

## **Agradecimientos**

Primeramente y antes de desarrollar un resumen sobre el trabajo desarrollado me gustaría nombrar y mostrar mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible que este trabajo se llevase a cabo.

En primer lugar me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a Don José Manuel Torralba Castello por ofrecerme la oportunidad de haber realizado mi proyecto fin de carrera en Delft. En segundo lugar me gustaría nombrar a Doña Irene Fernández Villegas, por haberme dado la oportunidad de haber trabajado en el departamento DPCS de la facultad de ingeniería aeroespacial en la universidad técnica de Delft.

Además, quiero agradecer a Jordy M. Balvers su trabajo como tutor. Gracias a su tiempo, ayuda, consejos y esfuerzo he conseguido mi objetivo. Sin ellos, esto no hubiera sido posible.

Me gustaría agradecer también a Don Adriaan Beukers, director del departamento de diseño y producción de estructuras de material compuesto, la oportunidad de trabajar en su equipo.

También me gustaría mencionar al personal de laboratorio y a Lisette Volmer, agradeciendo enormemente su tiempo y dedicación.

Finalmente, me gustaría nombrar de forma general a todas las personas con las que compartí mi estancia en Delft, vosotros también me habeis ayudado, gracias de nuevo a todos.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
1.1	Objetivos.....	4
<b>2</b>	<b>Revisión de la literatura especializada.....</b>	<b>4</b>
2.1	Trabajo experimental.....	5
2.2	Simulación del curado.....	5
2.3	Parámetros de los materiales.....	6
2.4	Optimización del proceso.....	7
<b>3</b>	<b>Modelo de curado.....</b>	<b>7</b>
3.1	Propuestas de modelo.....	7
3.2	Modelo para COMSOL Multiphysics.....	8
<b>4</b>	<b>Trabajo experimental.....</b>	<b>9</b>
4.1	Preparación del molde.....	9
4.2	Disposición de la fibra de vidrio y los termopares.....	9
4.3	Procedimiento.....	10
4.4	Cálculo de la densidad y las fracciones de volumen.....	10
<b>5</b>	<b>Simulación y resultados.....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Modelización y resultados.....</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones. Análisis de resultados.....</b>	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Trabajo futuro.....</b>	<b>13</b>

# 1 Introducción

La fabricación de composites de pared gruesa tiene diversos problemas asociados a la reacción exotérmica de la resina. Este fenómeno genera no sólo estrés interno, sino importantes defectos estructurales. Lo cual lleva a focalizar esfuerzos en la mejora del entendimiento de los fenómenos que suceden durante el proceso de fabricación de estructuras de pared gruesa.

El ciclo de curado recomendado por los fabricantes produce elevados picos de temperatura y gradientes de temperatura que son perjudiciales para el resultado final. Ambos fenómenos afectan a la integridad estructural, por tanto es necesaria una optimización del ciclo de curado.

Con el fin de mejorar la calidad de los composites gruesos, las temperaturas a lo largo del proceso de fabricación deben ser controladas con el fin de minimizar los gradientes de temperatura, lo cual significa que la temperatura alcanzada por el molde en la fabricación de gruesos debe ser más baja que en la de finos.

Durante el proceso de fabricación, las fibras no se ven afectadas notablemente, pero la resina puede encoger durante el proceso de curado, llegando a reducir su volumen en un 9%.

Así, la existencia de diferentes comportamientos térmicos provocan estrés residual en la placa, los cuales pueden generar efectos considerablemente negativos para la calidad final de la pieza y como consecuencia, para sus propiedades mecánicas. Así mismo, fenómenos como deformaciones, inicios de fisura o delaminaciones pueden aparecer en la pieza final.

En el proceso de fabricación de composites de pared gruesa mediante proceso RTM (Resin Transfer Moulding), los tres parámetros clave son:

- time de curado
- temperatura de curado
- presión

Una correcta elección de cada uno de estos parámetros tendrá como resultado un material con un grado de curado óptimo y de alta calidad.

Las resinas termoendurecibles son polimerizadas mediante la aplicación de presión y temperatura durante un periodo de tiempo estimado. La razón de la aplicación de presión durante el periodo de curado de la resina es que el exceso de resina en el molde debe ser extraído.

Como puede leerse en la documentación técnica referente a este proceso, existen en la actualidad pocos trabajos de investigación enfocados al uso del proceso RTM en la industria para composites gruesos. Actualmente, este proceso de fabricación tiene una notable aplicación de la industria de la automoción y la aeronáutica.

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es avanzar en el conocimiento de los fenómenos que suceden durante el proceso de fabricación de piezas de material compuesto gruesos mediante RTM.

Uno de los objetivos a alcanzar es la obtención de los valores de conductividad térmica del composite, teniendo en cuenta todos los fenómenos y parámetros que afectan a la variación de dicho valor.

La utilización de valores termofísicos correctos es necesario para la obtención de buenos resultados, tanto de la resina como de la fibra de vidrio. Por tanto, es objeto de estudio en este trabajo.

En el laboratorio se han llevado a cabo varios experimentos RTM con el fin de obtener valores de temperatura a lo largo de todo el proceso y poder realizar cálculos de fracciones de volumen (MVF, FVF). Todo el trabajo de laboratorio se focaliza en la realización de experimentos RTM, a la solución de problemas y eventualidades generados durante estos y al avance en la mejora de los resultados. Los datos generados durante dichos experimentos han sido procesados mediante el software de cálculo MATLAB. Dicho software será utilizado también para la realización de las simulaciones del curado.

Además, con el fin de estudiar el comportamiento de la pieza durante el proceso de fabricación, la herramienta software COMSOL Multiphysics será utilizada junto a MATLAB con el fin de modelizar piezas en diferentes dimensiones y estudiar fenómenos como el efecto de borde, picos de temperatura y tiempos de proceso.

## 2 Revisión de la literatura especializada

En este apartado se reflejan las diferentes características de otros estudios llevados a cabo en el pasado en otros programas de investigación. Artículos en revistas especializadas, actas de congresos y webs especializadas han sido fuente de conocimiento.

El estudio de publicaciones especializadas ha sido necesario para entender el trabajo experimental llevado a cabo en otras investigaciones y para obtener las directrices de trabajo necesarias. También, en referencia al trabajo de optimización, el uso de documentación especializada es fuente de conocimiento.

Por tanto, existen tres objetivos diferentes en cuanto a la obtención de conocimientos:

- trabajo experimental
- simulación
- optimización

## 2.1 Trabajo experimental

A lo largo de toda las publicaciones estudiadas se pueden ver diferentes configuraciones implementadas en el laboratorio y el tipo de materiales utilizados dependiendo del experimento.

En Fig. 2 puede verse la configuración de las diferentes capas utilizadas en un proceso para composites termoendurecibles. Con la ayuda de un autoclave, y la configuración correcta, se puede realizar el experimento satisfactoriamente.

En referencia a la instalación de los sensores de temperatura, las Fig. 3 y 4 muestran un tipo de configuración. La Fig.6 muestra una configuración muy extendida en procesos enfocados al cálculo del grado de curado del material, a su maximización, y a la optimización del proceso.

Las características fundamentales de una configuración para experimentos de laboratorio son las siguientes:

- bajo coste
- bajas emisiones de partículas volátiles
- flexibilidad en el proceso
- desarrollo potencial

## 2.2 Simulación del curado

RTM es un proceso de bajo coste de fabricación para la fabricación de composites de alto rendimiento. La etapa de curado del composite está caracterizada por la reacción exotérmica de curado activada por la transmisión de calor por conducción desde las paredes del molde. Durante este proceso, la resina en estado líquido libera la energía en forma de calor.

Investigadores como Bogetti, Gillespie, Loss o Springer presentaron en 1982 y 1983 modelos de simulación de curado para composites termoendurecibles con el fin de predecir temperaturas y grados de curado durante el experimento. Dichos modelos han sido evolucionados hasta nuestros días, y ahora son capaces de ofrecer información sobre temperatura, presión, grado de curado de la resina y su viscosidad.

El modelo para el curado de la resina puede estar basado en una ecuación o en dos. Para el caso de una ecuación, se debe tener en cuenta la restricción de que las propiedades termofísicas de la resina y del composite son consideradas independientes del grado de curación. La transferencia de calor está gobernada por la siguiente ecuación:

$$\rho_c C_{p_c} = \frac{\partial}{\partial x x} (K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}) - \rho_r V_r H_R \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

**Ecuación 4**

Para el modelo compuesto por dos ecuaciones, la primera describe el balance de energía, incluyendo el término correspondiente a la transferencia de calor por conducción y la contribución energética referente a la reacción del curado de la resina:

$$\rho_c C p_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = k_{zc} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} + \rho_r H_r (1 - V_f) \dot{\alpha}$$

**Ecuación 1**

Donde:

$H_r$  = calor generado durante la reacción de curado

$\dot{\alpha}$  = grado de reacción

$V_f$  = fracción de volumen de fibra en el material compuesto

$\rho$  = densidad

$Cp$  = calor específico

$k$  = conductividad térmica

La segunda ecuación del modelo está relacionada con modelo cinético de la resina y describe el grado de curación de la misma. Es función del tiempo y de la temperatura:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{k_{zc}}{\rho_c C p_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} + \frac{\rho_r H_r (1 - V_f)}{\rho_c C p_c}$$

**Ecuación 2**

$$\dot{\alpha} = f(\alpha, t, T)$$

**Ecuación 3**

## 2.3 Parámetros de los materiales

Existen diferentes modelos de ecuaciones para el cálculo de los diferentes parámetros termofísicos de la fibra de vidrio y la resina.

Estos valores pueden obtenerse mediante cálculos facilitados por el fabricante, pero estos parámetros están relacionados con la temperatura, es decir, con el estado de la resina. El procedimiento de trabajo utilizado consiste en iniciar los cálculos con valores fijos aproximados (ayudándose de cálculos realizados en otros trabajos de investigación) para luego obtener valores por uno mismo procedentes de dichos cálculos.

A lo largo del punto 2.2.2 pueden verse los diferentes modelos sacados del estudio de la documentación especializada. A título informativo, a continuación se exponen los modelos simples no dependientes de variables desconocidas a priori como la porosidad.

$$Cp = C p_f F V F + C p_m M V F$$

**Ecuación 5**

$$\rho_c = \rho_f F V F + \rho_m M V F$$

**Ecuación 6**

## **2.4 Optimización del proceso**

La optimización del proceso de fabricación de materiales compuestos gruesos es un objetivo futuro. Esto consiste en obtener las características óptimas para dicho proceso. Aspectos y parámetros tales como los gradientes de temperatura, el grado de conversión final o la duración del proceso completo, serían objetos principales del proceso de optimización. Con el fin de conseguir estos objetivos, diversas metodologías han sido llevadas a cabo en diferentes proyectos de investigación.

Los parámetros fundamentales que son susceptibles de ser optimizados son los siguientes:

- minimización de los gradientes de temperatura que aparecen durante el proceso de fabricación
- predicción de los picos de temperatura a lo largo del proceso, en cuanto a tiempo e intensidad
- reducción de los picos de temperatura
- reducción de defectos en la pieza final como delaminación o deformaciones

Las diferentes rutinas implementadas se explican con detalle en el punto 2.3 de la memoria del trabajo.

## **3 Modelo de curado**

### **3.1 Propuestas de modelo**

La utilización del modelo corresponde a la necesidad de comparar los resultados experimentales y los generados durante la simulación. Los datos obtenidos como resultado del trabajo experimental son comparados con la solución generada por la aplicación del modelo.

Como puede verse en el punto 4.1 hay 4 modelos utilizados por TUD (TU Delft) y NRC (National Research Council of Canada), de los cuales se obtienen 4 gráficas diferentes:

- gráfica 1: Fracción del grado de conversión VS tiempo
- gráfica 2: Temperatura instantánea del punto de transición a vitrificación VS tiempo
- gráfica 3: Temperatura instantánea del punto de transición a vitrificación VS Fracción del grado de conversión
- gráfica 4: Fracción del grado de conversión modificado VS tiempo

La tercera figura (Fig. 26) es una combinación de la temperatura instantánea del punto de transición a vitrificación VS fracción del grado de conversión. Además pueden verse los resultados obtenidos con la ecuación de diBenedetto:

$$T_g = T_{g,0} + \frac{(T_{g,\infty} - T_{g,0})}{1 - (1 - \lambda)\alpha}$$

**Ecuación 41**

La explicación detallada de cada modelo aparece en el punto 4.1 de la memoria del trabajo.

### 3.2 Modelo para COMSOL Multiphysics

Para llevar a cabo la modelización utilizando la herramienta COMSOL Multiphysics, se utilizó un modelo de 2 ecuaciones que se indican a continuación. La primera es la ecuación de transferencia de calor por conducción en transitorio, dependiente del tiempo:

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(K \nabla T) = Q + h_{trans} (T_{ext} - T) + C_{trans} (T_{ambtrans}^4 - T^4)$$

**Ecuación 53**

Donde:

$\delta_{ts}$  = Coeficiente de tiempo

$K$  = Conductividad térmica

$\rho$  = Densidad

$C_p$  = Capacidad específica a presión constante

$Q$  = Fuente de calor

$h_{trans}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección

$T_{ext}$  = Temperatura en el exterior del molde

$C_{trans}$  = Constante

$T_{ambtrans}$  = Temperatura ambiente

La otra ecuación es una ecuación en derivadas parciales, es un modelo que utiliza una o más ecuaciones en derivadas parciales dependientes del tiempo. Los coeficientes que aparecen corresponden con la masa, difusión y absorción:

$$e_a \partial^2 u / \partial t^2 + d_a \partial u / \partial t + \nabla(-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + a u + \beta \nabla u = f$$

**Ecuación 56**

Donde:

$c$  = Coeficiente de difusión

$a$  = Coeficiente de absorción

$f$  = Fuente

$e_a$  = Coeficiente de masamass coefficient

$d_a$  = Coeficiente de masa de amortiguamiento



$\alpha$  = Coeficiente de convección de flujo conservativo

$\beta$  = Coeficiente de convección

$\gamma$  = Periodo de fuente de flujo conservativo

Y  $d_a$  se iguala a 1 mientras que el resto de valores son 0. La fuente está relacionada con la ecuación del modelo de curado.

## 4 Trabajo experimental

La parte experimental del trabajo fue llevada a cabo en el laboratorio, y está enfocada en la realización de experimentos RTM con el fin de obtener datos para su posterior procesado.

Las herramientas utilizadas en el laboratorio son las siguientes:

- molde (parte superior, parte inferior, y placas intermedias para los diferentes grosores)
- unidad de calentamiento del molde
- unidad de inyección de la resina
- sistema de adquisición de datos de temperatura

La resina utilizada en los experimentos es una resina termoendurecible RTM6 monocomponente epoxi/amina suministrado por Hexcel Composites. Ha sido desarrollada específicamente para cubrir los requerimientos de la industria aeroespacial en procesos RTM avanzados.

El punto 3 desarrolla una amplia explicación de esta parte del trabajo.

### 4.1 Preparación del molde

La preparación del molde antes de cada experimento es una parte fundamental, por tanto el tratamiento superficial llevado a cabo para la preparación del molde debe ser seguido paso a paso, con el fin de tener una superficie óptima para la inyección de la resina y conseguir un vacío sin pérdidas en la cavidad del molde. El manual de trabajo del laboratorio explica detalladamente los pasos a seguir.

### 4.2 Disposición de la fibra de vidrio y los termopares

Los sensores de temperatura realizan la adquisición de datos de temperaturas en el punto donde han sido instalados, y realización una medición cada 5 segundos. Se instalan 10 termopares en cada experimento, de los cuales 5 pertenecen a cada uno de los puntos de medida. En cada punto de medida, se toman datos de temperatura en todo el grosor de la placa. La Fig. 24 indica el emplazamiento de los sensores de temperatura.

### **4.3 Procedimiento**

Al igual que para la preparación del molde, la explicación detallada del procedimiento a seguir para la inyección de la resina, puede encontrarse en el manual de trabajo de laboratorio.

En resumen, la inyección de la resina en el molde se hace después de la instalación de las láminas de fibra de vidrio y los sensores de temperatura, del cerrado del molde y creación del vacío en la cavidad interna y su posterior calentamiento.

Este procedimiento se divide en 4 fases diferentes:

- calentamiento del molde
- inyección de la resina
- curado de la resina
- enfriamiento del molde

Durante todo el proceso, la adquisición de datos es continua y dura hasta el final del mismo.

### **4.4 Cálculo de la densidad y las fracciones de volumen**

El cálculo de estos valores acontece tras la fase de fabricación de la placa. Se toman una serie de zonas representativas de la placa donde aparecen diferentes fenómenos, tales como delaminación, puntos secos o zonas con visible diferencia de densidad.

Se toman diferenciales de masa de cada zona y se hacen los cálculos de peso y volumen del material compuesto primero, y tras su quemado en el horno de la fibra únicamente. Mediante este proceso y las ecuaciones obtenidas del estándar del procedimiento de cálculo, podemos obtener los valores de fracción de volumen. Ver table 1.

## **5 Simulación y resultados**

En este punto se procede a la simulación con el fin de obtener los valores de difusividad térmica y posteriormente de conductividad térmica para cada uno de los experimentos llevados a cabo en el trabajo experimental de laboratorio.

Como se explica en la memoria del trabajo, a través de las ecuaciones de difusividad térmica (Ecuación 60) y una serie de restricciones para el inicio de los cálculos, se obtienen valores de difusividad térmica para el error cuadrático mínimo. Esto es, para la mínima diferencia de temperaturas entre la solución dada por el modelo y la solución obtenida en el laboratorio.

Con los valores obtenidos de difusividad, es posible obtener un cálculo acertado del valor de conductividad térmica del composite. Éste, a su vez, será estudiado por otro programa que genera el valor de K óptimo y cuyo error es mínimo.

Los resultados obtenidos se presentan analizados en los puntos 5.2 y 5.3 de la memoria del trabajo, y el resto del análisis como continuación en el apéndice 1 y 2.

## **6 Modelización y resultados**

La modelización consiste en la creación de modelos de cálculo en el entorno ofrecido por la herramienta COMSOL Multiphysics. Así, es posible simular el proceso de curado del composite en un experimento RTM.

Los modelos implementados son de una, dos y tres dimensiones. Para una dimensión, es posible implementar el grosor de una placa pero de longitud infinita. Con ello, podemos obtener la distribución de temperaturas a lo largo de todo el experimento en todo el grosor de la placa. Esta modelización es útil pues el comportamiento ofrecido por la placa puede ser extrapolado a modelizaciones posteriores. Ver punto 4.1.

A su vez, se ha analizado la influencia en la solución final de diferentes factores correspondientes al proceso de fabricación y a las características del material. Se han introducido cambios en la fracción de volumen de resina que afectan a la temperatura de pico registrada durante la reacción exotérmica y al momento en el cual dicha temperatura es alcanzada. Además, se ha estudiado la influencia del grosor de la placa a fabricar, el cual también afecta directamente a la temperatura de pico.

Para la segunda dimensión, es posible modelizar una placa con un grosor y un ancho específicos, pero de una longitud infinita. En esta segunda pieza, aparece el fenómeno de efecto de borde. Esto supone una diferenciación de la distribución de temperaturas a lo largo del ancho de la placa que afecta a la calidad final de la pieza. Este fenómeno se ha analizado para diferentes valores de grosor de la placa (ver punto 4.2.1).

Además, se ha introducido la curvatura en la modelización en dos dimensiones, estudiando así el aumento de temperatura durante la reacción de curado en relación al radio de curvatura presente en la placa. Además, se ha hecho un estudio de la variación del fenómeno de efecto de borde en placas curvas. Al ser esta infinita, se ha llevado a cabo una comparación de la distribución de temperaturas a lo largo del grosor de la placa entre la solución obtenida de la modelización en una dimensión y la modelización de placas curvas en dos dimensiones.

También, ha sido objeto de estudio la influencia del ciclo de curado en los valores máximos de temperatura durante la reacción de curado. Los elementos sometidos a variación han sido:

- pendientes en el perfil de temperaturas
- temperaturas de curado

Por último, se estudió la influencia de la variación del valor ratio que relaciona la conductividad térmica del composite longitudinal con la transversal. Donde puede verse pequeñas variaciones en el efecto de borde y la temperatura de pico.

Dentro de la modelización en dos dimensiones, merece un apartado especial en el análisis el estudio de estructuras en forma de T o tipo T. Este tipo de estructuras, presentes en innumerables aplicaciones en la industria, presentan ciertas peculiaridades. Las soluciones obtenidas muestran valores altos de temperatura en el centro de la T y unos mayores valores de efecto de borde que en placas planas de dos dimensiones.

Para el caso de la modelización en tres dimensiones, la pieza diseñada es una placa con un grosor y dimensiones finitas. El volumen de cálculo es muy grande, lo cual requiere un tiempo de computación muy extenso. Así, dicha placa se ha simplificado a 1/8 de su volumen para realizar la simulación (ver figura 82).

El fenómeno de efecto de borde ha sido estudiado con el fin de dimensionar las zona afectada por este fenómeno. Las figuras 84 y 86 muestran los valores para el eje X e Y respectivamente. Además, se hizo un estudio de este fenómeno en la diagonal, y se obtuvo un valor superior al registrado en los estudio del eje X e Y. Así, la figura 89 muestra la distribución del efecto de borde en una placa de 3 dimensiones vista desde arriba, donde puede verse la forma curva de esta distribución en la zona cercana a la esquina de placa.

## **7 Conclusiones. Análisis de resultados.**

La fabricación de piezas gruesas de material compuesto es un proceso complejo donde toman parte diferentes variables, las cuales deben ser tomadas en cuenta. El objetivo final es la fabricación de piezas con la más alta calidad, con la resina totalmente curada y valores homogéneos.

El trabajo experimental ha complementado al trabajo de procesado y simulación con el fin de obtener valores con los cuales poder seguir avanzando en el proyecto de investigación. Los valores obtenidos de conductividad térmica del material ofrecen soluciones óptimas entre resultados experimentales y resultados generados por la aplicación de modelos.

Debe tenerse el procedimiento utilizado, valores que se fijan durante el estudio de los fenómenos relacionados con el proceso de fabricación, en realidad sufren variaciones a lo largo del proceso de fabricación. Por eso, en cada simulación se realiza previamente un cálculo de cada una de las variables termofísicas de los componentes que toman parte en el experimento.

La resolución de los diferentes modelos a lo largo del trabajo arroja datos sobre el comportamiento de la placa durante el experimento RTM, donde una variación en la fracción de volumen de resina incrementa la temperatura de pico registrada durante la reacción exotérmica de curado. El aumento de grosor provoca incrementos en los picos de temperatura y en el tiempo que tarda en alcanzar dicha temperatura. Lo cual revierte en un aumento del tiempo de proceso de fabricación de la pieza.

En placas de dos dimensiones con una cierta curvatura, el aumento del radio de curvatura acerca a la placa a su solución plana y reduce así los valores máximos de temperatura. Así mismo, los valores de temperatura en la parte interna de la placa (cercana al radio interior) son superiores que los registrados en la modelización en una dimensión.

Las variaciones registradas en los valores máximos de temperatura debido a la variación de las pendientes en el perfil de temperaturas de los moldes son casi inapreciables y no presentan problema alguno.

El fenómeno de efecto de borde está presente y se ha dimensionado con el fin de obtener el conocimiento necesario para conocer su influencia en la calidad final de la pieza. Así mismo, en este caso el efecto de borde no se ve influenciado notablemente por esta variación.

Del mismo modo, las variaciones introducidas en el valor ratio que relaciona la conductividad térmica longitudinal con la transversal no generan grandes variaciones en la temperatura máxima. Esta aumenta si se reduce el valor de la conductividad térmica transversal. Se aprecia el mismo comportamiento en referencia al fenómeno de efecto de borde.

En la estructuras de tipo T, este fenómeno es más acusado. Además, se han registrado valores altos de temperatura en la zona central de la estructura. Esta distribución de temperaturas afecta a la calidad final de la pieza.

En las placas de tres dimensiones, aparece también efecto de borde. Se ha llevado a cabo un estudio en los ejes X e Y y se han obtenido idénticos resultados. El estudio en la diagonal de la placa refleja un aumento del efecto de borde, lo cual deriva en un fenómeno de distribución curva del efecto de borde en zonas cercanas a las esquinas de la placa.

## **8 Trabajo futuro**

El enfoque de los trabajos futuros debe enfocarse a la creación de rutinas de trabajo que optimicen el proceso de fabricación. Reducir el tiempo de proceso, maximizar el grado de curación y controlar los picos de temperatura relacionados con la reacción exotérmica.