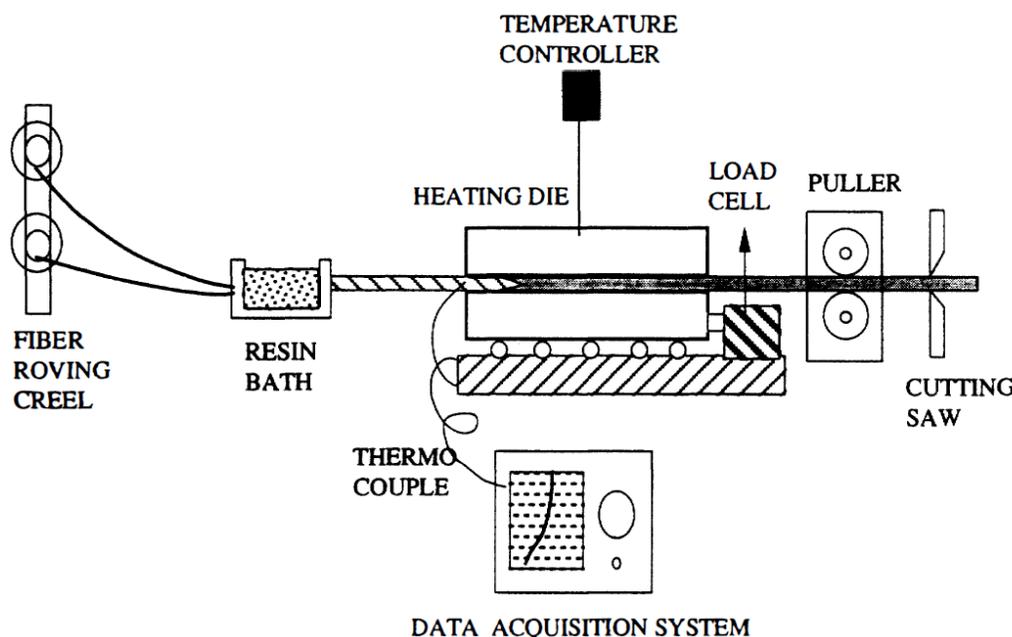


Figura 2. Esquema del proceso de pultrusión (matrices termoestables).

Para el proceso de curado dentro del molde de calentamiento, se deben setear tanto la temperatura como la velocidad de tracción, es ahí donde los fenómenos de transporte toman mucha importancia en el proceso de fabricación, ya que unas condiciones inadecuadas en el proceso pueden resultar en una falla total del proceso y en malas propiedades mecánicas del producto final (Kim et al., 1997). Con este proceso se pueden alcanzar elevados contenidos de fibra (hasta 85% de fracción en volumen de fibra).

Metodología

Definición del problema

La fibra impregnada con resina se tracciona a través de un molde de calentamiento a una velocidad constante, como se observa en la Figura 3. La sección transversal del molde es constante a lo largo de la dirección de tracción, excepto cerca de la entrada donde se tiene una sección cónica, por ende, la sección transversal disminuye a lo largo de la dirección de tracción (Kim et al., 1997). El molde se calienta para inducir la reacción de curado de la resina y es necesario especificar la temperatura de pared del molde (T_w). Además, se considera que la longitud en la dirección “z” del molde de calentamiento es mucho más larga en comparación con la longitud en la dirección “x” e “y”, de

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

modo que la conducción de calor en la dirección “z” puede despreciarse (Minchenkov et al., 2021). Por ende, el problema consiste en encontrar la distribución de temperatura y el grado de conversión dentro del material compuesto a lo largo del molde de calentamiento y la fuerza de tracción requerida para tirar el material compuesto a la velocidad de tracción determinada (V).

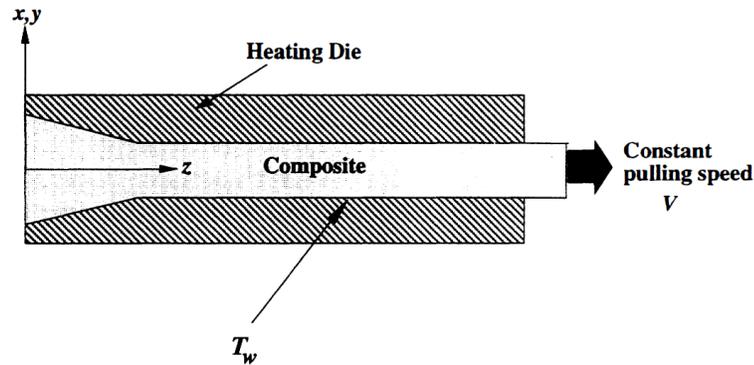


Figura 3. Diagrama de definición del problema.

En base a lo expuesto y en referencia a la Figura 3, se plantean diferentes hipótesis a tener en consideración en los modelos, como son: estado estacionario, fluido newtoniano, régimen laminar ($Re \leq 2000$), el movimiento se da solo en la dirección “z”, la longitud en la dirección “z” del molde de calentamiento es mucho mayor que la longitud en la dirección “x” e “y”, y la fuerza de tracción requerida para tirar el material compuesto estará determinada en base a la velocidad de tracción dada (V).

Modelo

Transferencia de calor

La temperatura dentro del material compuesto en el molde de calentamiento se puede describir mediante la ecuación de la energía (Khan & Methven, 2010); la ecuación vectorial de la temperatura, es la indicada en la Ecuación (1), luego en coordenadas rectangulares se simplifica considerando las hipótesis planteadas, como se observa en la Ecuación (2).

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = (k \nabla^2 T) + (\mu \Phi_v) \quad (1)$$



Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + u'''; v_z = V \quad (2)$$

Así se obtiene la Ecuación (3), donde ρ es la densidad, C_v es el calor específico, k es la conductividad térmica del compuesto y V es la velocidad a la que se tracciona el material compuesto; donde u''' representa la generación interna de calor que es causada por la reacción de curado exotérmica de la resina, y está relacionada con el grado de conversión α por la Ecuación (4), donde H_R es el calor total de reacción por unidad de masa de resina, ρ_r es la densidad de la resina y v_f es la fracción en volumen de fibra (Kim et al., 1997).

$$\rho C_v V \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + u''' \quad (3)$$

$$u''' = \rho_r (1 - v_f) H_R \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

Como ya se mencionó anteriormente, se considera que la longitud del molde de calentamiento es mucho mayor que las dimensiones en las otras direcciones, de modo que la conducción de calor en la dirección “z” puede despreciarse, sin embargo, para materiales compuestos gruesos, si la velocidad de tracción es muy baja, la conducción en la dirección “z” es posible que sea necesario incluirla (Kim et al., 1997). La reacción de curado se puede describir mediante modelos a través de las ecuaciones cinéticas (5) y (6), donde C_0 , C_1 , E_1 , E_2 , A_1 , A_2 , m y n son constantes, y fueron obtenidas a partir de mediciones con DSC (Differential Scanning Calorimeter), obteniendo los resultados presentados en la Tabla 1 para la resina epoxi y viniléster (Volk et al., 2021). Las condiciones de contorno necesarias se indican en la Ecuación (7).

$$\alpha = (C_0 + C_1 T) \beta \rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = (C_0 + n C_1 T) \frac{d\beta}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \left[A_1 \exp\left(\frac{E_1}{T}\right) + A_2 \exp\left(\frac{E_2}{T}\right) \beta^m \right] (1 - \beta)^n \quad (6)$$

Tabla 1. Valores de las constantes en el modelo cinético de curado.

	Epoxi	Viniléster
C_0	-1.0369	-8.8466
C_1 (1/K)	0.00534	0.02639

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

A_1 (1/s)	8.37×10^5	2.805×10^8
A_2 (1/s)	117.35	3.406×10^9
E_1 (K)	-18662.7	-10048.4
E_2 (K)	-3658.25	-9505.58
m	0.58	0.693
n	1.42	1.327

$$T = T_w \rightarrow \text{en la pared del molde de calentamiento} \quad (7)$$

$$T = T_i, \alpha = \alpha_i \rightarrow \text{en la entrada al molde de calentamiento}$$

Las soluciones de las ecuaciones (3) - (7) proporcionan las distribuciones de temperatura y grado de conversión dentro del material compuesto (Joshi et al., 2003). Para la Ecuación (3) y (4), se pueden estimar las propiedades termofísicas del material compuesto en base a las propiedades de la fibra y la resina como funciones de la fracción en volumen de fibra (Koubaa et al., 2013), como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades termofísicas de la fibra y la resina.

	Fibra de vidrio	Epoxi	Viniléster
ρ (Kg/m ³)	2540	1200	1030
C_v (J/Kg K)	835	1255	1900
k (W/m K)	0.76	0.17	0.193
H_R (J/Kg)	-	4.16×10^5	2.79×10^5
v_f	0.55 (molde de calentamiento rectangular)		
	0.50 (molde de calentamiento circular)		

$$\rho = v_f \rho_f + v_r \rho_r$$

$$C_v = \frac{v_f \rho_f}{\rho} C_{v_f} + \frac{v_r \rho_r}{\rho} C_{v_r}$$

$$k = k_f \left[1 - \sqrt{v_f} + \frac{1}{\sqrt{1/v_f} + (k_r/k_f - 1)} \right]$$

Fuerza de tracción

La resistencia a la tracción del material compuesto durante el proceso de pultrusión se genera a partir de dos fuentes diferentes, como se observa en la Figura 4. La primera fuente, τ_b proviene de

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

la acumulación de presión en la entrada en la sección cónica; la resistencia en esta región es la componente axial de la fuerza resultante debido a la presión sobre la pared del molde de calentamiento. La otra fuente, τ_r es la fricción entre el material compuesto y la pared del molde de calentamiento; esta fuerza de fricción es dominante en la sección de área constante del molde de calentamiento (Summerscales, 2016).

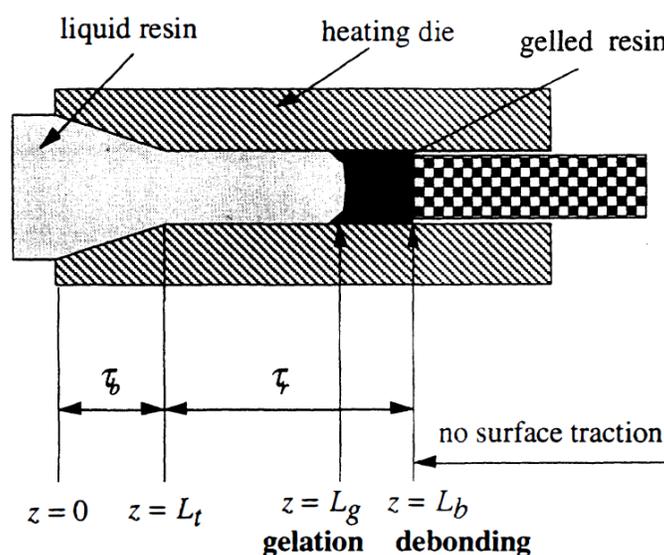


Figura 4. Fuentes de la fuerza de tracción.

En la entrada del molde, la contracción en el área de la sección transversal, así como la expansión térmica de la resina líquida induce el flujo de resina en la dirección inversa a la tracción. La presión dentro del material compuesto se acumula debido al flujo inverso de resina. El gradiente de presión dentro del material compuesto a lo largo del molde se deduce a través del análisis del volumen de control por medio del principio de conservación de masa como se indica en la Figura 5, y esta descrito por la Ecuación (8), donde K es la constante de Kozeny, D_f es el diámetro de la fibra, v_f es la fracción en volumen de la fibra y L_t es la longitud de la sección cónica del molde como se observa en la Figura 5. Se asume que el flujo es unidimensional ya que las fibras de refuerzo son unidireccionales y la permeabilidad en la dirección transversal es mucho menor que la permeabilidad en la dirección de la fibra. Además $\Delta v/v$ representa el cambio de volumen de la resina y es una combinación de expansión térmica y retracción química inducida por el curado de la

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

resina como se observa en la Ecuación (9), donde α_v es el coeficiente de expansión térmica y γ es el coeficiente de contracción volumétrica de la resina debido a la reacción química.

$$\frac{dP}{dz} = V \eta \frac{16 K}{D_f^2} \frac{v_f^2(z)}{[1 - v_f(z)]^3} \left[1 - v_f(z) - (1 - \Delta v/v) \left(\frac{v_f(z)}{v_f(L_t)} - v_f(z) \right) \right] \quad (8)$$

$$\Delta v/v = \alpha_v \Delta T - \gamma \Delta \alpha \quad (9)$$

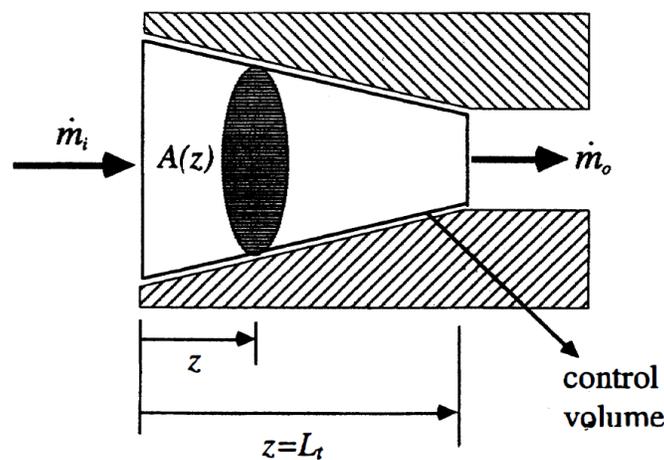


Figura 5. Volumen de control y flujo de masa.

La viscosidad η de la resina puede ser modelada como función de la temperatura y el grado de conversión α como se observa en la Ecuación (10). Los valores de las constantes η_∞ , A y B para la ecuación de la viscosidad tanto para la resina epoxi y viniléster son los indicados en la Tabla 3, dichos valores son obtenidos a través de RMS (Rheometrics Mechanical Spectrometer). La integración de la Ecuación (8) proporciona la distribución de presión a lo largo del eje, una vez conocida la distribución de presión en la región cónica de entrada $P(z)$, la fuerza por unidad de longitud del molde en la dirección opuesta a la tracción se puede estimar a través de la Ecuación (11), donde θ es el ángulo de la sección cónica, y puede ser determinado a través de las dimensiones en un molde de calentamiento rectangular o circular como se observa en la Figura 6.

$$\eta = \eta_\infty \exp\left(\frac{A}{T} + B \alpha\right) \quad (10)$$

$$\tau_b = P(z) \sin \theta \quad (11)$$

Tabla 3. Valores de las constantes para la ecuación de continuidad.

	Epoxi	Viniléster
η_{∞} (Pa s)	2.6×10^{-7}	5.4×10^{-6}
A (K)	5200	3836
B	42.5	38.0

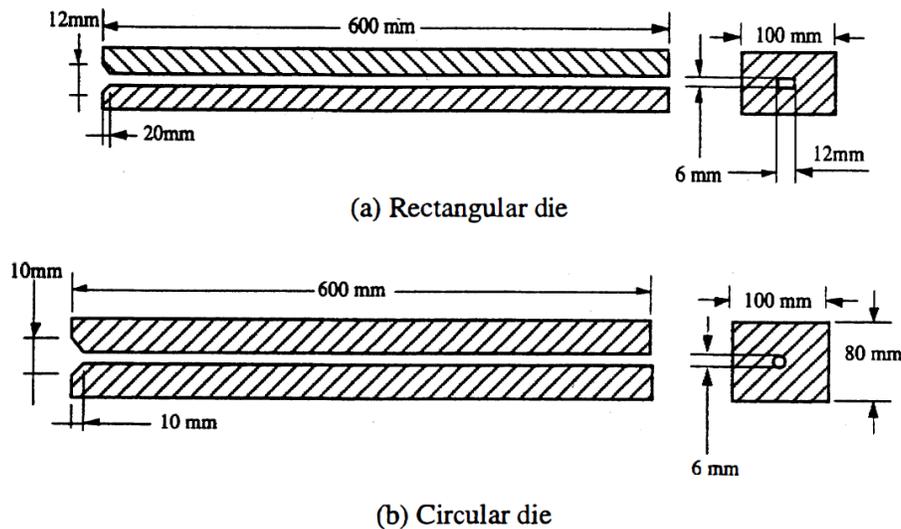


Figura 6. Geometría del molde de calentamiento.

A medida que el área de la sección transversal se vuelve constante después de la entrada del molde, la fricción entre la pared del molde y el material compuesto da lugar a una fuerza de resistencia sobre la superficie del material compuesto. Inmediatamente después de la entrada del molde, cuando la resina todavía está en estado líquido, existe una capa delgada de resina líquida en la interfaz entre el material compuesto y la pared del molde. Dado que el material compuesto se mueve a una velocidad constante mientras la pared del molde permanece estacionaria, se genera una fuerza de resistencia por corte de la capa de resina. A medida que se tracciona el material compuesto hacia la salida del molde, prosigue la reacción de curado. Después del punto de gelación, la resina se solidifica y la capa de resina ya no genera la fuerza de corte. En esta etapa, la fuerza de resistencia es causada por la fricción de Coulomb entre el material compuesto solidificado y la

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

pared del molde. Para estimar la fuerza de tracción debida a la fricción, se debe conocer la distribución de la presión dentro del material compuesto a lo largo del molde.

Como se explicó anteriormente, en la región de la entrada cónica, la presión se acumula dentro del compuesto debido al flujo inverso de resina y expansión térmica. Después de la sección cónica ($z > L_t$), donde la sección transversal se vuelve constante, todavía puede haber un flujo inverso de resina debido a la expansión térmica continua; esto aumenta aún más la presión dentro del material compuesto (Novo et al., 2015). Como la fracción en volumen de fibra permanece constante después de la región cónica, este cambio en la presión se puede estimar usando la Ecuación (8) teniendo en consideración que $v_f(z) = v_f(L_t)$. Por lo tanto, el gradiente de presión a lo largo del molde después de la sección cónica estará dada por la Ecuación (12).

$$\frac{dP}{dz} = V \eta \frac{16 K}{D_f^2} \frac{v_f^2(L_t)}{[1 - v_f(L_t)]^3} (\Delta v/v) [1 - v_f(L_t)] \quad (12)$$

Una vez que la resina gelifica, no existe flujo de resina. La contracción volumétrica causada por la reacción de curado evita el aumento de la presión debido a la expansión térmica y finalmente separa el material compuesto de la pared del molde. Por lo tanto, después del punto de gelación, el cambio de presión se puede expresar según la Ecuación (13), donde k_b es la compresibilidad de la resina.

$$\frac{dP}{dz} = \frac{1}{k_b} \left[\alpha_v \frac{dT}{dz} - \gamma \frac{d\alpha}{dz} \right] \quad (13)$$

Al integrar las ecuaciones (8), (12) y (13), se obtiene la distribución de la presión $P(z)$; inmediatamente después de la entrada del molde, la temperatura del material compuesto cerca de la pared es más alta que en el interior. La resina cerca de la pared del molde se gelifica más rápido que la resina en el centro, esta presencia de resina curada en la superficie del compuesto dificulta la transferencia de presión interna a la superficie del compuesto. Por lo tanto, la presión real ejercida sobre la pared del molde, es menor que el valor estimado; teniendo en cuenta este efecto, se realiza una corrección en la distribución de la presión sobre la pared del molde a través de la Ecuación (14), donde α_s es el grado de conversión en la superficie del material compuesto, P_s es la presión en la superficie del material compuesto y k_{shield} es una constante determinada empíricamente (Larock et al., 1989).

$$P_s(z) = (1 - k_{shield} \alpha_s) P(z) \quad (14)$$

Antes del punto de gel, la resina todavía está en estado líquido, se genera una fuerza de fricción a partir del esfuerzo de corte de la fina capa de resina entre el material compuesto y el molde. Esta fuerza de corte de la capa de resina se puede describir como flujo de Couette (Khan & Methven, 2010). El esfuerzo de corte en la pared del molde está dado por la Ecuación (15), donde y^+ es la coordenada medida desde la pared del molde y δ es el espesor de la capa de resina (ver Figura 7). El espesor de la capa de resina se puede estimar a partir de la Ecuación (16).

$$\tau_{shear} = \eta \frac{\partial u}{\partial y^+} = \eta \frac{V}{\delta} \quad (15)$$

$$\delta = D_f \left[\sqrt{\frac{\pi}{2v_f\sqrt{3}}} - 1 \right] \quad (16)$$

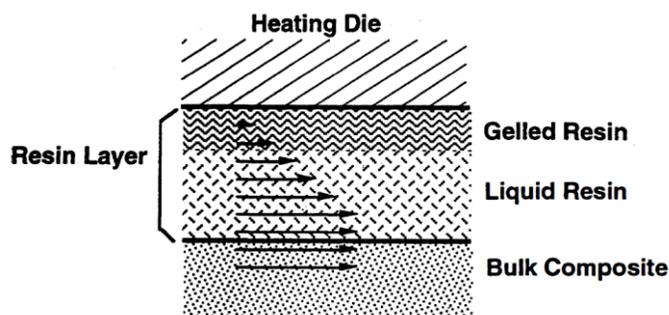


Figura 7. Capa de resina próxima a la pared del molde.

La Ecuación (15) se basa en la hipótesis de que la viscosidad de la resina dentro de la capa de resina es uniforme en todo el espesor y es idéntica a la viscosidad de la resina en la superficie del material compuesto. Bajo este supuesto, se sabe que la contribución de este esfuerzo de corte a la fuerza de tracción total es muy pequeña; sin embargo, se considera que la viscosidad se vuelve no uniforme dentro de la capa de resina debido a la falta de uniformidad en el curado. Por lo tanto, se sugiere un modelo para tener en cuenta el curado no uniforme dentro de la capa de resina. La velocidad de la resina no es uniforme, La resina cerca de la superficie del material compuesto se mueve a la misma velocidad que el material compuesto, mientras que la velocidad de la resina en la pared del molde es cero como se ilustra en la Figura 7. Debido a que la resina cercana a la pared del molde se mueve más lenta que en el material compuesto, permanece más tiempo dentro del molde que el material compuesto.

El grado de conversión de la resina cerca de la pared del molde aumenta y gelifica mucho más rápido que el material compuesto adyacente. Por lo tanto, la fricción de Coulomb tiene lugar antes que el material compuesto. Así, dentro de la capa de resina, existe fricción de Coulomb seca, así como el esfuerzo de corte de la resina líquida. La fuerza de corte de la resina líquida es mucho menor que la fricción de Coulomb seca, por ende, se supone que la fuerza de resistencia en la capa de resina se debe en su totalidad a la fricción de Coulomb entre la resina curada y la pared del molde. Se supone que la cantidad de fricción de Coulomb en la capa de resina es directamente proporcional a la fracción en volumen de la resina que alcanzó el punto de gelificación, a través de la Ecuación (17), donde λ es la fracción en volumen de resina que alcanzó el punto de gel, f es el coeficiente de fricción y $P_s(z)$ es la presión sobre la pared del molde dada por la Ecuación (14).

$$\tau_r(z) = \lambda f P_s(z) \quad (17)$$

Dado que la capa de resina suele ser fina, se puede considerar que la temperatura de la capa de resina es la misma que la de la pared del molde (Joshi & Lam, 2006). Como la distribución de la velocidad dentro de la capa de resina es lineal, el tiempo de permanencia de la resina dentro del molde de calentamiento en una ubicación a lo largo del eje “z” puede ser determinado por la Ecuación (19).

$$u = V \frac{y^+}{\delta} \quad (18)$$

$$t = \frac{z}{u} = \frac{\delta}{V} \frac{z}{y^+} \quad (19)$$

Una vez que se conoce el tiempo de permanencia, se pueden integrar las ecuaciones (5) y (6) para obtener el grado de conversión y la fracción en volumen de la resina que alcanzó el punto de gel. Se observa que $\lambda = 1$ cuando el material compuesto gelifica. Por lo tanto, después del punto de gel la Ecuación (17) simplemente representa la fricción de Coulomb, y el esfuerzo de corte por fricción en la superficie del compuesto se puede calcular a partir de dicha ecuación hasta el punto de desprendimiento (Kim et al., 1997). Con base en los argumentos anteriores, la fuerza de tracción total se puede calcular integrando τ a largo del eje del molde de calentamiento como se observa en la Ecuación (20).

$$F = \int_0^{L_t} \tau_b dz + \int_{L_t}^{L_b} \tau_r dz \quad (20)$$

Validación experimental

Se realizaron diferentes pruebas empíricas para determinar los valores de las constantes en el modelo y verificar la validez del mismo (Moschiar et al., 1996). El sistema para realizar los experimentos consistió de un molde de calentamiento de 60 cm de longitud y se calefaccionó a través de calefactores eléctricos (Mackin & Saha, 2022).

Se colocó el molde sobre un riel deslizante y se midió la fuerza de tracción ejercida con una celda de carga (ver Figura 2). Aunque la temperatura de la pared del molde se fijó en un valor específico nominal, hubo una variación de la temperatura de la pared del molde a lo largo del eje “z”. Por lo tanto, se controló la temperatura de la pared a lo largo del eje en 7 ubicaciones diferentes, esta distribución de temperatura se utilizó en los cálculos numéricos como la temperatura de la pared (Costa Dias et al., 2018).

La temperatura dentro del material compuesto se midió utilizando termocuplas (tipo K, 0.006 in de diámetro) embebida en el material compuesto, identificando las ubicaciones respectivas. La velocidad de tracción se mantuvo en valores predeterminados; las formas de las secciones de los moldes de calentamiento para los experimentos fueron circulares (6 mm de diámetro) y rectangulares (6 mm x 12 mm) como se muestra en la Figura 6. Para los experimentos se utilizaron dos sistemas de resina diferentes (epoxi y viniléster). La temperatura preestablecida del molde de calentamiento para la resina epoxi fue de 170 °C y 190 °C, mientras para la resina viniléster se utilizó 160 °C (Baran et al., 2013).

La velocidad de tracción se varió de 0.16 m/min a 0.36 m/min para la resina epoxi y de 0.20 m/min a 0.47 m/min para la resina viniléster. Se utilizaron refuerzos de fibra de vidrio tipo E, la fracción en volumen de fibra fue de 55 % para el molde de calentamiento rectangular y de 50 % para el molde de calentamiento circular. Las constantes utilizadas en el modelo de la fuerza de tracción son las indicadas en la Tabla 4, las mismas que fueron determinadas por diferentes métodos (Bogner et al., 2000).

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

Tabla 4. Constantes para el modelo de la fuerza de tracción.

	Epoxi	Viniléster
$\alpha_v (m^3/m^3K)$	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
γ	0.01	0.05
k_{shield}	1.3	3.0
$k_b (1/Pa)$	8.87×10^{-10}	
f (coeficiente de fricción)	0.3	
K (constante de Kozeny)	0.5	
$D_f (m)$	1.5×10^{-3}	

Validación numérica

Para la resolución de las ecuaciones, se utilizaron cálculos numéricos utilizando la técnica de elementos finitos (Safonov et al., 2016). Todos los cálculos fueron realizados por pasos, e iterativamente se llegaron a los resultados a través de las diferentes ecuaciones planteadas en los diferentes modelos. Una vez que se conocen las distribuciones de temperatura, grado de conversión y viscosidad a lo largo del eje del molde, se estimó la fuerza de tracción; suponiendo que el punto de gelificación de la resina era el punto en el que la viscosidad de la resina alcanzaba una viscosidad mucho mayor que la de la resina original, se supuso que la viscosidad en el punto de gel era de 100 Pa s, ya que la viscosidad original de la resina era de aproximadamente 0.1 Pa s (Dias et al., 2016).

Resultados y discusión

Las distribuciones de temperaturas calculadas y experimentales dentro del material compuesto se comparan en las Figuras 8 y 9. A medida que la fibra impregnada con resina entra en el molde de calentamiento, la temperatura comienza a subir desde el área en contacto con la pared del molde; el calor liberado en el molde por una reacción química exotérmica eleva la temperatura interior y acelera la reacción química y la temperatura interior aumenta aún más después de cierto punto, la temperatura central excede la temperatura de la superficie.

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

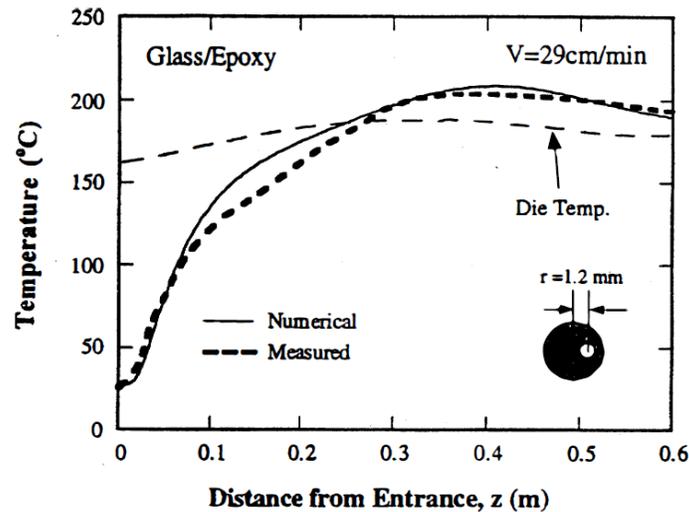


Figura 8. Cambios de temperatura a lo largo de la longitud del molde en la ubicación de la termocupla (resina epoxy). La ubicación radial de la termocupla se desvió del centro en 1.2 mm. La temperatura nominal del molde fue de 170 °C y la velocidad de tracción de 29 cm/min.

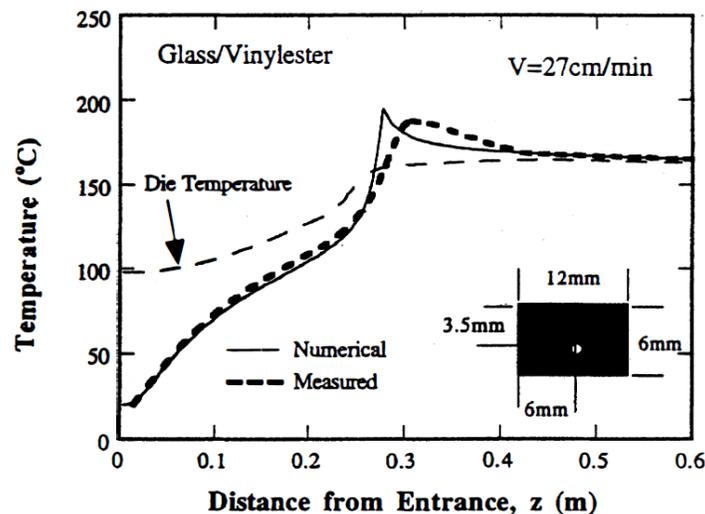


Figura 9. Cambios de temperatura a lo largo de la longitud del molde en la ubicación de la termocupla (resina viniléster). La ubicación vertical de la termocupla se desvió del centro en 3.5 mm. La temperatura nominal del molde fue de 150 °C y la velocidad de tracción de 27 cm/min.

Las distribuciones del grado de conversión calculado se muestran en las Figuras 10 y 11. Se observa que la reacción de curado de la resina viniléster es mucho más rápida que la de la resina epoxy con los valores de velocidad de tracción de 29 cm/min y 27 cm/min respectivamente.

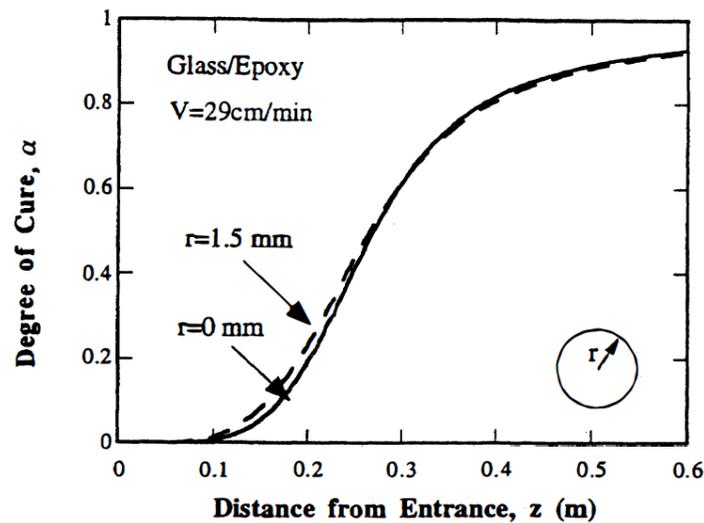


Figura 10. Distribución del grado de conversión en dos posiciones radiales ($r = 0$ mm y 1.5 mm) a lo largo de la longitud del molde circular. Resultados numéricos para la resina epoxi. La velocidad de tracción fue de 29 cm/min.

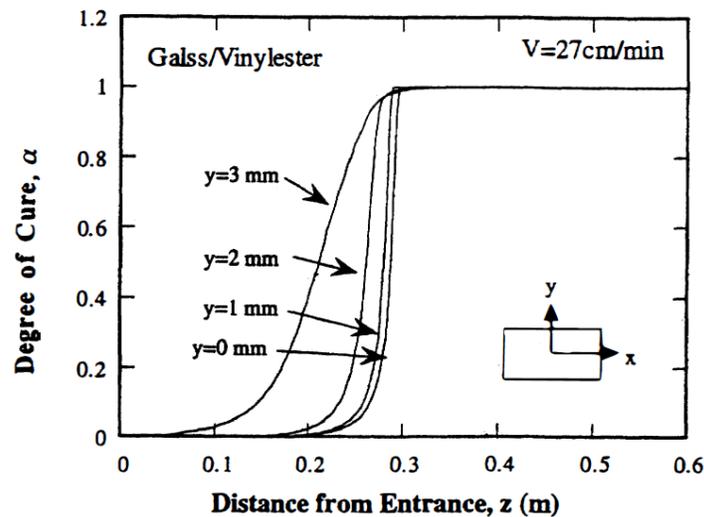


Figura 11. Distribución del grado de conversión a lo largo de la longitud del molde rectangular, en cuatro localizaciones diferentes ($y = 0, 1, 2, 3$ mm). Resultados numéricos para la resina viniléster. La velocidad de tracción fue de 27 cm/min.

Las fuerzas de tracción calculadas para diferentes velocidades de tracción y diferentes temperaturas nominales del molde se muestran en las Figuras 12 y 13. Los resultados numéricos se comparan con

Modelo analítico para el proceso de fabricación de pultrusión de materiales compuestos con matriz termoestable

los datos obtenidos mediante experimentos. Como puede verse en las figuras, la disminución de la velocidad de tracción y el aumento de la temperatura del molde reducen la fuerza de tracción.

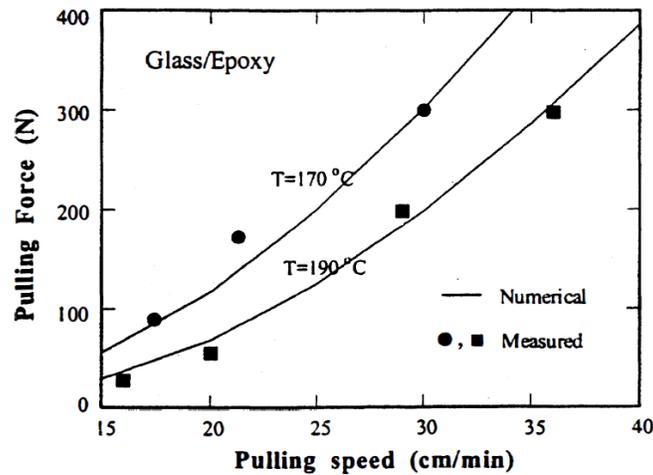


Figura 12. Fuerzas de tracción en función de la velocidad de tracción para dos temperaturas diferentes del molde. Comparación entre los resultados medidos y numéricos para el molde circular con resina epoxi.

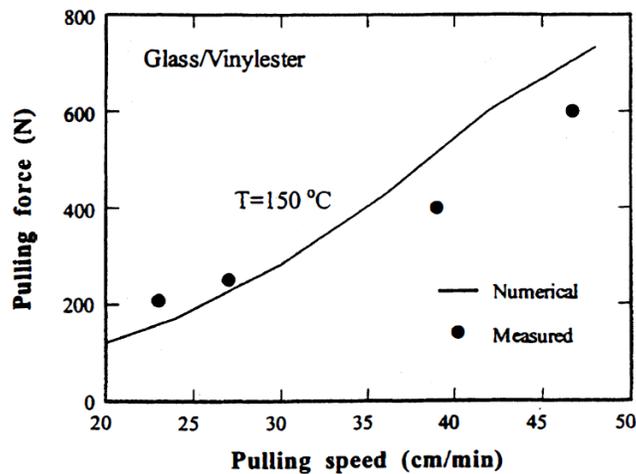


Figura 13. Fuerza de tracción en función de la velocidad de tracción para la temperatura del molde. Comparación entre los resultados medidos y numéricos para un molde rectangular con resina viniléster.

La estrecha concordancia entre los resultados del modelo y los datos experimentales generan confianza en la validez del modelo. Los modelos desarrollados, por lo tanto, deberían ser adecuados para optimizar las variables del proceso de pultrusión, como son, la temperatura de la pared del molde y la velocidad de tracción. Con todo lo expuesto se evidencia la importancia que tienen los

fenómenos de transferencia aplicados a los materiales compuestos, para mejorar los procesos de fabricación y conocer los modos de respuesta de diferentes sistemas para optimizar las variables de los procesos.

Referencias

1. Baran, I. (2015a). Advances in Composites Manufacturing and Process Design. In *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*.
2. Baran, I. (2015b). Pultrusion processes for composite manufacture. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, 379–414. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-307-2.00016-6>
3. Baran, I., Tutum, C. C., & Hattel, J. H. (2013). Optimization of the thermosetting pultrusion process by using hybrid and mixed integer genetic algorithms. *Applied Composite Materials*, 20(4). <https://doi.org/10.1007/s10443-012-9278-3>
4. Bogner, B. R., Breitigam, W. v., Woodward, M., & Forsdyke, K. L. (2000). Thermoset resins for pultrusion. In *Pultrusion for Engineers*. <https://doi.org/10.1533/9781855738881.97>
5. Costa Dias, R. de C., Santos, L. de S., Ouzia, H., & Schledjewski, R. (2018). Improving degree of cure in pultrusion process by optimizing die-temperature. *Materials Today Communications*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.017>
6. Dias, R. C. C., Santos, L. S., & Schledjewski, R. (2016). Improved cure simulation in pultrusion process about heating systems: A case study. *ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials*.
7. Joshi, S. C., & Lam, Y. C. (2006). Integrated approach for modelling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.01.003>
8. Joshi, S. C., Lam, Y. C., & Win Tun, U. (2003). Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(12). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.08.003>

9. Khan, W. A., & Methven, J. (2010). Determination of the duty cycle in thermoset pultrusion. Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, 2010-January. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-432-6_17
10. Kim, D. H., Han, P. G., Jin, G. H., & Lee, W. il. (1997). A model for thermosetting composite pultrusion process. Journal of Composite Materials, 31(20). <https://doi.org/10.1177/002199839703102005>
11. Koubaa, S., le Corre, S., & Burtin, C. (2013). Thermoplastic pultrusion process: Modeling and optimal conditions for fibers impregnation. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 32(17). <https://doi.org/10.1177/0731684413489851>
12. Larock, J. A., Hahn, H. T., & Evans, D. J. (1989). Pultrusion Processes for Thermoplastic Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2(3). <https://doi.org/10.1177/089270578900200304>
13. Mackin, C. D., & Saha, G. C. (2022). Design, pultrusion manufacturing, characterization, and reliability testing of a novel PMMA-based glass FRP composite material. Transportation Engineering, 8. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100108>
14. Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., & Akhatov, I. (2021). Thermoplastic pultrusion: A review. In Polymers (Vol. 13, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/polym13020180>
15. Moschiar, S. M., Reboredo, M. M., Kenny, J. M., & Vázquez, A. (1996). Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibers. Polymer Composites, 17(3). <https://doi.org/10.1002/pc.10636>
16. Novo, P. J., Silva, J. F., Nunes, J. P., & Marques, A. T. (2015). Advances in thermoplastic pultruded composites. ICCM International Conferences on Composite Materials, 2015-July.
17. Safonov, A. A., Saratov, A. A., & Ushakov, A. E. (2016). Numerical optimization and sensitivity analysis of pultrusion process parameters. ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials.
18. Summerscales, J. (2016). Composites manufacturing for marine structures. In Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-250-1.00002-8>

19. Volk, M., Wong, J., Arreguin, S., & Ermanni, P. (2021). Pultrusion of large thermoplastic composite profiles up to \varnothing 40 mm from glass-fibre/PET commingled yarns. *Composites Part B: Engineering*, 227. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109339>

©2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).