



GOI ESKOLA
POLITEKNIKOA

ESCUELA
POLITÉCNICA
SUPERIOR

**Optimización del proceso de *Compression Resin Transfer
Moulding (CRTM)* mediante técnicas experimentales y
simulación**

MAIDER BASKARAN RAZKIN

Director de Tesis: Dr. D. Jon Aurrekoetxea Narvarte

Co-director de Tesis: Dr. D. Laurentzi Aretxabaleta Ramos

Tesis dirigida a la obtención del título de

Doctor por Mondragon Unibertsitatea

Departamento de Mecánica y Producción Industrial

Mondragon Unibertsitatea

Julio 2017

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro a través de este documento que esta tesis, y el trabajo presentado en ella con sus resultados han sido realizados totalmente por mí, en la Línea de Investigación Plásticos y Compuestos del Departamento de Mecánica y Producción Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea.

Maidar Baskaran Razkin
(Julio 2017)

Etxekoei.

Eskerrak

Lehenik eta behin Jon Aurrekoetxea, Laurentzi Aretxabaleta eta Mariasun Sarrionandiari, taldean hasi nintzenetik, euren gidaritza, lanaren garapeneko laguntzagatik eta barre algarentzat beti tartetxo bat gordetzarren. Eskerrik asko hiruroi.

Unibertsitatean egindako taldetxoari, pasatako momentu on guztiengatik, bai kafean, bazkarian, edo edonongo jaietan Leire, Estela, Ion, Iker, Naia, Imanol, Unai, Irupe, Julen eta Endikari.

Polimero eta materiale konposatuaren lerroko partaideei, jada Unibertsitateatik joan direnei, Joseba, Haritz, Cristian eta etorri berri direnei, Asier, Marta, Andrea eta Ivani. Bereziki Jon Lopezi, tailerreko orduak humore onaz betetzarren. Aitorri, motorren mundutik beti ekarpen xeble bat eukitzearren. Iñigori, mila diskusio ostean, beti esku bat botatzeko prest egotearren. Dokumentu honen zehar zuen lana dagoelako. Jaione eta Jonanderri, tesian zehar bizitako momentu eta hizketaldi guztiengatik, bai Arrasaten eta Arrasatetik kanpo. Eta azkenik, tesiko azken txanpan, Garaiako tailerrean emondako laguntza guztiarengatik Gorka Plata, Jokin Lozares eta Arkaitz Garateri.

Quisiera agradecer a Joaquim Vila por el trato recibido durante mi corta estancia en IMDEA. Fagor Arrasateri ere eskerrak eman, emandako laguntza guztiagatik, Jabi, Unai eta Estiri.

Nola ez, nire lagunei, Alaz, Enara, Itsaso, Olatz, Jatta, Maria Azpeitia eta besteei, tesiari buruz erakutsitako interesagatik eta batez ere bizitako momentu onengatik. Plazer bat da zuek bezalako lagunez inguraturik bizitzea.

Esker beroak Iratiri, egiten ditugun barre algara guztien parte izatearren eta tesiko ibilbide honetan, neri laguntzeko gogoak edukitzearren. Jokini, nire buru zoro hau egunero bideratu eta jasan beharra izatearren eta halere, ni primeran zaintzearren. Nire eguneroko irribarrearen oinarri zarete.

Eta azkenik, nire eskerrik beroenak, hazi, hezi eta printzipioz josi nautenei. Nire bizitzako erreferente zaretelako eta naizen guztia zuei zor dizuedalako, ama, aita eta aitxitxei.

Resumen

La protección del medioambiente, con especial énfasis en la reducción de las emisiones de CO₂, es una demanda creciente a la que tiene que responder la industria del transporte. Los polímeros reforzados de fibra de carbono (CFRP) son candidatos interesantes, ya que su uso puede permitir reducir el 70% del peso del vehículo y disipar cinco veces más energía de impacto que los metales. La industria del transporte ya se beneficia de los composites, sobre todo para aplicaciones de bajas prestaciones empleando composites reforzados con fibra discontinua. Sin embargo, su expansión a piezas más estructurales no es posible en parte por las limitaciones asociadas al proceso de fabricación. *Resin Transfer Moulding* (RTM) es un proceso bien establecido; sin embargo, presenta varias limitaciones, sobre todo cuando se pretenden fabricar piezas con elevados contenidos en fibra: El incremento del contenido en fibra disminuye la permeabilidad de la preforma, necesitando tiempos de llenado de molde más largos, generando problemas de impregnación y un elevado contenido de poros. Una de las alternativas más prometedoras es la combinación del RTM con la compresión, denominada CRTM (*Compression Resin Transfer Moulding*). En el CRTM, el molde se mantiene parcialmente abierto en la fase de inyección, generando un hueco no ocupado por las fibras que ejerce de camino preferente de flujo para la resina. Una vez inyectada la cantidad de resina requerida, se cierra el molde, forzando a la resina a impregnar la preforma hasta saturarla y obtener las 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.

Visto el alto potencial del CRTM, el objetivo de esta tesis es generar el conocimiento necesario para comprender el comportamiento del flujo en todas las fases del proceso, y así poder obtener piezas finales con bajo contenido en poros y poder diseñar las instalaciones de prensas, reduciendo los tiempos de desarrollo y costes de puesta a punto. Para desarrollar este proceso, es necesario utilizar una estrategia holística que abarque tanto las fases de inyección y de compresión, como el diseño del molde, la configuración de la prensa; Además se requiere de técnicas experimentales avanzadas para la caracterización de materiales, el control de parámetros de proceso y la monitorización del mismo. La investigación básica se realiza utilizando una placa plana, y por último, el conocimiento obtenido se aplica a una pieza real de automoción.

El trabajo realizado ha demostrado que la estrategia de inyección y compresión influyen en el comportamiento del flujo y en los requerimientos necesarios de la instalación. También se han determinado los parámetros más influyentes de la fase de inyección en el patrón de impregnación. Además, se propone un nuevo enfoque de estrategia de compresión, en el que se utilizan dos velocidades, que reduce los tiempos de ciclo y las fuerzas de cierre. Y por último, se propone un sistema de monitorizado de proceso mediante el que se ha demostrado que el coste de una pieza de automoción fabricada en CRTM es menor que en el RTM.

Laburpena

Ingurumenaren babesa, arreta berezia CO₂ isurien murriztapenean ipiniz, garraio industriak aurre egin beharreko beharra da. Arazo honen aurrean, karbono zuntzez indartutako polimeroak (CFRP) abantailak erakusten dituzte, ibilgailuen pisua 70% murriztera iritsi daitezkelako eta inpaktu baten aurrean metalak baino bost aldiz energia gehiago xurgatzen dutelako. Dagoeneko garraio industria konpositeen onuretz baliatzen da, batez ere, aplikazio ez estrukturalentzat (zuntz motza). Hala ere, pieza estrukturaletarako hedapena ez da posible izan prozesuen mugengatik. *Resin Transfer Moulding* (RTM) ondo ezarritako prozesu bat da, hala ere hainbat muga ditu, batez ere, zuntz portzentaje altuko piezak fabrikatu nahi direnean. Zuntz portzentaje altuak preformaren permeabilitatea murrizten du, betetze denborak luzatuz, inpregnazio arazoak sortuz eta poro maila handituz. Alternatiba itzaropentsuenetariko bat RTM-a konpresioarekin konbinatzea da, *Compression Resin Transfer Moulding* (CRTM) deitua. CRTM-ko injekzio fasean moldea partzialki irekia mantentzen da, zuntz gabekoz zona bat sortuaz, erretxina errazago ixurtzea ahalbideratzen duena. Beharrezko erretxina kantitatea injektatu ostean, moldea itxi egiten da, erretxinaz preforma bustitzera behartuz, saturatu eta amaierako dimentsioak lortuaz. Beraz, fluxuaren inpregnazio direkzioa planoan izatetik, lodieran izatera pasatzen da, fluxuaren luzeran magnitude murrizpena lortuz. Inpregnazio sekuentzia aldaketa hau CRTM-an inpregnazio denboran murrizpenaren arrazoia da.

CRTM-aren potentziala ikusiz, tesi honen helburua prozesuko fase guztietan fluxuaren portaeraren ezagutza lortzea da, poro gutxiko piezak lortzeko eta pentsen instalazioak diseinatzeko, ziklo denborak eta prestaketa kosteak murriztuz. Prozesu hau garatzeko, ikuspegi holistiko bat erabiltzea beharrezkoa da, bai injekzio eta konpresio estrategiak aztertzen dituenak, nola moldearen diseinua, prentsaren konfigurazioa eta teknika esperimental aurreratuak erabiltzen dituenak (materialen karakterizazioa, prozesuko parametroen eta fluxuaren jarraipen kontrola). Oinarrizko ikerketa, plaka lauaz egiten da, eta azkenik lortutako ezagutza automobilgintzako pieza erreal bati aplikatzen zaio.

Eginiko ikerketak, injekzio eta konpresio estrategiak fluxuaren portaeran eragina duela erakutsi du, baita instalazio-baldintzetan ere. Era berean, injekzio faseko inpregnazio patroian eragin gehien duten parametroak definitu dira. Horrez gain, konpresio strategi berri bat proposatzen da, non bi abiadura erabiltzen diren ziklo denbora eta itxiera indarrak murriztea ahalbidetzeko. Azkenik, prozesuko fluxuaren jarraipen-sistema bat proposatzen da, non automobilgintzako pieza erreal baten kostua estimatzen den, ikusiaz CRTM piezen kostua RTM-koa baino txikiagoa dela.

Abstract

The environmental protection, with special emphasis on CO₂ emissions reduction, is a growing demand that the transport industry has to fulfill. Carbon fibre reinforced polymers (CFRP) are interesting candidates as they can reduce 70% of the vehicle weight and can dissipate five times higher impact energies than metals. Composites are already employed in this industry, especially in low benefits application. However, its expansion to more structural parts is not possible in part due to process limitations. Resin Transfer Moulding (RTM) is a well-established processing method. Nevertheless, there are still some difficulties in fabricating high fibre volume parts. Increasing the fibre content, decreases the permeability of the preform, leading to a long filling time, incomplete impregnation and high void content. One of the most promising alternatives is to combine compression and Resin Transfer Moulding which is known as Compression Resin Transfer Moulding (CRTM). In CRTM, the mould is partially closed when resin injection begins, generating a small gap between the fibre surface and the mould wall, which facilitates further the resin flow. Once the required amount of resin penetrates into the gap, the inlet is closed and the mould platen moves down to close the mould and to squeeze the resin into the preform to achieve the desired volume fraction. Therefore, instead of the resin flowing through the planar directions as in RTM, in CRTM the preform is impregnated through the thickness direction. This means a reduction of several orders of magnitude as far as flow length is concerned. This modification in the impregnation sequence is the reason for the decrease in the filling time associated with the CRTM.

Considering the high potential of the CRTM, the objective of this thesis is to generate the necessary knowledge to understand the behaviour of the flow in all the phases of the process, in order to be able to design the press installations, obtaining low porosity parts and reducing the cycle time and the set-up costs. In order to develop this process, it has been necessary to use a holistic strategy that encompasses both injection and compression strategies, such as mould design and press configuration using advanced experimental techniques (material characterization, process parameter control and monitoring). Basic research is done using a flat plate, and finally, the knowledge obtained is applied to a real part of automotive.

This study has shown that the injection and compression strategies influence in the flow behaviour and in the requirements of the installation. The most influential parameters of the injection phase in the impregnation pattern are also determined. In addition, a new compression strategy approach is proposed

where two different compression velocities are used, that reduces the cycle times and closing forces. Finally, a process monitoring system is proposed, which has shown that the cost of an automotive part manufactured in CRTM is lower than in the RTM.

Índice

Eskerrak.....	i
Resumen.....	iii
Laburpena.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tablas.....	xix
Lista de símbolos.....	xxi
Lista de abreviaturas.....	xxiii
1 Introducción.....	25
1.1 Enmarque de la tesis.....	25
1.2 Estado del arte	30
1.2.1 Procesos de fabricación de moldeo por vía líquida (LCM).....	30
1.2.2 <i>Compression Resin Transfer Moulding</i> (CRTM).....	31
1.2.3 Técnicas de monitorizado de proceso.....	39
1.3 Estudio crítico del estado del arte.....	40
1.4 Objetivos	42
1.5 Organización de la memoria de la tesis.....	44
2 Caracterización de las materias primas	45
2.1 Caracterización de la resina.....	45

2.1.1	Cinética de curado	45
2.1.2	Reología.....	46
2.2	Selección de la temperatura de procesado del ligante.....	48
2.3	Caracterización de la preforma.....	50
2.3.1	Compresibilidad	50
2.3.2	Permeabilidad.....	58
2.4	Conclusiones	62
3	Fase de inyección	63
3.1	Descripción de los parámetros analizados.....	63
3.2	Modelo de simulación de la inyección de CRTM.....	65
3.3	Influencia de los parámetros de inyección	67
3.3.1	Estudio paramétrico.....	67
3.3.2	Patrón de impregnación.....	69
3.3.3	Validación del modelo de simulación	70
3.4	Conclusiones	73
4	Fase de compresión	75
4.1	Método experimental.....	75
4.2	Estrategias de compresión constantes: Control de velocidad vs. fuerza.....	78
4.2.1	Compresión con velocidad constante	80
4.2.2	Compresión con fuerza constante.....	81
4.2.3	Comparación de las estrategias de compresión constantes	83
4.2.4	Selección de la estrategia de compresión	87
4.3	Influencia de la distribución inicial de la resina.....	88
4.4	Estrategia de compresión a velocidad variable	92
4.5	RTM vs. CRTM sin hueco vs. CRTM con hueco.....	97
4.6	Conclusiones	100
5	Monitorizado del proceso	103
5.1	Interpretación de la señal del sensor de presión durante el curado	103

5.2	Conclusiones	106
6	Estudio de un componente de automoción.....	107
6.1	Definición del prototipo: barra anti-intrusión	107
6.2	Método experimental.....	108
6.3	Fabricación de la barra anti-intrusión.....	113
6.3.1	Fabricación empleando RTM.....	113
6.3.2	Fabricación empleando CRTM	115
6.3.3	Eficiencia de proceso.....	121
6.4	Análisis de costes	126
6.4.1	Optimización del proceso de fabricación mediante PAM-RTM	126
6.4.2	Estructura de costes.....	128
6.5	Conclusiones	132
7	Conclusiones generales.....	135
7.1	Conclusiones	135
7.2	Líneas futuras	136
7.3	Difusión.....	137
8	Referencias bibliográficas.....	139
9	Anexos	147
9.1	Caracterización de los cambios de velocidad del estudio de la fase de compresión	147
9.2	Reproducibilidad del estudio de la fase de compresión	148
9.3	Correlación de la simulación de PAM-RTM (barra anti-intrusión)	149

Índice de figuras

Figura 1: Estructura de costes de diferentes procesos de fabricación de composites [9].....	27
Figura 2: Comparación el i3 con un competidor directo como el Mazda 2.	28
Figura 3: Aplicaciones de composites en elementos de suspensión de coche comerciales: a) Eje trasero del Volvo XC 90 y b) muelles helicoidales del Audi A6 Avant.	28
Figura 4: Distribución de materiales utilizados en la fabricación de aviones: a) Airbus b) Boeing A350XB.	29
Figura 5: a) Componentes del turbopropulsor de General Electric fabricados en RTM [11], b) previsiones de consumo de composites en la fabricación de turbopropulsores [11], y c) peso específico de los procesos de fabricación empleados en los turbopropulsores [11].	30
Figura 6: Fase inyección.....	32
Figura 7: Fase compresión: a) Cierre del hueco, desde h_g hasta h_0 b) compactación de preforma hasta espesor final, desde h_0 hasta h_f	33
Figura 8: Secuencia del flujo de saturación inducida por la compresión [16].....	34
Figura 9: Representación esquemática de la recuperación de una preforma tipo [37].	35
Figura 10: Influencia de la fuerza de compresión, representada por Ω , sobre el tiempo de llenado [18].	37
Figura 11: Hueco no constate en la fase de compresión.....	38
Figura 12: Evolución en el tiempo del grado de curado en función de la temperatura [69].	46
Figura 13: Viscosidad: a) Viscosidad en función del grado de curado y temperatura [69], b) tiempo de gel, según la temperatura de curado.	47
Figura 14: Viscosidad en función del grado de curado y temperatura.	48
Figura 15: Ensayo dinámico de calorimetría diferencial de barrido (DSC)	49
Figura 16: Estudio morfológico: Comportamiento del ligante a diferentes temperaturas.....	50
Figura 17: Definición de las direcciones del tejido: a) Esquema del tejido 3D b) vista superior c) vista inferior.	50
Figura 18: Método de caracterización de la preforma: a) Imagen del ensayo experimental, b) diagrama del ensayo.....	52
Figura 19: Fuerza de compresión: 10, 50 y 100 mm/min.....	54

Figura 20: Fuerzas de compresión en función del volumen en fibra: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante; fuerzas de compresión en función del tiempo de compactación c) sin ligante d) con ligante; y fuerzas de compresión en función del número de telas de la preforma e) sin ligante, y f) con ligante.	55
Figura 21: Espesor final de la recuperación de la preforma en función de la velocidad de compresión.	56
Figura 22: Influencia del tiempo de compactación: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante.	56
Figura 23: Temperatura de la preforma en el instante de la descarga.	57
Figura 24: Recuperación de la preforma en función del volumen en fibra compactado: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante.	57
Figura 25: Influencia del número de telas en la preforma; a) preforma sin ligante y b) preforma con ligante.....	58
Figura 26: Direcciones de ensayos de permeabilidad en el plano para tejidos anisótropos [73].	59
Figura 27: Banco de ensayos: Permeabilidad en el plano.	60
Figura 28: Permeabilidad en el plano: a) 0 °, b) 90 ° y c) 45 °.....	60
Figura 29: Banco de ensayos: Permeabilidad a través del espesor.....	61
Figura 30: Permeabilidad a través del espesor.	61
Figura 31: Esquema de las variables de inyección: a) Geométricas b) Vista transversal de la muestra.	64
Figura 32: Estudio de convergencia	66
Figura 33: Efecto estandarizado (% impregnado; $\alpha = 0.05$).	67
Figura 34: a) Relación entre la altura del hueco, el contenido de fibra y el porcentaje de llenado del hueco, b) variación del porcentaje de llenado en función de la altura del hueco y el contenido de fibra inicial.	68
Figura 35: Relación entre el porcentaje de llenado del hueco (p_{gf}) y la relación r	69
Figura 36: Diferentes patrones de impregnación: a) Patrón I ($v_{fi}=45$, $h_g=1,72$, $p_o=1$), b) patrón II ($v_{fi}=45$, $h_g=1,44$, $p_o=1,2$) y c) patrón III ($v_{fi}=40$, $h_g=1,44$, $p_o=1$).	70
Figura 37: Esquema del ensayo experimental.	71
Figura 38: Patrón de flujo final (impregnación transversal 3D y vista superior): a) Patrón I, b) Patrón III y c) Patrón II.	72
Figura 39: Presión de inyección; Presión de distribución y presión máxima.....	73
Figura 40: Esquema del molde de los ensayos experimentales.....	77
Figura 41: Resultados del ensayo <i>short-shot</i> del patrón I: a) Vista superior, b) vista inferior, y c) corte transversal.	79

Figura 42: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa, en función de la posición del molde, a diferentes velocidades de compactación constantes.	81
Figura 43: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa en función de la posición del molde para diferentes fuerzas de compresión constantes.	82
Figura 44: Evolución de la velocidad en función de la posición del molde para diferentes fuerzas de compresión constantes.	82
Figura 45: Fuerza pico frente a tiempo de compactación de las estrategias de compactación de estrategias constantes.	83
Figura 46: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde: a) C0,1, b) C0,5, c) C1, y c) C2.	84
Figura 47: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde: a) F5, b) F10, y c) F15.	85
Figura 48: Presión máxima para cada sensor en la dirección radial: a) Control de velocidad, y b) control de fuerza.	86
Figura 49: Micrografías de condiciones de compresión diferentes: a) 0,1 mm/s, b) 1 mm/s, c) 5 kN, y d) 15 kN.	87
Figura 50: Resultados del ensayo <i>short-shot</i> del patrón II: a) vista superior e inferior, y b) corte transversal.	89
Figura 51: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa, en función de la posición del molde, a diferentes velocidades de compactación constantes (patrón II).	90
Figura 52: Fuerza pico frente a tiempo de compactación. Estrategia de velocidad constante de patrón I y II.	90
Figura 53: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde para patrón II: a) 0,1 mm/s, b) 0,5 mm/s, c) 1 mm/s, y c) 2 mm/s.	91
Figura 54: Presión máxima para cada sensor en la dirección radial (patrón II).	92
Figura 55: Estrategia de velocidad variable (patrón I): velocidad del cierre del hueco (v_g) y de la compactación de la preforma (v_p).	93
Figura 56: Evolución de la fuerza en términos de nivel de compactación de preformas a diferentes velocidades.	94
Figura 57: Fuerza máxima y tiempo de ciclo para las estrategias de compresión de velocidad constante y variable.	95
Figura 58: Distribución de presión: a) C1, b) A2/0,5, y c) presiones máximas de ambos.	96
Figura 59: Nivel de porosidad. Imágenes obtenidas con el microscópico óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM): a) Ensayo C1 y b) ensayo A2/0,5.	97

Figura 60: Resultados de procesado: Tiempos de ciclo y evolución de la fuerza de cierre según la posición del molde superior, para RTM, CRTM SG y CRTM A2/0,5	99
Figura 61: Distribución de presión dentro del molde; RTM, CRTM SG y CRTM.....	99
Figura 62: Micrografías de los procesos convencionales de LCM: a) RTM y b) CRTM sin hueco (CRTM SG).....	100
Figura 63: Esquema de la configuración del ensayo para la interpretación de la señal del sensor de presión.....	104
Figura 64: Señal del sensor de presión frente al sensor eléctrico DC durante el curado: a) 80 °C, b) 100 °C, 120 °C.....	105
Figura 65: Ventana de proceso en función de la temperatura de curado. DC referente al sensor eléctrico y SP referente al sensor de presión.	106
Figura 66: Geometría de la barra anti-intrusión [81].....	108
Figura 67: Configuración de la preforma utilizada para la fabricación de la pieza [81].	108
Figura 68: Configuración del sistema de fabricación de la barra anti-intrusión: a) Fotografía del sistema, y b) esquema de la configuración.	110
Figura 69: Diagrama de control de flujo: a) RTM y b) CRTM.....	112
Figura 70: Resultados del ensayo RTM-2-80. Fuerza de cierre de prensa, parámetros de inyección y sensores de presión.	115
Figura 71: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM, condiciones de inyección frente a temperatura.	116
Figura 72: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM, tonelaje de prensa frente a temperatura.	117
Figura 73: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM: Señal de los sensores de presión frente a temperatura.....	117
Figura 74: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-80.	118
Figura 75: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-100.	119
Figura 76: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-120.	120
Figura 77: Short shot del CRTM3: a) Vista de la superficie superior, b) vista de la superficie inferior.	121
Figura 78: Short shot del CRTM3: a) Vista de la superficie superior, b) vista de la superficie inferior.	122
Figura 79: Micrografías de diferentes zonas de la barra anti-intrusión fabricada mediante RTM a 80 °C: b) Zona A superior, c) zona A inferior, d) zona B, y e) zona C.....	123
Figura 80: Imágenes de las barras anti-intrusión fabricada mediante CRTM: a) 80 °C, b) 100 °C, c) 120 °C, y d) extremos inferiores de la pieza fabricada a 120 °C.	124

Figura 81: Micrografías de diferentes zonas de la barra anti-intrusión fabricada mediante CRTM a 100 °C: b) Zona A superior, c) zona A inferior, d) zona B, y e) zona C.....	125
Figura 82: Modelado de procesos; a) RTM, y b) CRTM: a) Definición de las permeabilidades locales implementadas y b) definición de la zona definida referente al hueco y preforma.....	127
Figura 83: Resultados de las simulaciones realizadas (viscosidad constante): a) En el RTM variación del tiempo de inyección en función de la presión de inyección, y b) en el CRTM variación del tiempo de inyección en función del caudal de inyección.....	128
Figura 84: Distribución de presiones [bar] para a) RTM, y b) CRTM.....	130
Figura 85: Calibración de la prensa: a) Fotografía de la calibración, y b) Diagrama de medición.	148
Figura 86: Señal de la prensa frente a la señal del láser.	148
Figura 87: Calibración de la prensa: a) <i>Setup</i> de la calibración, y b) señal de la prensa frente a la señal del láser.	149

Índice de tablas

Tabla 1: Efecto de diferentes parámetros sobre la respuesta de la preforma [37]: v_c velocidad de compresión, t_c tiempo de compresión, contenido final en fibra v_{ff} , y número de capas N_t	36
Tabla 2: Capacidad de detención de cada sensor [59]......	40
Tabla 3: Constantes del modelo de curado, viscosidad y tiempo de gel para un rango de temperaturas entre 60–110 °C.	48
Tabla 4: Parámetros influyente en la compactación.....	51
Tabla 5: Condiciones de los ensayos de compresión. En negrita se define el rango de valores estudiado por cada variable.....	53
Tabla 6: Listado de los ensayos de permeabilidad.....	59
Tabla 7: Constantes del modelo de Carman-Kozeni.....	62
Tabla 8: Parámetros del proceso CRTM: Parámetros influenciados por la pieza final y parámetros de procesado divididos en influyentes en la fase de inyección y compresión.....	64
Tabla 9: Rango de las variables de inyección estudiadas.....	65
Tabla 10: Ensayos realizados con control de velocidad y fuerza.....	80
Tabla 11: Lista de ensayos a velocidad constante con el patrón II.....	89
Tabla 12: Condiciones de ensayos con cierre de prensa a velocidad variable.....	93
Tabla 13: Condiciones de procesado de RTM, CRTM sin hueco (CRTM SG) y CRTM optimizado con velocidad variable. El parámetro h_0 es la altura inicial de la preforma antes de la inyección, h_f es el espesor final de las muestras una vez fabricada, P es el valor de la presión de inyección, y v_c es la velocidad de la compresión, dividida en el caso de CRTM en v_g , velocidad del hueco y v_p velocidad de la preforma.....	98
Tabla 14: Tiempos de ciclo de cada proceso.....	98
Tabla 15: Ensayos realizados de RTM y CRTM.....	113
Tabla 16: Ensayos de RTM realizados.....	114
Tabla 17: Presión de inyección, tiempo de llenado y fuerza de cierre obtenidos de PAM-RTM.....	129
Tabla 18: Tiempo de cada etapa estudiada.....	130
Tabla 19: Coste de equipamiento para RTM y CRTM [27]......	131
Tabla 20: Consumo y coste de energía. Coste energía 0,1 €/kWh.....	131
Tabla 21: Resumen del coste de la pieza. El coste de la planta se asume que es 90 €/m ² /año.....	132
Tabla 22: Resumen del coste de la pieza. Equipamiento e utillaje, planta, energía y materia prima..	132

Tabla 23: Comparación de tiempos de llenado. 149

Lista de símbolos

A	Área de la pieza
C	Longitud de la pieza en eje x
D	Longitud de la pieza en eje y
f_c	Fuerza de compresión
h_0	Espesor final de la preforma en la fase de preformado
h_1	Espesor de compactación de la preforma en la fase de preformado
h_i	Espesor inicial de la preforma
h_f	Espesor final de la pieza
h_g	Altura del hueco
\mathbf{K}	Tensor de permeabilidad
K_{0°	Permeabilidad en la dirección 0°
$K_{0^\circ\text{L}}$	Permeabilidad en la dirección 0° + ligante
K_{90°	Permeabilidad en la dirección 90°
$K_{90^\circ\text{L}}$	Permeabilidad en la dirección 90° + ligante
K_{45°	Permeabilidad en la dirección 45°
$K_{45^\circ\text{L}}$	Permeabilidad en la dirección 45° + ligante
K_g	Permeabilidad en el hueco
K_z	Permeabilidad a través del espesor
$K_{z\text{L}}$	Permeabilidad a través del espesor + ligante
k_0	Constante de la ecuación de Carman-Kozeny
K_{ii}	Permeabilidad en función del volumen en fibra
L_{xb}	Longitud de impregnación en eje x axis: vista inferior
L_{yb}	Longitud de impregnación en eje y axis: vista inferior
L_{xt}	Longitud de impregnación en eje x axis: vista superior
L_{yt}	Longitud de impregnación en eje y axis: vista superior
L_z	Longitud de impregnación en eje z
N_c	Número de ciclos
N_L	Número de telas de la preforma
P_{ap}	Presión aplicada cada instante
P_f	Presión a partir de la cual la preforma no se compacta de forma remarcable
P_v	Presión de vacío
P	Presión de inyección
Q	Caudal de inyección
r	Ratio entre permeabilidades
R	Resistencia eléctrica obtenida a través del sensor eléctrico DC
sv	Valor del efecto estandarizado
T	Temperatura
T_c	Temperatura de curado
t_c	Tiempo de compresión
t_d	Tiempo de descarga
t_i	Tiempo de inyección
T_p	Temperatura de la preforma
t_f	Tiempo de llenado de la inyección
t_g	Tiempo de gel

V_i	Volumen impregnado
V_f	Volumen final de la pieza
V_r	Volumen de resina
v_c	Velocidad de compresión
v_d	Velocidad de descarga
v_f	Contenido de fibra
v_{fi}	Contenido de fibra inicial
v_{ff}	Contenido de fibra final
\vec{v}	Vector de velocidad
μ	Viscosidad
\emptyset	Porosidad
p_g	Porcentaje de la altura del hueco
p_{gf}	Porcentaje del llenado del hueco
p_o	Porcentaje de volumen de resina inyectado
p	Señal de los sensores de presión
P_1	Punto de inyección central
P_2	Punto de inyección lateral izquierdo
P_3	Punto de inyección lateral derecho
p_{s1}	Señal de la presión en el sensor 1
p_{s2}	Señal de la presión en el sensor 2
p_{s3}	Señal de la presión en el sensor 3
Ω	Parámetro adimensional
α	Grado de conversión de la resina

Lista de abreviaturas

CFRP	Carbon Fibre Reinforced polymer
CRTM	Compression Resin Transfer Moulding
DSC	Differential Scanning Calorimetry
GMT	Glass Mat Thermoplastics
HP-RTM	High Pressure Resin Transfer moulding
LCM	Liquid Composites Moulding
LFT	Long Fibre Thermoplastics
NCF	Non Crimp Fabric
RTM	Resin Transfer Moulding
SEA	Specific Energy Absorption Index
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMC	Sheet Moulding Compound

Capítulo 1

Introducción

La tesis “Optimización del proceso de *Compression Resin Transfer Moulding* (CRTM) mediante técnicas experimentales y simulación”, ha sido desarrollada dentro del programa de doctorado “Comportamiento Mecánico y Materiales” en el grupo de Tecnología de Plásticos y Compuestos del Departamento de Mecánica y Producción Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea.

1.1 Enmarque de la tesis

La protección del medioambiente, con especial énfasis en la reducción de las emisiones de CO₂ para mitigar el cambio climático y reducir la contaminación atmosférica, es una demanda creciente a la que tienen que responder todas las industrias. Para la industria del transporte esta exigencia es si cabe más importante, ya que es la segunda industria más contaminante de la Unión Europea. De todas estas emisiones, el 93% se generan en el transporte por carretera [2], y como la demanda de movilidad aumenta y la flota de vehículos también crece, la industria automovilística debe hacer frente a este reto.

La prospectiva [3] prevé que la población urbana aumentará un 75% en las próximas cuatro décadas. Por lo tanto, todo desarrollo tecnológico que impulse el desarrollo de la próxima generación de medios de transporte urbano con (idealmente) cero emisiones será fundamental para la competitividad de la industria.

Este cambio social es un vector fundamental para los fabricantes de vehículos de transporte urbano (automóviles, autobuses y tranvías) que están apostando por la electrificación (BMW i3) o el desarrollo de vehículos de combustión de consumos inferiores a 1 l/100 km (VW XL1). El peso del automóvil es responsable aproximadamente de una cuarta parte del consumo de combustible [4]. En todos los casos, y teniendo en cuenta que el tráfico en ciudad se caracteriza

por las constantes aceleraciones/deceleraciones, el aligeramiento (reducción consumo/aumento de autonomía) supone una prioridad y un valor añadido por el que cada vez están dispuestos a pagar más dinero tanto los fabricantes como los usuarios.

El aligeramiento estructural se puede producir en base a dos aproximaciones complementarias: 1) Mediante diseños innovadores, en los que la optimización del componente, hoy en día, roza los límites de las prestaciones de los materiales, y 2) mediante la sustitución de los materiales tradicionales (acero) por otros más ligeros. Entre las aleaciones metálicas, las de aluminio, magnesio y los aceros de alto límite elástico son cada vez más habituales. La sustitución del acero por los composites reforzados con fibra de carbono (CFRP), dependiendo de si se trata de un criterio de rigidez o resistencia, pueden reducir el peso hasta en 75% y 82% respectivamente. La mejora de la seguridad en caso de accidente también se encuentra entre las fuerzas motrices que favorecen a los composites, ya que su capacidad de disipar energía por unidad de masa (SEA, *Specific Energy Absorption Index*) es netamente superior al de los metales [5]. Consecuentemente los composites se encuentran en todas las agendas estratégicas de los fabricantes de automóviles [6].

Los procesos de fabricación de composites, clave para su empleo masivo en automoción

La industria automovilística ya se beneficia en cierta medida de los composites desde hace varias décadas, sobre todo para aplicaciones estructurales no primarias [1]. Tecnologías como GMT (*Glass Mat Thermoplastics*), LFT (*Long Fibre Thermoplastic*) o SMC (*Sheet Moulding Compound*) se utilizan para fabricar componentes del interior, piezas funcionales o piezas de carrocería, con estándares de productividad y precio muy competitivos. Pero a pesar de estas aplicaciones exitosas, su expansión a piezas de carácter más estructural (con un mayor potencial de aligeramiento) como el chasis o piezas del *powertrain* no es posible por las limitadas propiedades de los materiales obtenidas con estas tecnologías (fibras discontinuas).

Cuando se analiza la viabilidad de los composites reforzados con tejidos técnicos se argumenta que el precio de las materias primas, y sobre todo el de la fibra de carbono, es una de las principales barreras. A fin de contextualizar la “presión” sobre el coste de los materiales/procesos en cada uno de los sectores del transporte, se reporta el precio que se está dispuesto a pagar en cada uno por cada kilo aligerado. En la aviación civil este coste ronda los 450 €/kg, mientras que en el aeroespacial puede llegar a los 40.000 €/kg. En el sector del automóvil el mejor compromiso entre reducción de peso y coste asumible depende del tipo de vehículo, pero de media se estima que son 10 €/kg [7]. Esto muestra muy a las claras que, si bien todos los sectores pueden tener interés en nuevos materiales estructurales de propiedades sustancialmente mejoradas, no pueden

permitirse los mismos procesos y materias primas. Incluso en el sector de automoción no es lo mismo la estructura de costes asumible para coches de lujo o utilitarios.

La producción de fibras de carbono exige unas inversiones mucho mayores que el resto de materiales, por lo que hasta que la industria del automóvil no garantice unos volúmenes de consumo mínimos, es difícil que se pueda reducir el precio de las materias primas. Este escenario está cambiando en los 5-6 últimos años, como lo demuestran las alianzas entre productores de fibra de carbono y grandes fabricantes de automóviles [8]. Existen otros hándicaps como la integración de los composites con el resto de la estructura (metálica) o la reciclabilidad que deberán ser abordadas con alternativas más interesantes que las actuales.

Sin embargo, la razón más importante para la fabricación en masa de esos CFRP es la falta de procesos de fabricación. Las tecnologías actuales, mayoritariamente desarrolladas para la industria aeronáutica, están adaptadas para series cortas-medias de hasta 30.000 piezas año, lo que lastra los costes para series propias de la industria de la automoción. Uno de los estudios más relevantes lo realizó Bader [9] al comparar la estructura de costes de varios tipos de procesos (autoclave, infusión y RTM) para la fabricación de un segmento del fuselaje de un avión. Lo más significativo del estudio es que en todos los casos el coste asociado a la manufactura era superior al 50-60% (figura 1), y que la incidencia del coste de la mano de obra es muy importante en todos ellos.

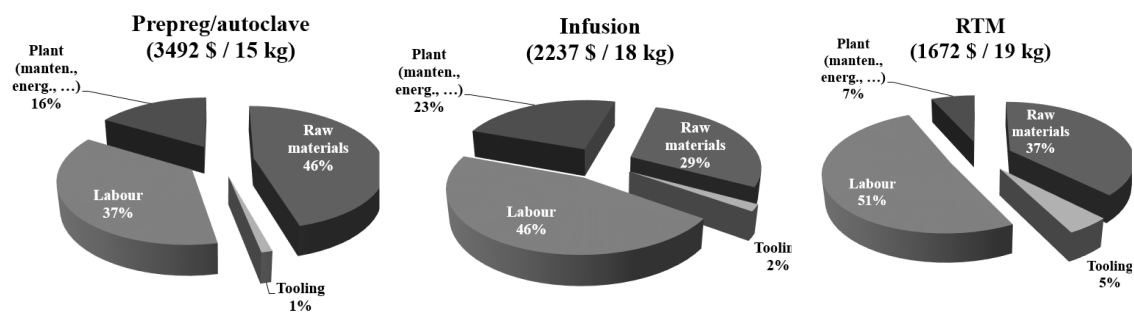


Figura 1: Estructura de costes de diferentes procesos de fabricación de composites [9].

El mejor exponente del cambio tecnológico, en lo que a los procesos de fabricación se refiere, es el BMW i3, primer coche que emplea de forma masiva los CFRP. La mejor forma de comprobar la eficiencia de aligeramiento de los CFRP es comparar el i3 (figura 2a), con un competidor directo como el Mazda 2 (figura 2b), considerado el referente en lo que a tecnología de acero se refiere. Las dimensiones de ambos vehículos son prácticamente idénticas pero el chasis del i3 pesa 90 kg (39%) menos.



Figura 2: Comparación el i3 con un competidor directo como el Mazda 2.

El análisis del módulo Drive del i3 muestra claramente cuáles son las tecnologías por las que ha apostado la industria [10]. De las 34 piezas de las que está compuesto 15 están fabricadas mediante RTM, y el resto mediante compresión. En ambos casos la prensa es un elemento clave del proceso.

Por último, se presentan otras dos aplicaciones de automoción que avalan la apuesta. Volvo, en su recientemente comercializado XC 90, ha incorporado la barra de estabilización trasera en GFRP fabricada mediante RTM (figura 3a). El segundo ejemplo viene de Audi, y se trata de los muelles helicoidales de suspensión del nuevo Audi A6 Avant (figura 3b), que si bien está fabricado por RTM otros procesos como la pultrusión de perfiles curvos pueden ser una alternativa real.



Figura 3: Aplicaciones de composites en elementos de suspensión de coche comerciales: a) Eje trasero del Volvo XC 90 y b) muelles helicoidales del Audi A6 Avant.

El análisis de las tendencias en el sector aeronáutico también revela la importancia de los procesos de vía líquida. La cantidad de composite utilizada en la estructura del avión (fuselaje, alas...) ha

llegado a porcentajes superiores al 50% (figura 4a y 4b), pero prácticamente todos los componentes han sido fabricados mediante autoclave. El reto ahora consiste en fabricar esos componentes con tecnologías alternativas a autoclave. El primero de los ejemplos claros que muestran la importancia de estos procesos es el borde de ataque del estabilizador horizontal del Airbus A350 que se fabrica en AERNNOVA mediante RTM.

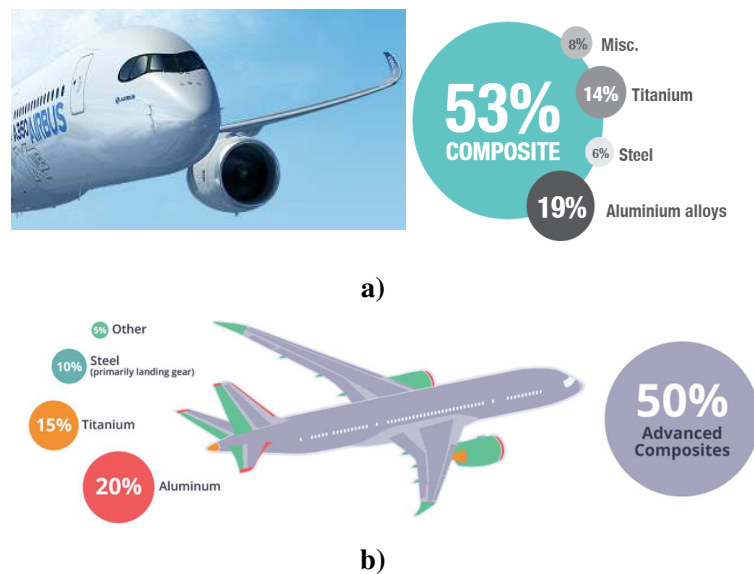


Figura 4: Distribución de materiales utilizados en la fabricación de aviones: a) Airbus b) Boeing A350XB.

El segundo ejemplo es mucho más sorprendente y da idea del nivel tecnológico que se está alcanzando; se trata del empleo de composites en los turbopropulsores (figura 5a). Se estima que en los ocho próximos años el mercado aumente un 50% (figura 5b), y que si bien el autoclave seguirá predominando, el RTM ya representa cerca del tercio (figura 5c) [11].

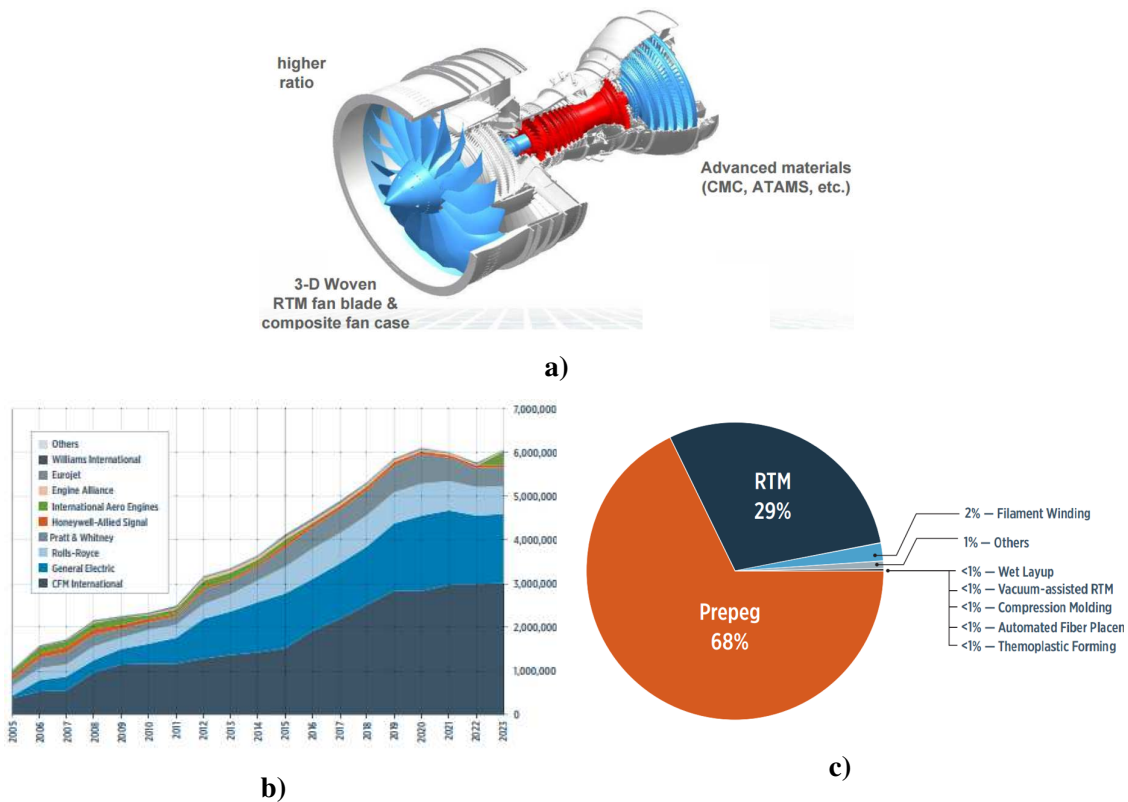


Figura 5: a) Componentes del turbopropulsor de General Electric fabricados en RTM [11], b) previsiones de consumo de composites en la fabricación de turbopropulsores [11], y c) peso específico de los procesos de fabricación empleados en los turbopropulsores [11].

1.2 Estado del arte

1.2.1 Procesos de fabricación de moldeo por vía líquida (LCM)

Liquid Composite Moulding (LCM) [12] es un término genérico de la familia de los procesos de fabricación de material compuesto, en los que básicamente primero se colocan los tejidos secos en el molde y a continuación se impregnan con la resina líquida. Existen diferentes sistemas para impregnar, desde el vacío, pasando por la inyección e incluso mediante compresión. Finalmente, se compacta hasta que finaliza el proceso de curado, y para acabar se desmoldea la pieza.

Resin Transfer Moulding (RTM) es un proceso bien establecido para aplicaciones de nicho y presenta varias ventajas para la fabricación de compuestos de altas prestaciones [12,13], como por ejemplo la baja inversión en equipamiento, excelente control de las propiedades mecánicas, procesado en molde cerrado, bajas presiones de inyección, integración de insertos y libertad de diseño. Sin embargo, presenta varias limitaciones importantes, sobre todo cuando se pretende fabricar piezas con elevados contenidos en fibra (en aplicaciones estructurales normalmente superiores al 40% en volumen) y/o piezas de grandes dimensiones. El incremento del contenido

en fibra disminuye la permeabilidad de la preforma, necesitando mayores tiempos de llenado, y generando problemas de impregnación y elevados contenidos en poros. A fin de resolver estos inconvenientes asociados al RTM convencional se han explorado diferentes alternativas: aumentar la presión de inyección lo que se denomina *High Pressure Resin Transfer Moulding* (HP-RTM), inyectar por múltiples entradas o reducir la viscosidad de la resina entre otras.

Una de las alternativas más prometedoras es la combinación del RTM con la compresión, denominada CRTM (*Compression Resin Transfer Moulding*) [14–26]. 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. Mediante un estudio de costes se demostró que el coste de fabricación de un techo de automoción mediante CRTM puede reducirse 9,2 veces frente a HP-RTM y 14,8 veces frente a RTM [27].

1.2.2 *Compression Resin Transfer Moulding* (CRTM)

Fase de inyección

Como ya se ha comentado, en el CRTM, a diferencia del RTM convencional, el molde se mantiene parcialmente abierto en la fase de inyección (figura 6), generando un espacio no ocupado por las fibras que ejerce de camino preferente de flujo entre la preforma y molde. Debido a la alta permeabilidad del hueco, la resina fluye en el hueco impregnando parcialmente la preforma [28,29]. La permeabilidad del hueco varía en función del espesor del hueco. La estrategia de inyección que se utiliza es inyectar a presión o caudal constante [30], teniendo en cuenta que inyectando a altas presiones cabe la posibilidad de que la preforma se deforme (figura 6).

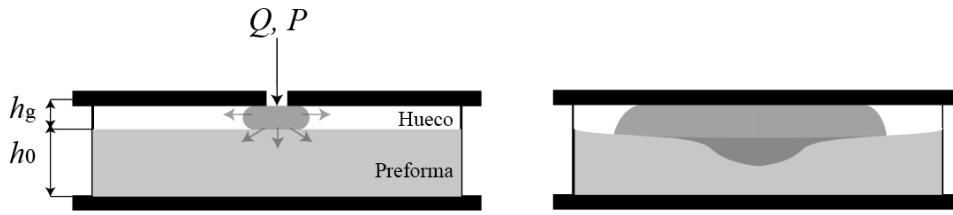


Figura 6: Fase inyección.

Para describir el flujo en el hueco se puede utilizar la ley de *Darcy* [19]:

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla \mathbf{P} \quad (1.1)$$

donde, \mathbf{v} [m/s] es la velocidad del fluido, μ la viscosidad del fluido [Pa.s], $\nabla \mathbf{P}$ es la presión local del fluido [Pa] y \mathbf{K} es la permeabilidad de la preforma [m²], parámetro que define la facilidad que ofrece un medio poroso (tela, tejido, *mat*, etc.) al flujo de un fluido (resina) [31]. Esta propiedad física de la preforma depende del volumen de fibra (gramaje en el plano y grado de compactación en espesor) y del tipo de tejido entre otros factores. Para calcular la permeabilidad en cada instante en función del volumen en fibra se utiliza la ecuación de Karman-Kozeny [32];

$$K_{ii} = k_0 \cdot \frac{(1 - v_f)^3}{v_f} \quad (1.2)$$

donde k_0 es una constante empírica que depende de la preforma. Por lo general la permeabilidad transversal suele ser uno o dos órdenes de magnitud más baja que la permeabilidad en el plano.

Se asume que el molde es indeformable y la resina incomprensible, por lo que la ecuación de conservación de masa sería:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1.3)$$

Uno de los criterios más razonables para definir la altura del hueco (h_g) es igualar el volumen de éste al de la resina a inyectar (V_r). Como el espesor final de la pieza (h_f) y el contenido final en fibra (v_{ff}) son requisitos de diseño, h_g puede calcularse con:

$$h_g = (1 - v_{ff}) h_f \quad (1.4)$$

La compresibilidad de la preforma puede despreciarse ya que las presiones de inyección suelen ser bajas. La permeabilidad del hueco (K_g) puede calcularse utilizando la solución lubricada para

un flujo entre dos paredes sólidas, teniendo en cuenta que el espesor es mucho menor que la longitud [19], y la ecuación es:

$$K_g = \frac{h_g^2}{12} \quad (1.5)$$

La magnitud de K_g suele ser típicamente 3-4 órdenes de magnitud más alta que la permeabilidad en el plano de los tejidos [16].

Aspectos generales de la fase de compresión

Existen dos estrategias de accionamiento para la fase de compresión. Aplicar una fuerza controlada, con lo que la velocidad será una resultante, o aplicar una velocidad de desplazamiento a la parte móvil del molde, por lo que la respuesta será una fuerza. Aumentar la fuerza/velocidad aplicada reduce el tiempo de ciclo, pero también encarece el proceso al necesitar moldes más robustos y prensas de mayor fuerza de cierre [33,34]. Por otra parte, la compresión se puede dividir en dos fases diferentes: En una primera etapa el molde superior cierra el hueco hasta entrar en contacto con la preforma (figura 7a), y en una segunda fase el molde se cierra hasta la cota final compactando la preforma (figura 7b).

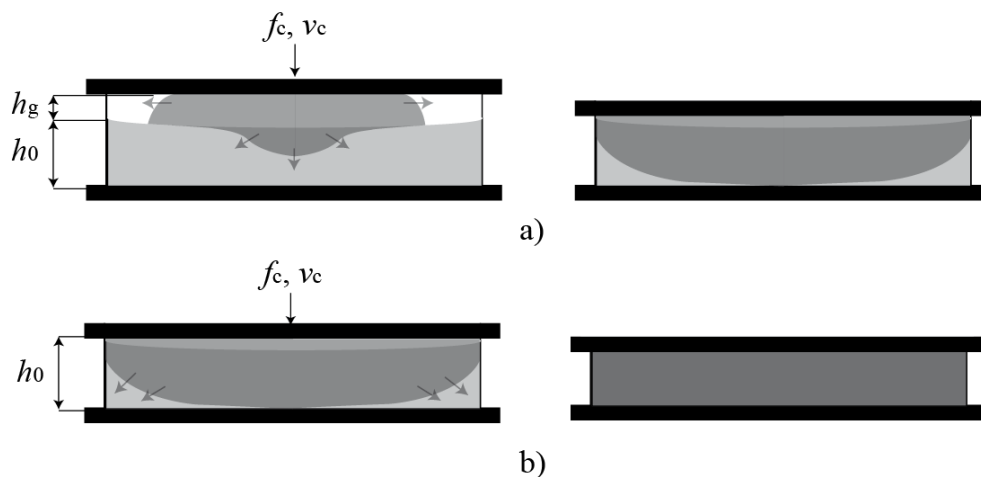


Figura 7: Fase compresión: a) Cierre del hueco, desde h_g hasta h_0 b) compactación de preforma hasta espesor final, desde h_0 hasta h_f .

A fin de comprender los fenómenos que intervienen en la compresión, en la figura 8 se muestra una guía de la secuencia del flujo de la resina durante la impregnación. Se asume que parte de la resina ha penetrado en la preforma y el hueco no está completamente repleto (figura 8a). El cierre del molde empuja a la resina tanto al interior de la preforma como a través del hueco. La permeabilidad en el hueco es 3-4 órdenes de magnitud mayor que a través de la preforma [35], por lo que la resina preferentemente fluye en el hueco (figura 8b). El cierre del molde también

implica que la permeabilidad del hueco disminuye, por lo que cada vez le cuesta más fluir por el interior del hueco. Durante esta fase, especialmente en las inmediaciones del punto de inyección, el avance del frente de flujo es complejo, ya que impregna la preforma tanto en la dirección del espesor como en la dirección del plano (figura 8c). En toda esta fase no hay contacto entre la parte superior del molde y la preforma, pero aun así los gradientes de presión inducidos por el flujo de resina pueden comprimir ligeramente la preforma [35]. En el momento en el que el desplazamiento del molde cierra por completo el hueco inicial (figura 8d), para los casos en los que el espesor del hueco es muy inferior a su longitud, la resina no ha podido llegar al final de la pieza y a partir de ahí el flujo es en la dirección del plano (figura 8e), asemejándose al RTM convencional. Además, el nivel de compactación la preforma es elevado, por lo que la permeabilidad también disminuye y el flujo puede no llegar a impregnar por completo la pieza (figura 8f).

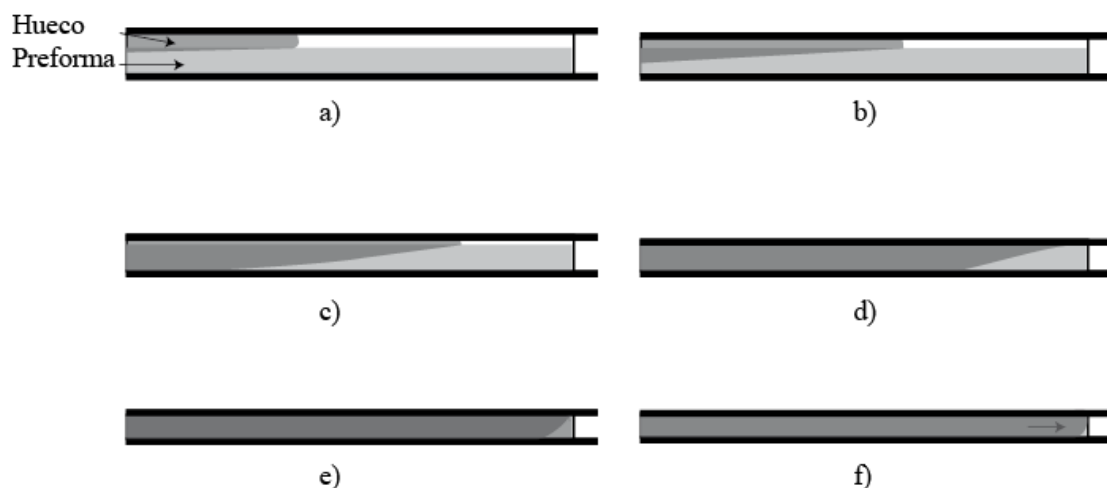


Figura 8: Secuencia del flujo de saturación inducida por la compresión [16].

La fuerza que actúa sobre la superficie del molde es la suma de la presión generada por la resina y la reacción generada por la compactación de la preforma [36]. La importancia relativa de cada una de estas contribuciones depende de la viscosidad de la resina, de la preforma (tipo de fibra, mecha, tejido, contenido en fibra), de las dimensiones y geometría de la pieza y de los parámetros de compresión. Si bien los estudios sobre la viscosidad de las resinas ha sido objeto de muchas publicaciones, la respuesta mecánica de las preformas ha recibido menos atención. Lo más habitual ha sido considerar la respuesta como un comportamiento elástico lineal; sin embargo las publicaciones de los últimos años han demostrado que el comportamiento es viscoelástico no-lineal. De todas formas, el trabajo de Somashekar *et al.*[37] sentó unas bases muy sólidas tanto en lo que al método de caracterización como al comportamiento se refiere. La figura 10 es una representación esquemática del comportamiento tras ser sometida a una compresión de una

preforma tipo. Como se puede observar nada más retirar la fuerza de compresión hay una recuperación instantánea que representa la respuesta elástica de la preforma, también conocida como *spring-back*. Acto seguido comienza la recuperación viscoelástica. Durante esta etapa la descompresión es lenta pero continuada en un largo periodo de tiempo. Por último la curva tiende a un valor asintótico que representa la deformación permanente.

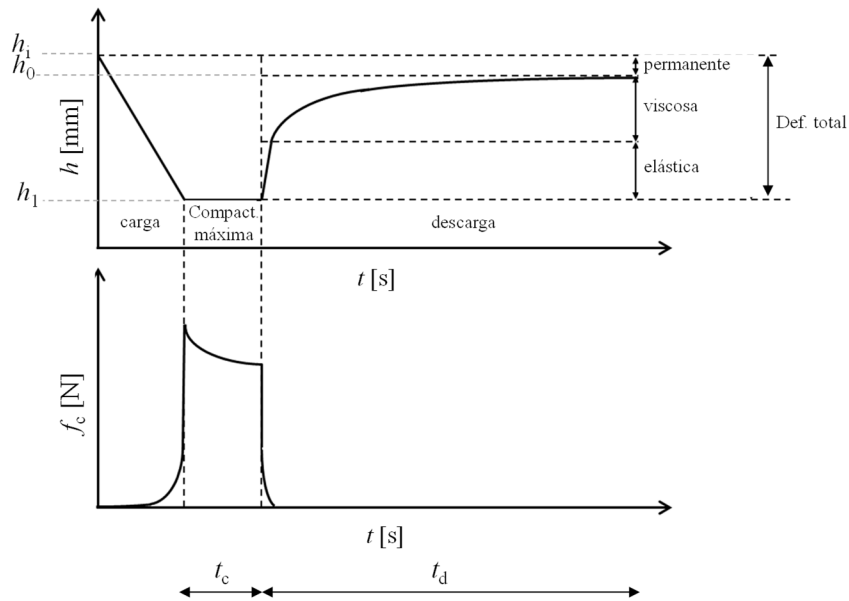


Figura 9: Representación esquemática de la recuperación de una preforma tipo [37].

Somashekar *et al.* [37] estudió el comportamiento de dos preformas de fibra vidrio; un *mat* y un tejido bidireccional equilibrado. Para el presente proyecto, teniendo en cuenta que se pretende centrar en aplicaciones estructurales primarias, se describirá el efecto de diferentes variables sobre el comportamiento del tejido bidireccional. En la tabla 1 se resumen los principales resultados del trabajo, donde se muestra la influencia que ejerce el tiempo de compresión, contenido de fibra final y el número de capas, aunque no se observa una tendencia clara en cuanto a la velocidad de compresión.

Tabla 1: Efecto de diferentes parámetros sobre la respuesta de la preforma [37]: v_c velocidad de compresión, t_c tiempo de compresión, contenido final en fibra v_{ff} , y número de capas N_L .

	Elástica	Viscoelástica	Def. permanente	Tensión de comp.
$v_c \uparrow$	$\downarrow\uparrow$	$\downarrow\uparrow$	$\downarrow\uparrow$	$\downarrow\uparrow$
$t_c \uparrow$	\downarrow	–	\uparrow	–
$v_{ff} \uparrow$	\uparrow	–	$\downarrow\downarrow$	\uparrow
$N_L \uparrow$	–	\uparrow	\uparrow	\uparrow

La fase de compresión del CRTM ha sido objeto de muchos estudios [16,18,29,36,38–41]. En los trabajos publicados se han encontrado dos enfoques diferentes. Por un lado, están los que consideran que no hay hueco entre la preforma y el molde superior, y que el flujo a través del espesor es despreciable, denominado como CRTM sin hueco (CRTM SG). En los trabajos realizados por Buntain *et al.*[42] se analiza la velocidad de compresión, mientras que Verleye *et al.* [43] estudian el cierre de molde mediante fuerza controlada. Walbran *et al.* [36] comparan la estrategia de compresión entre control de velocidad y fuerza. Estos estudios se han llevado a cabo con *mat* de fibra de vidrio y *mat* de fibra de vidrio continua. La conclusión principal es que la evolución de la fuerza de cierre del molde está fuertemente influenciada por el comportamiento de la preforma a compresión. Así mismo, consideran imprescindible una caracterización precisa de la permeabilidad y respuesta de la compactación de la preforma para completar el análisis de las fuerzas del CRTM. Respecto al segundo enfoque del CRTM, en los trabajos que existe un hueco entre la preforma y el molde superior, la fase de compresión se divide en dos etapas; cierre del hueco y compactación de la preforma. Merotte *et al.* [18] analizan el cierre del hueco mediante control de fuerza, donde determinan el tiempo de llenado hasta que el hueco esté totalmente cerrado. También analizan la segunda etapa de compactación de la preforma hasta el espesor final de la pieza [35], considerando que la resina fluye exclusivamente en una dimensión (dirección del plano). Los resultados demuestran que el aumento de la presión aplicada reduce considerablemente el tiempo de impregnación, pero sólo cuando se aplican presiones relativamente altas. Por último, Chang [44] demostró que la fase de compresión es la clave de la reducción de tiempos de ciclo y que los parámetros de proceso influyen en la resistencia y rigidez de las propiedades finales [24].

Estrategias de control de la fase de compresión

Como se ha mencionado anteriormente, la compresión con control de fuerza ha sido estudiada por diferentes autores [18,35,36,43–46]; en todos los casos concluyen que cuanto mayor es la fuerza aplicada menor es tiempo de ciclo, y que el aprovechamiento de la capacidad de la prensa se maximiza. El trabajo realizado por Merotte *et al.* [18] añade conclusiones complementarias que permiten optimizar la ventana de procesos de la fase de compresión. De hecho, demostraron que existe una frontera a partir de la cual la mejora obtenida mediante el aumento de la fuerza de compresión no compensa los sobrecostos de moldes/prensas que supondría. Este estudio se basó en el siguiente parámetro adimensional;

$$\Omega = \frac{P_{ap}}{P_f} \quad (1.6)$$

donde P_{ap} es la fuerza aplicada en cada instante, y P_f la fuerza a partir de la cual la preforma no se compacta de forma remarcable. La reducción del tiempo de llenado es grande para los valores más grandes de Ω (figura 9). En este rango, y de acuerdo al teorema de Terzaghi [47], la mayor parte de la fuerza se utiliza para empujar la resina y una pequeña parte para compactar la preforma, lo que explica la reducción del tiempo de impregnación. Como se puede observar en la figura 9, esta zona es muy pequeña, y la ganancia en tiempo de impregnación disminuye tendiendo a un valor asintótico, llegando a ganancias de tiempos marginales, lo que confirma la existencia de ese umbral de eficiencia.

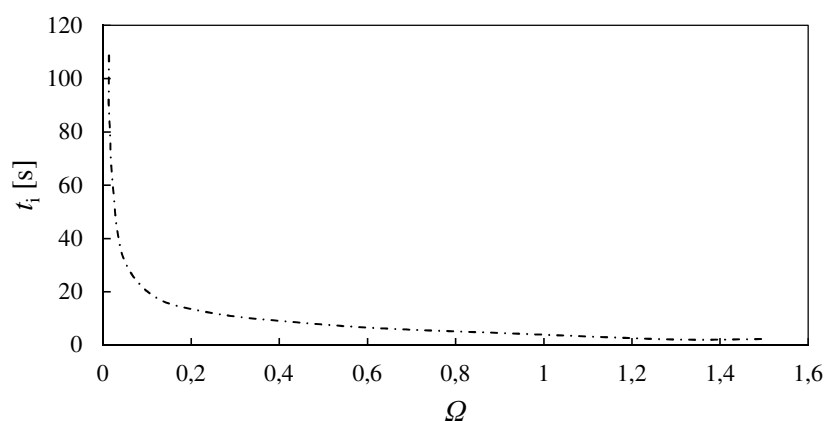


Figura 10: Influencia de la fuerza de compresión, representada por Ω , sobre el tiempo de llenado [18].

Al igual que en el caso del control de fuerza, el estudio de la fase de compresión con control de velocidad ha sido objeto de numerosos estudios [12,22,36,41,42,45,46,48]. De forma general,

más que buscar la ventana de procesos óptima, todos coinciden en que aumentando la velocidad de compresión se reduce el tiempo de ciclo y aumenta la fuerza máxima. Además, en muchos casos [22,41,44,48] se centran en los modelos de simulación sin llegar a realizar un estudio paramétrico experimental del efecto de la velocidad de compresión. Los trabajos que complementan el estudio con un enfoque experimental completo [36,45,46], que comparan los resultados con los de control de fuerza, concluyen que la fuerza máxima se alcanza en la fase final de compactación de la preforma, llegando a fuerzas superiores a las del control de fuerza. Esto requeriría teóricamente de prensas de mayor tonelaje, pero que se emplearían de forma poco eficiente, ya que esa fuerza máxima se necesita en un corto periodo de tiempo.

Aplicación a piezas de geometría compleja

En los anteriores apartados se han analizado los parámetros de material y proceso que influyen en el procesado, para una placa plana; sin embargo, teniendo en cuenta que la mayoría de las aplicaciones industriales no muestran una geometría plana, se analizan los trabajos desarrollados en este campo.

Uno de los factores a tener en cuenta cuando se trabaja con geometrías no planas es el hecho de que el hueco no es constante en la fase de compresión debido a recorrido (h_{g1} y h_{g2} en la figura 11). Como consecuencia de ello, la permeabilidad del hueco varía, complicando aún más el control del patrón de impregnación. Asociado al recorrido, otro de los parámetros que también entra en juego es el fenómeno del rozamiento generado entre preforma/molde y entre los mismos tejidos de la preforma, que ha sido extensamente estudiado por varios autores [46,49].

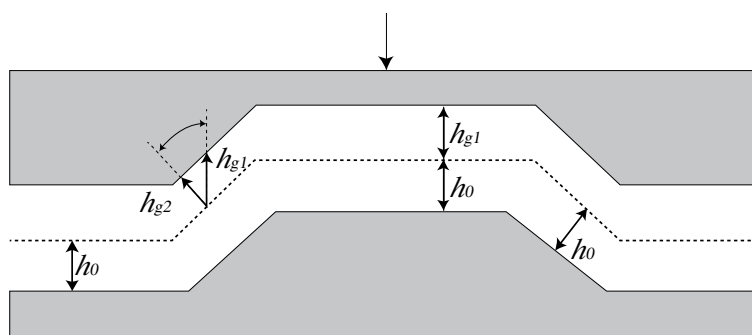


Figura 11: Hueco no constante en la fase de compresión.

El éxito de la fabricación de componentes geoméricamente complejos depende de la impregnación completa de la preforma. A pesar de estar en función de los parámetros de material y proceso descritos en los anteriores apartados, la resina tiene un rol importante. Dado que se inyecta a temperatura ambiente en un molde caliente, la física asociada es más compleja que la descrita por los modelos convencionales de resina [24,50–52]. Además, Chang [24] analizó el

efecto que ejercen los parámetros de proceso como presión de inyección, temperatura del curado, presión de compresión sobre la rigidez y resistencia del composite, demostrando que los parámetros más críticos eran la presión de compresión y la temperatura de la resina.

1.2.3 Técnicas de monitorizado de proceso

Para analizar todos los factores mencionados en el anterior apartado, los sistemas de monitorizado ayudan a predecir y conocer el estado del proceso a tiempo real. Si bien la puesta a punto y el control del proceso implican 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 (*racetraking*) y variables de material (compresibilidad y permeabilidad local), pudiendo generar defectos y reducción de propiedades en la pieza final. Por lo tanto las técnicas de monitorizado ayudan a obtener procesos más robustos y a reducir el coste de fabricación [53].

Existen sistemas de monitorizado del llenado de los proceso de vía líquida que dan información sobre la llegada del frente de flujo, presión interna y del curado de la resina permitiendo el monitorizado en tiempo real: fibra óptica [54,55], termopares, sensores dieléctricos (AC) [56] y eléctricos (DC) [56–58], la tecnología de ultrasonidos [59,60], sensores de presión [61], cámaras digitales de visión [62–64] y piezoeléctricos [65] (Tabla 2).

Tabla 2: Capacidad de detención de cada sensor [59].

	Frente de flujo	Grado de curado	Porosidad	Presión
Cámaras digitales				
LCM [62]	√			
Infusión [63]				
VARTM [64]				
Fibra óptica (FOS)				
VERTM [55]	√	√		
Termopar				
	√	√		
Sensor dieléctrico				
[31]	√	√		
Sensor eléctrico DC				
RTM [57]	√	√		
[58]				
Sensor de presión				
LCM [53]	√			√
RTM [61]				
Piezoeléctrico [59]				
	√	√	√	
Ultrasonidos [60]				
	√	√	√	

1.3 Estudio crítico del estado del arte

Los objetivos del presente proyecto se han definido en función de las siguientes certezas y puntos débiles encontrados en el estado del arte:

Fase de inyección

Para poder comprender la dirección del flujo en la fase de inyección se deben considerar 5 parámetros críticos: la altura de la preforma, la altura del hueco, el volumen de resina inyectado, la viscosidad, el caudal o la presión de inyección. En los trabajos recientemente publicados sobre la fase de inyección se han encontrado dos enfoques diferentes de CRTM; aquellos que consideran que la resina fluye exclusivamente en el hueco [16–18,66], y los que asumen que parte de la resina penetra en la preforma seca, siendo esta última la más realista [19–21,67]. Simacek *et al.* [19,20] desarrollaron un modelo en tres dimensiones que permite analizar el efecto del espesor del hueco y la permeabilidad de la preforma sobre el patrón de impregnación. Sin embargo, se centraron más en la validez del modelo que en el estudio paramétrico, por lo que no se pueden obtener conclusiones, ni cualitativas, ni cuantitativas. Además, tampoco validaron los resultados de las simulaciones con ensayos experimentales. Shojai [67] analizó la influencia de más parámetros (espesor del hueco, permeabilidad de la preforma y la cantidad de resina inyectada) en base a

simulaciones, pero al igual que en el caso de Simacek *et al.* [19,20], no cuantificó el efecto que ejerce cada parámetro, ni correló los resultados con ensayos experimentales. Chang [30] estudió diferentes estrategias de inyección mediante un modelo de dos dimensiones, aunque tampoco muestra ningún ensayo experimental.

Fase de compresión

La fase de compresión del CRTM ha sido extensamente estudiada [16,18,36,38–40]. La conclusión principal de los trabajos realizados es que la evolución de la fuerza de cierre del molde está fuertemente influenciada por el comportamiento de la preforma a compresión. Así mismo, para completar el análisis de las fuerzas del CRTM, consideran imprescindible una caracterización precisa de la permeabilidad y de la respuesta compresión de la preforma [36].

Otra de las conclusiones principales es que para reducir el tiempo de ciclo del proceso de CRTM, la fase de compresión es clave [44]. En los trabajos que comparan la compresión con control de fuerza y velocidad constantes concluyen que con la primera, el aprovechamiento de la capacidad de la prensa se maximiza y que existe un límite de fuerza a partir del cual la reducción del tiempo de compresión es despreciable [16,45]. En lo que a la velocidad de compresión se refiere, se establece que aumentando la velocidad de compresión se reduce el tiempo de ciclo y aumenta la fuerza máxima [45]. Sin embargo, no se identifican los criterios de optimización, entre otras cosas porque las velocidades estudiadas son muy lentas, siendo por debajo de 0,1 mm/s [36]. Tampoco se ha realizado, para ninguno de los tipos de control, un estudio de la calidad del composite resultante (porosidad, zonas secas...), por lo que las conclusiones a las que llegan se deben considerar parciales, y deberían ser validadas. Por último, no existen estudios que exploren la utilización de estrategias de control de la compresión, en las que las condiciones de accionamiento (fuerza o velocidad) varíen en un mismo ciclo.

Varios autores sugieren que las condiciones de inyección afectan a la posterior fase de compresión. Por una parte están los que analizan diferentes combinaciones de estrategias de inyección con las de compresión [36], sin reparar en la distribución de la resina al comenzar la fase de inyección. En el caso de los que tienen en cuenta esta distribución de resina [22], los estudios se han realizado exclusivamente mediante simulaciones numéricas sin confirmar experimentalmente los resultados.

En lo que se refiere a las fuerzas de cierre y las presiones internas que se generan durante todo el proceso del CRTM, durante la fase de inyección son mucho menores que las inducidas durante la compresión [44]. En la bibliografía también se demuestra que se trata de cálculos complejos [38], ya que dichas reacciones son fruto de la combinación de la presión del fluido y la resistencia de

la preforma, con la dificultad añadida de que existen fenómenos de lubricación, desplazamiento de fibras y otros asociados al cambio de viscosidad inducidos por el curado de la resina. No se ha publicado ningún trabajo que analice todos estos factores de forma global, por lo que quedan muchas lagunas a la hora de calcular estructuralmente los moldes y poder dimensionar las prensas.

El último punto de interés que presenta carencias significativas es el relativo a la comparación del CRTM con el RTM convencional. En todos los trabajos publicados sobre prototipos planos [36,38,44], el CRTM se ha realizado sin dejar el hueco entre la preforma y el molde. Por otra parte, para el caso de una pieza de geometría compleja [49,68] tampoco existe un análisis de CRTM con hueco comparado con un RTM convencional. Además tampoco se ha estudiado la influencia de otros parámetros fundamentales como puede ser la temperatura de curado.

Monitorizado

Se han detectado tres parámetros críticos de control del CRTM; la posición del frente de flujo, la presión interna dentro del molde, y la definición de un criterio de desmoldeo. Muchas de las técnicas de monitorizado empleadas en la bibliografía no son adecuadas para los procesos industriales de LCM, debido a que no soportan las condiciones de procesado (temperatura, inyección, compresión y curado), por ser demasiado invasivas en la pieza final, o incluso por su alta complejidad de uso. Además, a pesar de que uno de los objetivos principales es la reducción de tiempos de ciclo, tampoco se ha visto que en bibliografía se hayan definido directrices claras de desmoldeo de pieza, ni se hayan definido ventanas de proceso para optimización del procesado de CRTM.

1.4 Objetivos

En base a las oportunidades identificadas en el estudio crítico sobre el estado del arte, el objetivo del presente proyecto es generar el conocimiento necesario para comprender el comportamiento del flujo en todas las fases del proceso, y así poder obtener piezas finales con bajo contenido en poros y poder diseñar las instalaciones de prensas, reduciendo los tiempos de desarrollo y costes de puesta a punto.

Para alcanzar el objetivo general se han planteado 5 objetivos operativos:

OB 1: Caracterización de las materias primas empleadas; la cinética de curado y reología de la resina, así como la selección de la temperatura de procesado del ligante y la compresibilidad y permeabilidad de la preforma.

OB.2: Determinar la influencia que ejercen los parámetros de inyección en la distribución inicial de la resina. El estudio se llevará a cabo de forma cuantitativa y cualitativa, mediante herramientas de simulación y ensayos experimentales.

OB.3: Determinar la influencia que ejercen diferentes estrategias de compresión en términos de tiempos de ciclo, fuerzas de cierre y distribución de presión dentro del molde. Este estudio permitirá optimizar el accionamiento en la fase de compresión, reduciendo el tiempo de ciclo y los costes de equipamiento. También se estudiará la influencia que ejerce la distribución inicial de la resina en la fase de compresión. Y por último, se compararán los requerimientos de CRTM frente a los procesos convencionales estudiados en bibliografía: RTM y CRTM sin hueco.

Para validar la calidad de las piezas fabricadas en el estudio de la fase de compresión, se analizará la porosidad de las piezas fabricadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

OB.4: Monitorizar el proceso de CRTM mediante los sensores de presión y caudal de la inyectora, así como de los sensores de presión integrados en el molde. El sistema permitirá estudiar el avance del frente de flujo, la presión interna y el curado durante todas las fases del proceso.

OB.5: Determinar el potencial del CRTM para una barra anti-intrusión de un automóvil.

Las contribuciones de esta tesis al conocimiento sobre el comportamiento del flujo de la resina dentro del molde son las siguientes:

- Se determina la influencia que ejercen los parámetros de inyección en el patrón de impregnación y se definen los parámetros críticos.
- Se determina la influencia de la distribución inicial de la resina de la inyección en la fase de compresión.
- Se identifican los criterios de optimización de las estrategias de compresión de accionamientos constantes (fuerza y velocidad).
- Se demuestra el potencial de secuencias de compresión variables y se valida en base a calidad de la pieza final.
- Se demuestra el potencial del CRTM frente a procesos convencionales como el RTM teniendo en cuenta: La fase de inyección, la estrategia de compresión, las fuerzas de cierre, las presiones internas generadas y la influencia de la temperatura.

La explotación del conocimientos generado permitirá:

- Definir las especificaciones del sistema de inyección (cantidad de inyectoras, volumen, tipo de control, configuración, etc.).

- Definir las especificaciones de la prensa (tonelaje, tipo de control, secuencias de compresión, etc.).
- Definir ventanas de proceso.
- Realizar estudios técnico-económicos (productividad, costes de fabricación, inversión...) de instalaciones completas para la fabricación de componentes mediante CRTM.

1.5 Organización de la memoria de la tesis

Esta memoria está organizada en 7 capítulos.

En el **capítulo 2** se describen las materias primas que se han utilizado durante el desarrollo de la tesis y se muestran las principales características relacionadas con la resina y el refuerzo.

En el **capítulo 3** se estudia la primera fase del CRTM, la fase de inyección, y se determina la influencia de cada variable de inyección sobre la distribución de la resina. El estudio se realiza utilizando tanto simulaciones en PAM-RTM, como ensayos experimentales.

En el **capítulo 4** se estudian diferentes estrategias de compresión del CRTM con el objetivo de optimizar el proceso en términos de equipamiento de prensa y tiempo de ciclo.

Debido a que para el estudio posterior es necesario interpretar las señales obtenidas de los sistemas de monitorizado para optimizar el proceso, en el **capítulo 5** se determina la técnica de control de proceso que se utilizará en las posteriores fases de procesado y la interpretación de la señal obtenida.

Para concluir con el estudio y mostrar el alto potencial del proceso, en el **capítulo 6** se realiza un estudio experimental para la optimización de la fabricación de un componente de automoción (barra anti-intrusión) fabricado mediante RTM y CRTM. Partiendo de los resultados obtenidos se realiza una comparación de costes de fabricación entre ambos procesos.

Por último, en el **capítulo 7** se presentan las conclusiones y aportaciones más significativas del trabajo y se proponen las líneas futuras.

Capítulo 2

Caracterización de las materias primas

En este capítulo se caracterizan las materias primas que se han utilizado durante el proyecto de investigación: La resina, el ligante y la preforma. Se describe la metodología utilizada para la caracterización de cada materia prima, y se determinan las constantes del modelo de cada fenómeno.

2.1 Caracterización de la resina

La resina que se ha utilizado es una resina epoxi de rápido curado (XB 3585) y endurecedor (Aradur® 3475), suministrada por Hunstman. La proporción empleada ha sido 100:21. Las constantes de los modelos de cinética de curado y viscosidad se obtiene de las curvas experimentales de conversión y viscosidad de dicha resina [69]. En la bibliografía se muestran las curvas, pero no los valores de las constantes, por lo que se han tenido que calcular.

2.1.1 Cinética de curado

Para la definición de la cinética de curado se ha utilizado el modelo de Kamal-Sourour [32,70]. La ecuación general para la resina con n componentes es la siguiente:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n C_i \alpha_i \quad (2.1)$$

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = K_i(T) \alpha_i^{m_i} (1 - \alpha_i)^{p_i} \quad (2.2)$$

donde $\frac{d\alpha_i}{dt}$ es la velocidad de la reacción para el componente i en s^{-1} , C_i es la cantidad de cada reacción,

α es la conversión en cada instante y k_i es una variable que se define con la ley de Arrhenius:

$$K_i = A_i \cdot \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \quad (2.3)$$

donde E_i es la energía de activación, R es la constante universal de los gases, y T es la temperatura absoluta de la resina. Las constantes A_i , m_i y p_i se determinan experimentalmente (tabla 3) a partir de ensayos de calorimetría diferencial de barrido (figura 12).

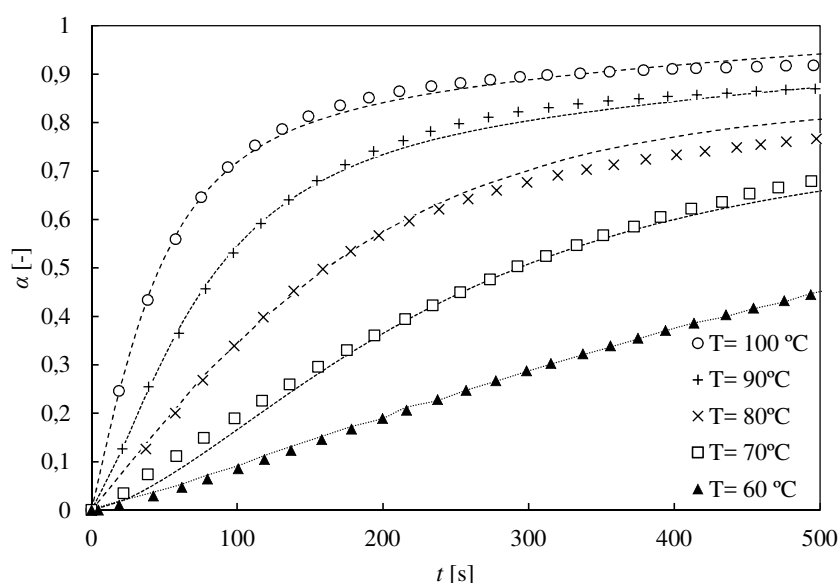


Figura 12: Evolución en el tiempo del grado de curado en función de la temperatura [69].

2.1.2 Reología

La viscosidad de la resina depende de la temperatura y del grado de conversión. Aumentar la temperatura disminuye la viscosidad pero acelera la reacción de curado, y la viscosidad aumenta con el grado de conversión, pudiendo llegar un momento en el que se sobrepasa el nivel de viscosidad admisible para impregnar la preforma (tiempo de gel, t_g). El modelo más ampliamente utilizado para determinar la viscosidad en función de la temperatura y el grado de conversión se rige por la siguiente ecuación [12]:

$$\eta(T, \alpha) = A_\eta \cdot \exp\left(\frac{E_\eta}{RT}\right) \quad (2.4)$$

donde E_η es la energía de activación,

$$E_\eta = a + b \cdot \alpha \tag{2.5}$$

y A_η el siguiente coeficiente:

$$A_\eta = a_0 \cdot \exp(-b_0 \cdot \alpha) \tag{2.6}$$

a , b , a_0 y b_0 son parámetros de material definidos en la tabla 3.

Como se ha comentado anteriormente, puede llegar un momento en el que la viscosidad sobrepase el nivel de viscosidad recomendable para impregnar la preforma, por ello el tiempo de llenado debe ser menor que el tiempo del gel, considerándose éste como el tiempo a partir del cual la viscosidad de la resina supera 1 Pa·s. En la figura 13a se muestra la viscosidad en función del tiempo, donde se define la viscosidad límite de impregnación. Partiendo de este límite, se obtiene la relación entre tiempo de gel (t_g) y la temperatura de curado (T_c) (figura 13b).

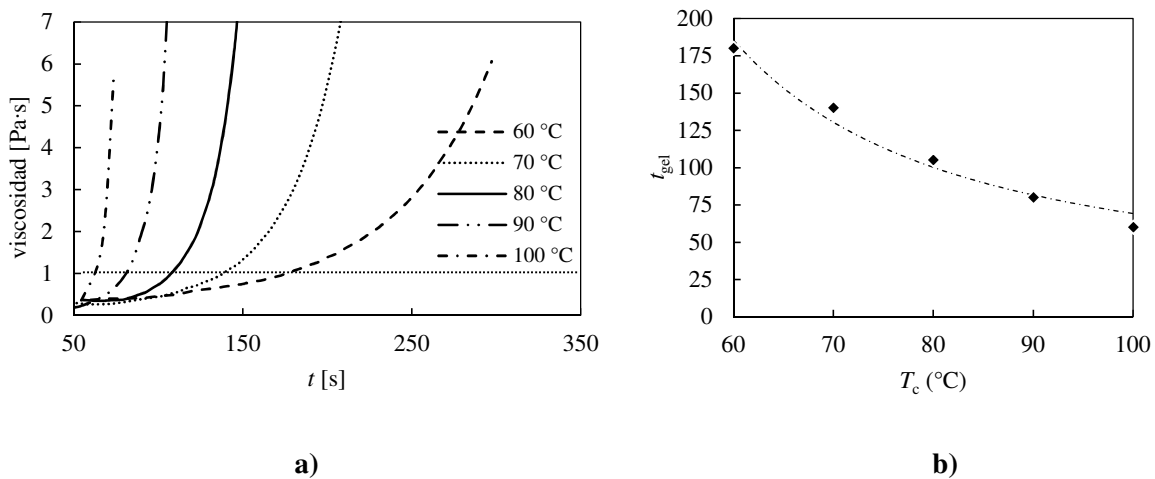


Figura 13: Viscosidad: a) Viscosidad en función del grado de curado y temperatura [69], b) tiempo de gel, según la temperatura de curado.

La ecuación que gobierna el tiempo de gel es la siguiente:

$$t_g = A_{gel} \exp\left(\frac{E_{gel}}{RT_c}\right) \tag{2.7}$$

donde E_{gel} es la energía de activación, A_{gel} es la contante cinética y R es la contante universal de gases.

Tabla 3: Constantes del modelo de curado, viscosidad y tiempo de gel para un rango de temperaturas entre 60–110 °C.

Cinética de curado		Reología		Tiempo de gel	
A_i	3,17	a	2797	A_{gel}	15,84
E_i	83,705	b	9631	E_{gel}	1227
m_i	0,55	a_0	0,0001201		
p_i	2,28	b_0	-0,3461		

La figura 14 muestra la relación de la viscosidad, grado de curado y temperatura, donde se define el límite de viscosidad admisible.

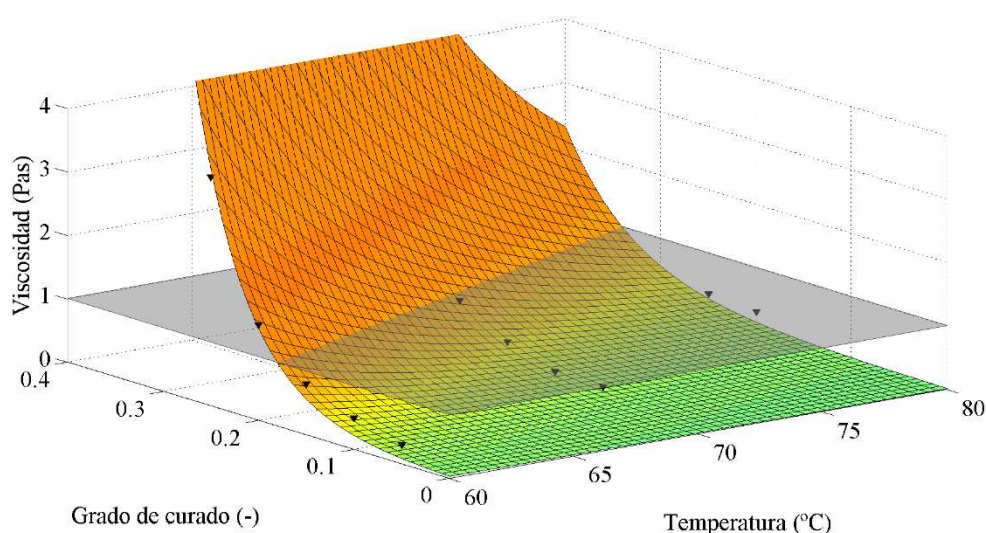


Figura 14: Viscosidad en función del grado de curado y temperatura.

2.2 Selección de la temperatura de procesamiento del ligante

El objetivo del ligante es facilitar la manipulación de la preforma. En el caso del CRTM a pesar de la manipulación se debe obtener un espesor de preforma robusto, ya que en la fase de inyección la cota de la preforma tiene gran influencia. El método de procesamiento es el siguiente; se cortan los tejidos (en nuestro caso seis telas), se espolvorean 10 g/m² de Araldite LT 3366 BD sobre el tejido, se calienta en el horno y por último, cuando el ligante se funde, se compacta con un utillaje cuya temperatura es de 23 °C.

A fin de obtener un rango de temperatura óptimo para el cual el ligante muestra mayor adhesión, se ha analizado su comportamiento térmico mediante ensayos dinámicos de calorimetría diferencial de barrido (DSC). La temperatura de inicio es 25 °C y se calienta hasta 250 °C a 10 °C/min. Los ensayos del DSC

(figura 15) muestran que el ligante se empieza a fundir a 80 °C, pero lo hace en un rango que va hasta 200 °C. Por ello, se ha realizado un estudio morfológico del ligante procesando a diferentes temperaturas.

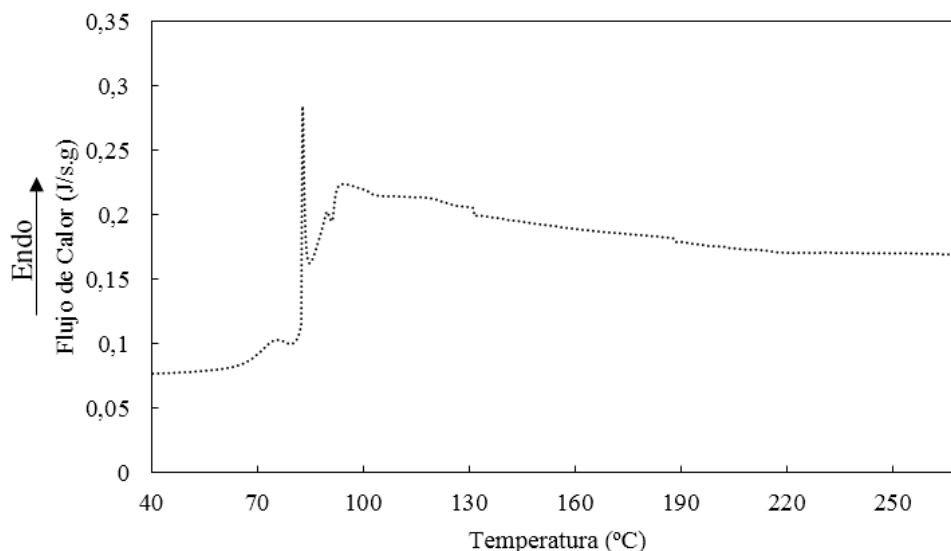


Figura 15: Ensayo dinámico de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

En la figura 16 se puede ver que por debajo de los 100 °C, el ligante sigue en su estado sólido inicial, mientras que a partir de este umbral, a medida que la temperatura aumenta, la capacidad de impregnación mejora, lo que se asocia a su menor viscosidad. Comparando los resultados obtenidos en el DSC y en calentamiento de horno (estudio morfológico), se puede ver cómo en este último, la temperatura de fusión del ligante es mayor. Esto se debe a que el DSC asegura que todo el material está a la temperatura de consigna; en cambio, en los ensayos de horno, a pesar de que la consigna del horno muestre dicha temperatura, la muestra probablemente esté a una temperatura menor. Sabiendo que la realidad se asemeja más a la técnica del horno, y en base a la figura 16, se analiza la temperatura a la que el ligante muestra mayor área de contacto. Para que ejerza de ligante, a pesar de tener en cuenta el área de contacto, también se asegura que no haya entrado dentro de la mecha, por lo que se decide procesar el ligante a 150 °C durante 120 s.









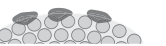

Temperatura [°C]	50	75	100	150	175	200
Tamaño de gota [mm]						
Eje X	0,32	0,30	0,28	0,29	0,28	0,26
Eje Y	0,28	0,32	0,23	0,61	0,92	0,96
Vista superior						
						1 mm
Esquema sección transversal						

Figura 16: Estudio morfológico: Comportamiento del ligante a diferentes temperaturas.

2.3 Caracterización de la preforma

En este apartado se describen los métodos de caracterización que se han empleado para estudiar el comportamiento de la preforma a compresión y obtener las constantes de la permeabilidad de la preforma en función del contenido en fibra [71].

La fibra que se ha utilizado es un tejido biaxial *Non-Crimp Fabric* (NCF) de fibra de carbono de alta resistencia de 50k, referencia HPT 610 C090, siendo la orientación de la fibra de 0/90 equilibrado y densidad superficial de 610 g/m² (figura 17). La preforma está compuesta por 6 telas simétricas [0/90]_{3s}. Entre cada intercara se espolvorea el ligante, como se ha descrito en el apartado anterior.

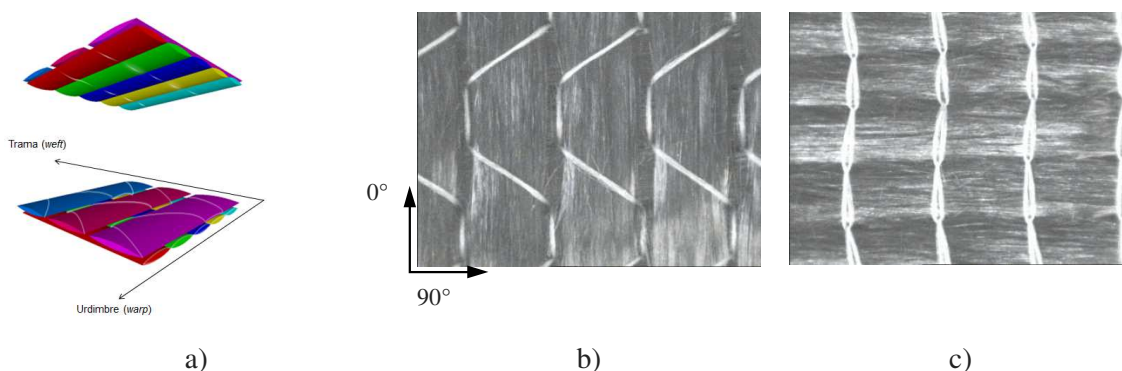


Figura 17: Definición de las direcciones del tejido: a) Esquema del tejido 3D b) vista superior c) vista inferior.

2.3.1 Compresibilidad

Como se ha comentado en el enmarque científico-tecnológico, el comportamiento de la mecánica de las preformas es un tema que suscita gran interés. En la primera fase del CRTM, antes de la inyección, se asume que la preforma y el hueco tienen un espesor definido. Por ello, para la tecnología de preformado

es necesario realizar un estudio de la recuperación de la preforma seca y analizar la influencia que ejerce el ligante en la posterior recuperación.

En este apartado se describen los parámetros que afectan en la compresibilidad de la preforma, los métodos de caracterización que se han empleado para analizar la respuesta de la preforma en diferentes condiciones de ensayo y se concluye definiendo los parámetros más influyentes en la respuesta de la preforma.

En la figura 10 se muestra el comportamiento visco-elástico de la preforma [37,72]. Los parámetros influyentes, de los cuales se deben controlar, se muestran en la tabla 4. Éstos se dividen en tres grupos; influyentes de la materia prima (tipo de tejido y aditivo que ejercen como ligante “*Binder*”, y temperatura a la que se prepara la muestra), configuración de la preforma (número de tejidos por la que está compuesta la preforma y orientación de las fibras) y por último las condiciones de procesado (definidas gráficamente en la figura 10).

Tabla 4: Parámetros influyente en la compactación.

Materia prima	Tipo de tejido
	Ligante “ <i>Binder</i> ”
	Temperatura de procesado de ligante
Preforma	N_L : Numero de telas
Condiciones de procesado	h_i = Espesor inicial (antes del ensayo)
	h_1 = Espesor de compactación (Contenido de fibra máx.)
	Recu. Elástica
	h_0 = Espesor final
	Recu. Viscosa
	Def. permanente
	t_c = tiempo de compactación
	t_d = tiempo de descarga
	v_c = Velocidad de compresión
v_d = velocidad de descarga	
N_c : Numero de ciclos	

Método experimental

Se utiliza una máquina universal de ensayos (Instron 3369) equipada con una célula de carga de 100 kN. Las dimensiones de la preforma son 140×140 mm². Para poder comprimir la preforma de forma homogénea, se ha colocado una placa de aluminio de 150×150×3 mm³ sobre la misma, que debido a su peso ejerce una precarga de 300 Pa. Esta precarga asegura una deformación inicial similar en las diferentes muestras. Para conocer el valor del espesor de la preforma, se controla el desplazamiento de la placa de aluminio en diferentes puntos mediante dos láseres de control de desplazamiento (High-accuracy CCD Laser Displacement Sensor LK-G3000 series) tal y como se muestra en la figura 18. Mientras se lleva a cabo este ensayo, se registra la fuerza en cada momento, obteniendo así el perfil de fuerzas por cada nivel de compactación.

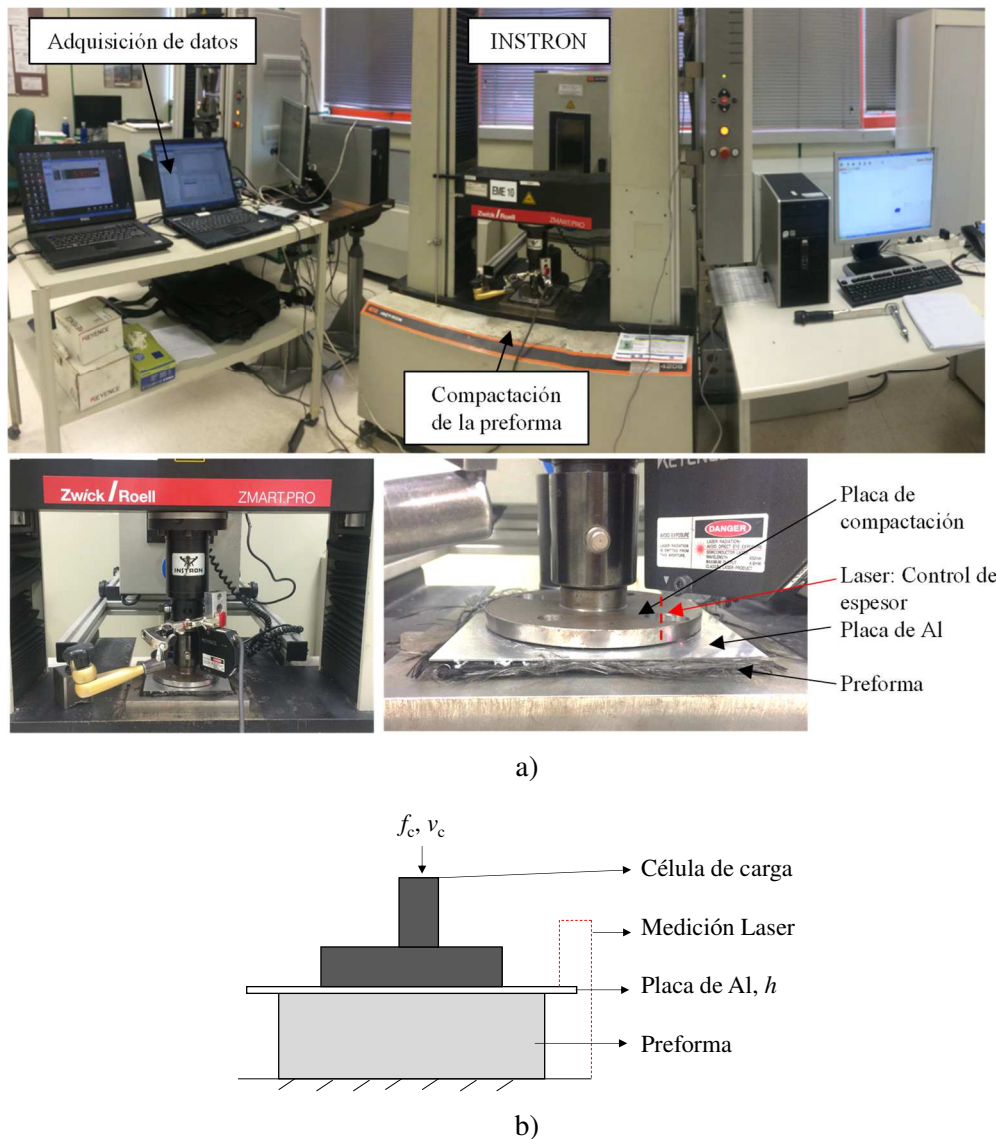


Figura 18: Método de caracterización de la preforma: a) Imagen del ensayo experimental, b) diagrama del ensayo.

Una vez colocada la preforma se lleva a cabo la etapa de carga, manteniendo el espesor de compactación durante un periodo que corresponde al tiempo necesario para solidificar el ligante. En esta fase es donde se aprecia la relajación de la preforma. Mediante el láser se mide el desplazamiento de la preforma nada más retirar la fuerza de compresión. Lo primero que se observa es una recuperación instantánea, que representa la respuesta elástica de la preforma (*spring-back*). Seguido comienza la recuperación visco-elástica, y por último, la curva tiende a un valor asintótico que representa la deformación permanente (figura 10).

En la tabla 5 se muestran los parámetros analizados y el rango de los valores estudiados. Basándose en los valores medios por cada parámetro estudiado, se determina un ensayo de referencia. Las variables estudiadas son la velocidad de compactación (v_c) comprendida entre 10 y 100 mm/min; espesor de compactación de la preforma (h_1) compactando a 40, 50, 60 y 65%; tiempo de compactación (t_c) analizando desde 10 a 50 s; número de telas de la preforma (N_c) y la influencia del ligante en la preforma.

Tabla 5: Condiciones de los ensayos de compresión. En negrita se define el rango de valores estudiado por cada variable.

	v_c [mm/min]	h_1 [mm]	t_c [s]	N_c
Ref.	50	50	20	6
v_c	10	50	20	6
	50	50	20	6
	100	50	20	6
h_1	50	40	20	6
	50	50	20	6
	50	60	20	6
	50	65	20	6
t_c	50	50	10	6
	50	50	20	6
	50	50	50	6
N_L	50	50	20	2
	50	50	20	4
	50	50	20	6

Fuerzas de compactación

Como se ha comentado anteriormente, la primera etapa del ensayo es la carga, donde la preforma se compacta hasta un volumen en fibra definido. Las fuerzas pueden variar según la velocidad de compactación [37], por lo que para poder dimensionar el equipamiento de preformado, es necesario

estudiar las fuerzas de compactación obtenidas. La figura 19 muestra las fuerzas máximas generadas por cada velocidad de compactación. A pesar de compactar a altas velocidades, no se observa ningún incremento de fuerza destacable.

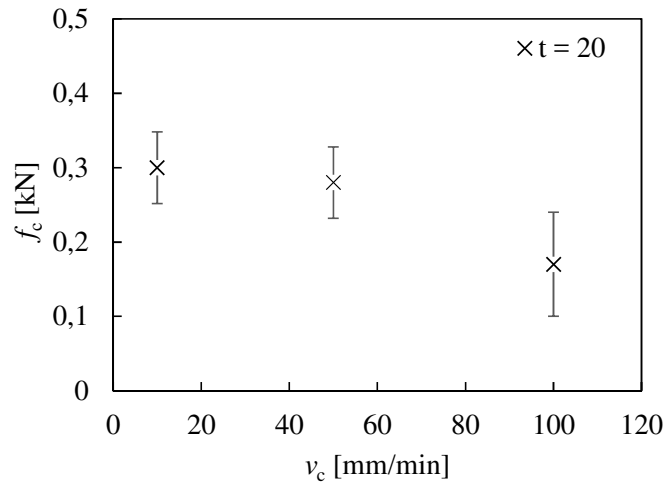
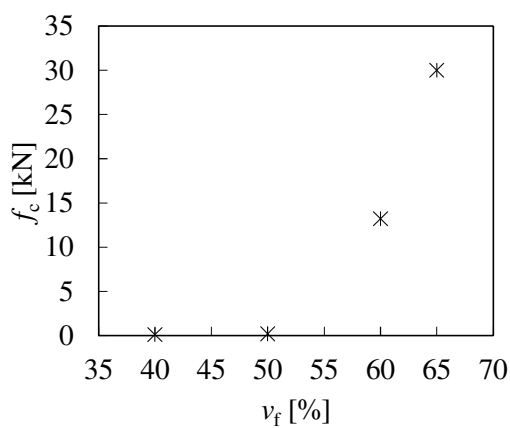
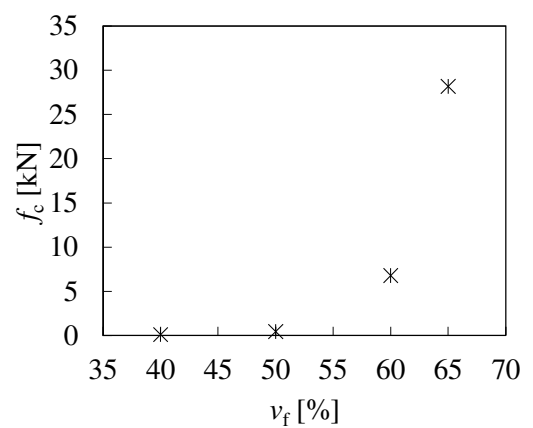


Figura 19: Fuerza de compresión: 10, 50 y 100 mm/min.

Una vez analizada la influencia de la velocidad de compactación, se analizan el resto de los parámetros del ensayo. La figura 20a y b muestran el nivel de compactación, la figura 20c y del tiempo de compactación, y finalmente la figura 20e y f el número de telas, con y sin ligante. El parámetro que mayor influencia tiene en la fuerza, es el nivel de compactación. Cuanto mayor sea el contenido de fibra final, mayor es la fuerza pico. En cambio, el tiempo de compactación y el numero de telas no influyen. En cuanto al ligante, no se aprecia ninguna tendencia significativa.



a)



b)

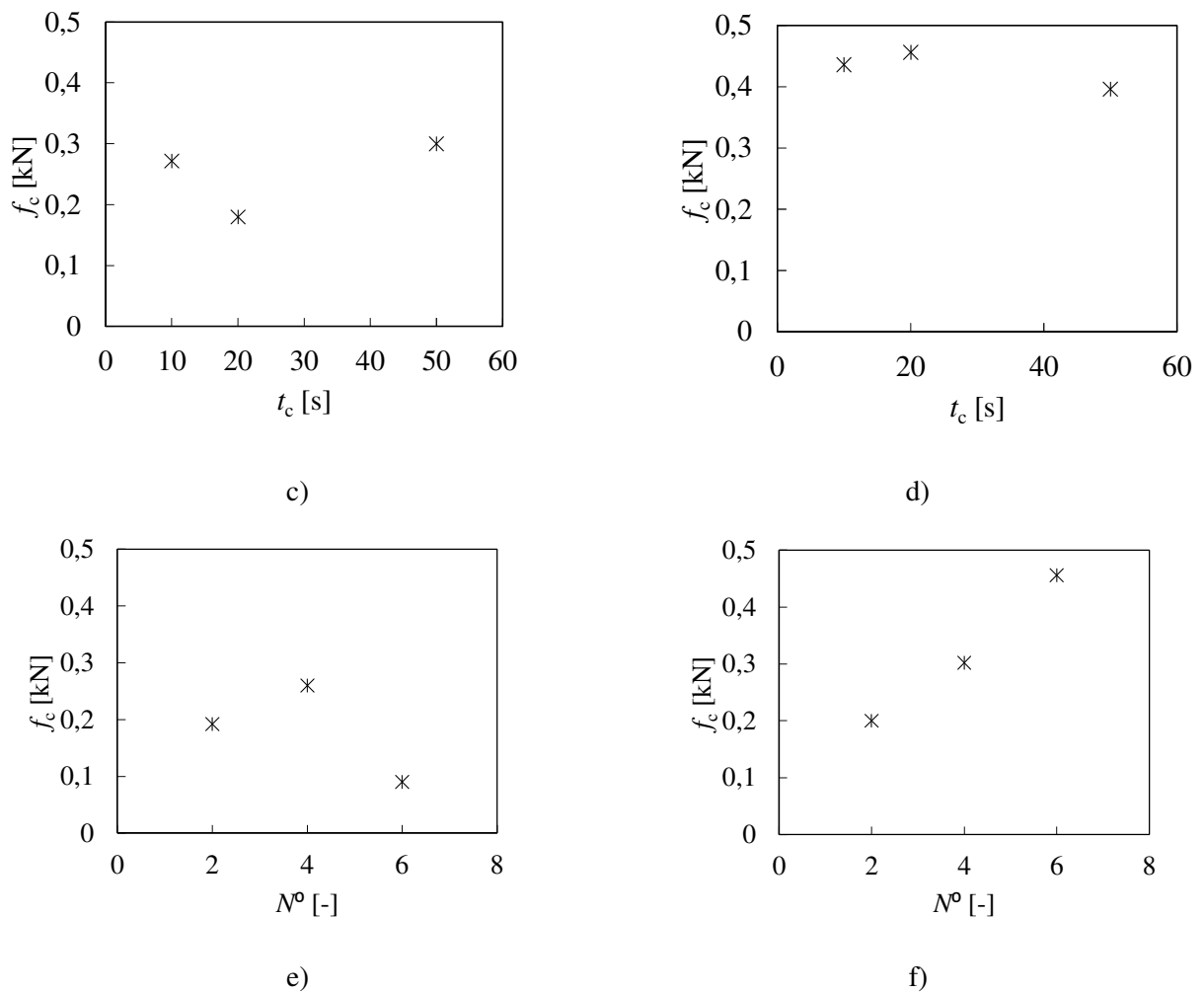


Figura 20: Fuerzas de compresión en función del volumen en fibra: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante; fuerzas de compresión en función del tiempo de compactación c) sin ligante d) con ligante; y fuerzas de compresión en función del número de telas de la preforma e) sin ligante, y f) con ligante.

Recuperación viscoelástica

En este apartado se estudia la recuperación del espesor de la preforma después de la descarga. Debido a que el primer parámetro influyente es la velocidad de compactación, la figura 21 muestra el comportamiento de la preforma a diferentes velocidades de compactación. Las velocidades estudiadas son 10 mm/min, 50 mm/min y 100 mm/min. A diferencia de los resultados de fuerza, la velocidad de compactación influye en la recuperación de la preforma. Se puede ver, que cuanto menor es la velocidad de compactación, la deformación permanente es mayor. En los ensayos realizados a partir de ahora, la velocidad de compactación se mantiene constante a 50 mm/min.

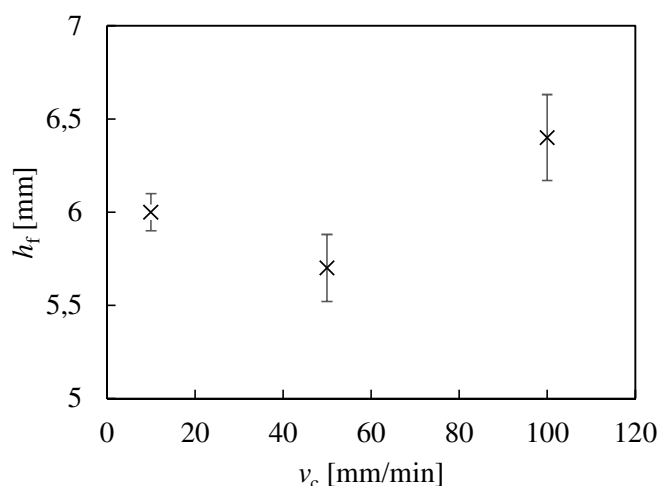


Figura 21: Espesor final de la recuperación de la preforma en función de la velocidad de compresión.

Una vez analizada la influencia que ejerce la velocidad de compactación, se analiza el comportamiento de la preforma con y sin ligante. En la figura 22 se puede ver cómo a medida que el tiempo de compactación aumenta, la deformación permanente crece, reduciéndose sobre todo la recuperación elástica. Se puede ver cómo en los ensayos con ligante la deformación permanente es mayor debido a la adhesión que ejerce éste, siendo el tiempo de compactación un parámetro influyente.

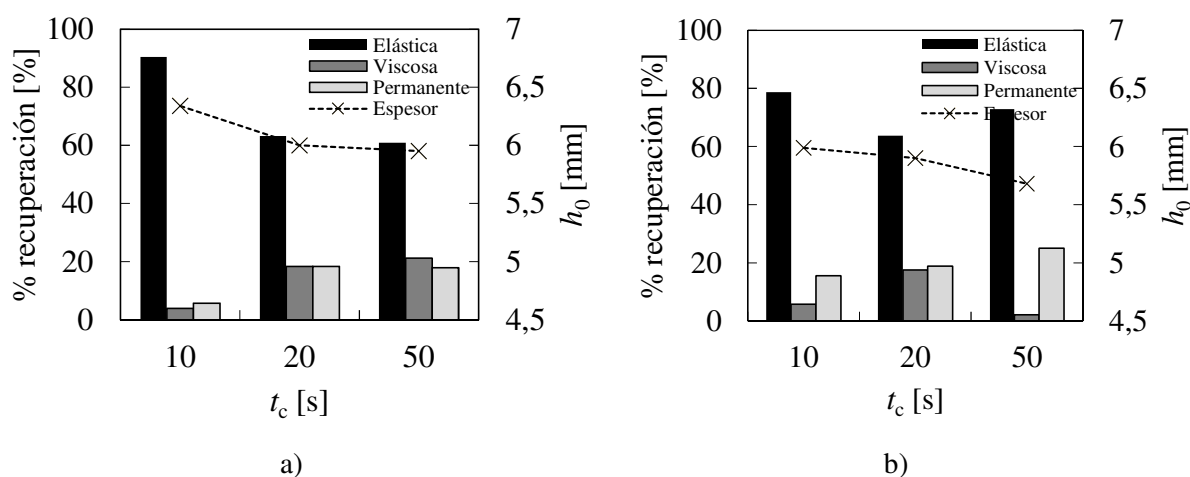


Figura 22: Influencia del tiempo de compactación: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante.

En este apartado se analiza únicamente el primer ciclo de compactación, por lo que todavía la preforma se mantiene caliente y dependiendo del tiempo de compactación que se le aplique, puede que el ligante todavía no haya llegado a solidificar, modificando su capacidad de adhesión. Para poder estimar el estado del ligante, en la figura 23 se muestra la recuperación del espesor en función del tiempo de compactación y al mismo instante se registra la temperatura de la preforma (T_p). Se define la temperatura en: El instante de la descarga; tiempo de compactación de 10 s a 95 °C; tiempo de compactación de 20 s a 70 °C y 50 s a 45 °C. La diferencia de la temperatura durante la descarga entre el mayor tiempo de

compactación ($t_c=50$ s) y el menor ($t_c=10$ s) es de $50\text{ }^\circ\text{C}$, lo que influye directamente en la capacidad de adhesión y consecuentemente en la respuesta del espesor de la preforma. Se puede ver que a medida que el tiempo de compactación aumenta, la deformación permanente también es mayor, lo que se atribuye a la presencia del ligante.

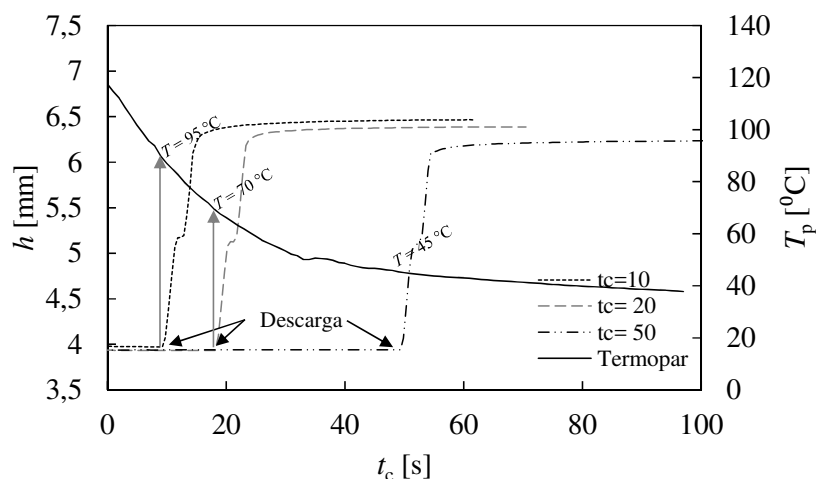


Figura 23: Temperatura de la preforma en el instante de la descarga.

En la figura 24 se muestra la influencia que ejerce el nivel de compactación de la preforma respecto a la recuperación del espesor. Cuanto mayor es el contenido de fibra en la compactación, mayor es la deformación permanente. Analizando la influencia que ejerce el ligante (Figura 24b) se puede ver que cuando se compacta a más del 50%, el espesor final de las probetas con ligante disminuye más que sin él. Esto se puede deber a que el ligante necesita un nivel de compresión mínimo para que se dé la adhesión. Por lo que, cuando se utiliza el ligante se debería de compactar como mínimo hasta un 50% de contenido final, para que adhiera.

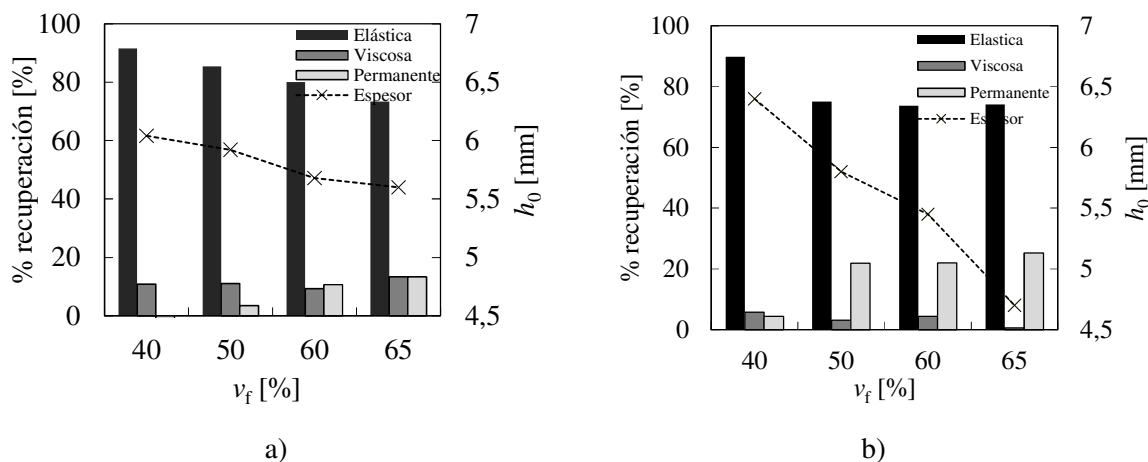


Figura 24: Recuperación de la preforma en función del volumen en fibra compactado: a) Preforma sin ligante y b) preforma con ligante.

Por último se analiza la influencia del número de telas. Para ello, en la figura 25 se muestra la respuesta de la preforma en función del contenido de fibra final. Se puede ver que cuanto mayor es el número de telas, mayor es el contenido de fibra final obtenido, probablemente debiéndose al *nesting* y alineamiento de las fibras dentro de la mecha.

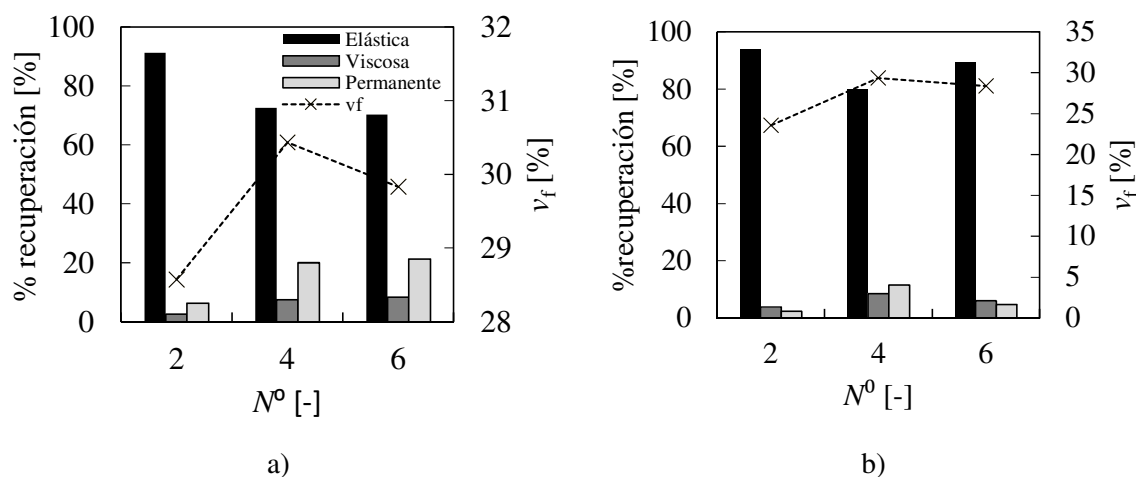


Figura 25: Influencia del número de telas en la preforma; a) preforma sin ligante y b) preforma con ligante.

2.3.2 Permeabilidad

En el CRTM la resina fluye en el plano (K_{xx} y K_{yy}) y a través del espesor (K_{zz}), por lo que es necesario caracterizar la permeabilidad en función del contenido en fibra tanto en el plano como en la dirección transversal, obteniéndose el tensor de permeabilidad:

$$\mathbf{K}(v_f) = \begin{pmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{pmatrix}$$

Para obtener la matriz de permeabilidad en un tejido anisótropo, es decir con diferentes permeabilidades en la dirección *warp* 0° y *weft* 90° los ensayos que se realizan son: tres en direcciones del plano (0° , 90° y diagonal 45° (figura 26)) y una cuarta perpendicular a la preforma.

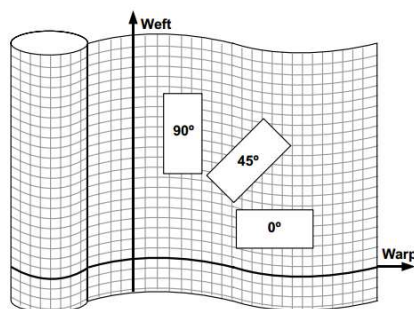


Figura 26: Direcciones de ensayos de permeabilidad en el plano para tejidos anisótropos [73].

Los ensayos realizados para la caracterización de la permeabilidad del tejido se muestran en la tabla 6. La permeabilidad del tejido en cada dirección se ha caracterizado para dos condiciones diferentes; sin ligante y con 10 g/m².

Tabla 6: Listado de los ensayos de permeabilidad.

Configuración		En el plano			Fuera de plano
		0°	90°	45°	
Base	Tejido biaxial, [0/90] ₆	K_{0°	K_{90°	K_{45°	K_z
Lig.10 g/m ²	Base + 10 g/m ² ligante	$K_{0^\circ L}$	$K_{90^\circ L}$	$K_{45^\circ L}$	K_{zL}

Los resultados experimentales se ajustan con el modelo de Carman-Kozeny (ecuación 2.8), donde k_0 es una constante empírica que depende de la arquitectura de cada tejido, que se obtiene ajustando los resultados experimentales.

$$k_{ii} = k_0 \cdot \frac{(1 - v_f)^3}{v_f^2} \tag{2.8}$$

Permeabilidad en el plano

Se ha diseñado y fabricado un banco de ensayos para la caracterización de la permeabilidad en función de la metodología de ensayo propuesto por Vila *et al.* [74]. Se ha colocado la preforma entre dos moldes rígidos. Una vez que el molde está cerrado con el espesor inicial, se inyecta el aceite (aceite de silicona, referencia Siameter 200 PMX, con una viscosidad a temperatura ambiente de 0,1 Pa·s) en el molde de manera que el frente de flujo vaya perpendicular a la dirección del ensayo y se espera hasta que la preforma esté totalmente saturada (figura 27). El cálculo de permeabilidad en dirección paralela al frente del flujo se basa en la ley de Darcy. Controlando el gradiente de presión (se mide la caída de presión mediante dos sensores), la viscosidad del fluido (posterior medición en el viscosímetro o uso de un fluido calibrado) y la velocidad del frente del flujo (control de caudal mediante la inyectora) se obtiene

el valor de la permeabilidad. Cada ensayo se ha repetido en 3 ocasiones para cada condición. Esta técnica posibilita la obtención de una medida de permeabilidad continua, partiendo de la misma preforma para diferentes volúmenes en fibra.

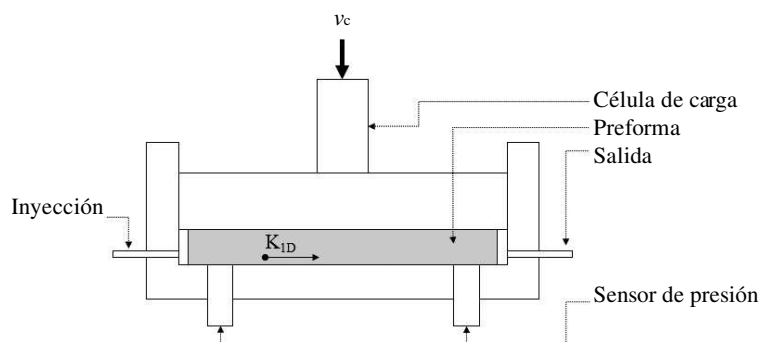


Figura 27: Banco de ensayos: Permeabilidad en el plano.

La evolución de la permeabilidad en el plano, k_{ii} , en función del contenido en fibra v_f , se grafica en la figura 28. La tabla 7 muestra las constantes del modelo de Carman-Kozeny, en cada dirección de ensayo.

Según la figura 29 la permeabilidad en la dirección 90° es mayor que en la dirección 0° , tanto con ligante o sin él. Esto se debe a que hay más huecos en la dirección de 90° debido a la estructura del tejido. Otro de los fenómenos que altera la permeabilidad es el ligante, ya que la presencia aumenta la permeabilidad en las tres direcciones. Una de las posibles razones se debe a que la adhesión del ligante dificulta el acomodamiento de las fibras, evitando que se de el *nesting*. Consecuentemente los canales del tejido original no se reducen tanto y la permeabilidad es mayor.

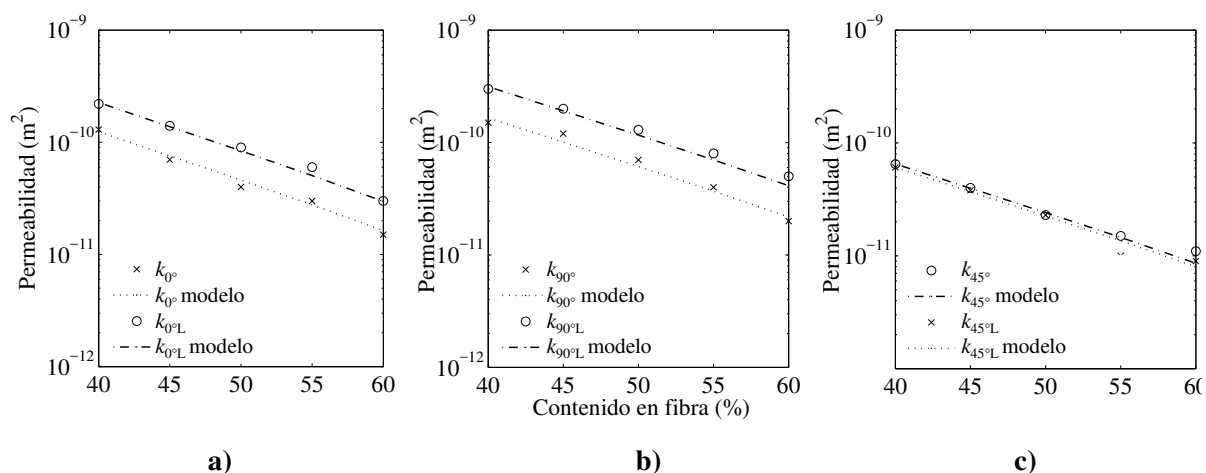


Figura 28: Permeabilidad en el plano: a) 0° , b) 90° y c) 45° .

Permeabilidad fuera del plano

El diseño y fabricación del banco de ensayos para determinar la permeabilidad a través del espesor se basa en la metodología propuesta por Ouagne *et al.* [75]. La preforma se coloca entre dos moldes rígidos perforados y una vez que el molde está cerrado con el espesor inicial, se inyecta el aceite desde la parte inferior del molde de manera que el frente de flujo vaya en la dirección deseada y se espera hasta que la preforma esté totalmente saturada (figura 29). El cálculo de permeabilidad en dirección paralela al frente del flujo también se basa en la ley de Darcy. Por eso, al igual que en el ensayo de permeabilidad en el plano, controlando el gradiente de presión, la viscosidad del fluido y la velocidad del frente del flujo, se obtiene el valor de la permeabilidad a través del espesor. Al igual que la técnica empleada para los ensayos de permeabilidad en el plano, se obtiene la medida de permeabilidad de forma continua, partiendo de la misma preforma para diferentes volúmenes en fibra.

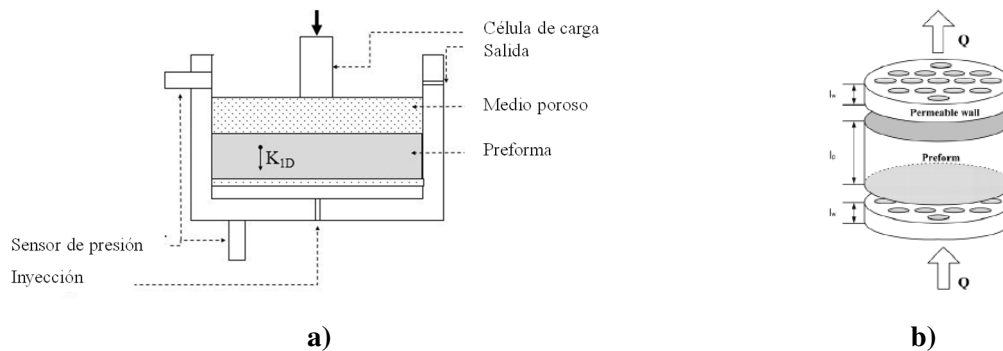


Figura 29: Banco de ensayos: Permeabilidad a través del espesor.

La figura 30 muestra la evolución de la permeabilidad a través del espesor, K_{zz} , en función del contenido en fibra (v_f).

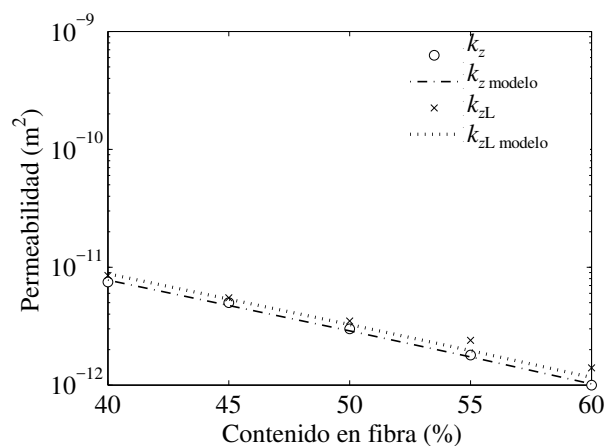


Figura 30: Permeabilidad a través del espesor.

Los resultados demuestran que la diferencia de permeabilidades en el plano y a través del espesor es de 2 órdenes de magnitud, fenómeno que influirá en la posterior fase de inyección y compresión.

Tabla 7: Constantes del modelo de Carman-Kozeni.

	En el plano [mm ²]		A través del espesor [mm ²]
k_{0°	$9,193 \cdot 10^{-11}$	k_{zz}	$5,76 \cdot 10^{-12}$
$k_{0^\circ L}$	$1,674 \cdot 10^{-10}$	k_{zzL}	$6,521 \cdot 10^{-12}$
k_{90°	$1,225 \cdot 10^{-10}$		
$k_{90^\circ L}$	$2,325 \cdot 10^{-10}$		
k_{45°	$4,509 \cdot 10^{-11}$		
$k_{45^\circ L}$	$4,829 \cdot 10^{-11}$		

2.4 Conclusiones

En este apartado se han caracterizado todos los materiales utilizados durante el proyecto de investigación. En primer lugar, se determina la cinética y reología de la resina, y se determinan las condiciones de procesado del ligante. Por otro lado, en cuanto a la preforma, se ha analizado su comportamiento a compresión. Se han estudiado las variables influyentes de la compresibilidad de la preforma a compresión en términos de fuerza de compresión y respuesta del espesor de la preforma. En lo que se refiere a la permeabilidad, se ha fabricado un banco de permeabilidad en la dirección del plano y a través del espesor. Se han obtenido los valores de permeabilidad con ligante y sin él en las direcciones 0°, 90°, 45° y a través del espesor en función del volumen en fibra.

A continuación se enumeran las conclusiones más significativas de la caracterización del material:

- Se han obtenido las constantes de la resina para las ecuaciones de cinética de curado (ecuación 2.1) y de la reología (ecuación 2.4).
- Se ha determinado que las condiciones óptimas de procesado del ligante son 150 °C y 120 s.
- Para controlar el espesor de la preforma que afecta a la altura del hueco, se ha estudiado el comportamiento viscoelástico de la preforma tanto en la fase de compactación como de recuperación. Durante la compactación el factor más determinante es el porcentaje de fibra final, mientras que en la recuperación, el tiempo que se mantiene la preforma compactada también influye en la misma medida.
- La permeabilidad en el plano del NCF es similar en las dos direcciones principales, y la presencia del ligante aumenta la permeabilidad debido a que evita al acomodamiento de las fibras (*nesting*).

Capítulo 3

Fase de inyección

El objetivo de este capítulo es determinar la influencia de los parámetros de material y proceso que afectan en el patrón de flujo durante la etapa de inyección del proceso CRTM, tanto cualitativa como cuantitativamente, en base a modelos de simulación y ensayos experimentales.

3.1 Descripción de los parámetros analizados

La geometría del demostrador que se ha definido para el análisis de la fase de inyección es un rectángulo con un punto de inyección en el centro de la pieza y dos puntos de vacío en los extremos. La figura 31a muestra la geometría estudiada. Las dimensiones del rectángulo son 150×260 mm. El sistema de coordenadas del modelo se define con el eje z en la dirección del espesor de la pieza. Debido a la simetría de la pieza con respecto a los ejes x e y , sólo se ha modelado una cuarta parte de la pieza para reducir el coste computacional. Para analizar el patrón de flujo, se obtienen tres mediciones (figura 31b); Longitud de impregnación en la dirección z (L_z), longitudes de impregnación en el plano (parte superior, L_{xt} , L_{yt} y vista inferior, L_{xb} , L_{yb}) y volumen impregnado (V_i).

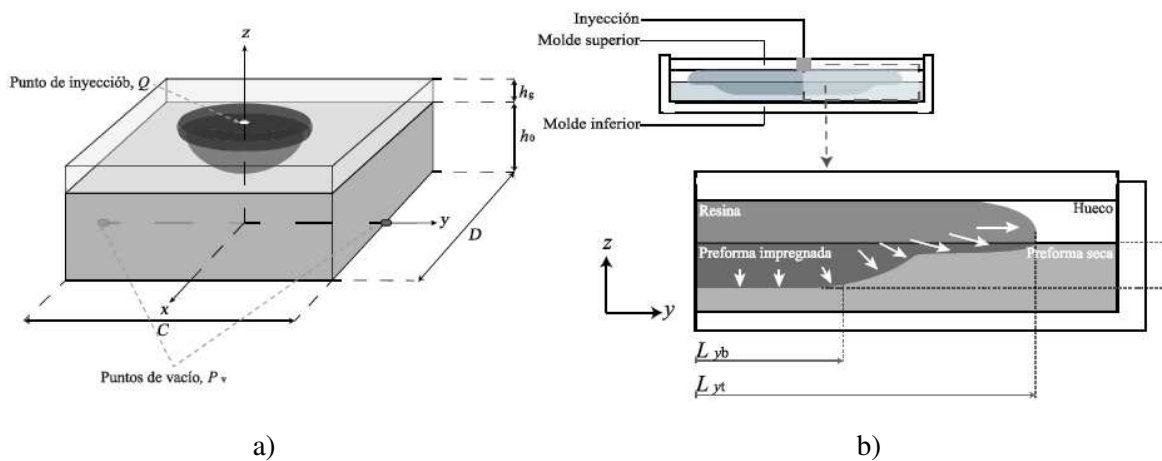


Figura 31: Esquema de las variables de inyección: a) Geométricas b) Vista transversal de la muestra.

Los parámetros del material y proceso a considerar en este estudio se describen en la Tabla 8 y se dividen en dos grupos: 1) parámetros relacionados con el diseño, influenciados por la geometría final de la pieza; y 2) parámetros de procesado. Las propiedades finales de la pieza son fijas, mientras que los parámetros relacionados con la resina y las condiciones de inyección varían.

Tabla 8: Parámetros del proceso CRTM: Parámetros influenciados por la pieza final y parámetros de procesado divididos en influyentes en la fase de inyección y compresión.

Diseño de pieza		Proceso		
Dimensión en eje x	C	Fase de inyección	Altura del hueco	h_g
Dimensión en eje y	L		Contenido de fibra inicial	v_{fi}
Contenido de fibra final	v_{ff}		Presión y caudal de inyección	Q, P
Viscosidad	μ		Volumen de resina inyectada,	V_r
		Fase de compresión	Compresión: Control de velocidad o fuerza	v_c, f_c
			Vacío	[-]
			Temperatura de curado,	T_c

Debido al gran número de variables de entrada y salida que pueden afectar en el proceso (definidos en la tabla 8), se ha utilizado un diseño de experimentos (DOE) fraccionado 2^{k-n} . Estos diseños se emplean cuando las variables que se tienen son muchas (>4), siendo este el caso. En estos experimentos se separan las variables que influyen de las que no, y se define el rango óptimo de trabajo. El diseño de experimentos se ha aplicado utilizando los resultados de la simulación. La tabla 9 muestra el rango de valores analizados para cada parámetro. El rango de μ , v_{fi} , y Q se ha definido en base a un estudio similar

de la fase de inyección del CRTM realizado por Merotte *et al.* [16]. El porcentaje de rebosadero (p_o) se refiere al exceso de volumen de resina inyectado, tomando como referencia el volumen de resina en el compuesto final. Un valor de $p_o = 1$ implica que el volumen de resina inyectado es el volumen exacto requerido para impregnar la preforma, sin generar residuo, y un valor p_o de 1,2 significa que el volumen de resina inyectado es 20% mayor que el mínimo. El último parámetro analizado es el porcentaje de la altura del hueco (p_g), que es el volumen del hueco entre la superficie de la preforma y la pared superior del molde. Cuando el valor de p_g es 1, significa que el volumen del hueco es equivalente al volumen de resina en la pieza final, y 1,2 significa que el volumen del hueco es 20% mayor que el volumen de resina en la pieza final.

Tabla 9: Rango de las variables de inyección estudiadas.

Factor	Nivel		
	1	2	
μ	0,05	0,5	Pa s
v_{fi}	40	45	%
Q	200	500	cm ³ /min
p_o	1	1,2	
p_g	1 ($h_g = 1,44$ mm)	1.2 ($h_g = 1,72$ mm)	

3.2 Modelo de simulación de la inyección de CRTM

Para simular la etapa de inyección del CRTM se ha utilizado el módulo de RTM de PAM-RTM. Los cálculos del flujo se basan en la ley de Darcy y en la ecuación de continuidad, que han sido ampliamente utilizados por los investigadores para describir los mecanismos de flujo durante el proceso de RTM [5].

En el proceso de RTM, para estudiar el frente de flujo, la hipótesis de que la velocidad del flujo a través del espesor se puede considerar uniforme es válida, lo que posibilita la utilización de una malla 2D. Sin embargo, en el proceso CRTM, debido a que existe un flujo preferencial en el hueco, el flujo a través del espesor no es uniforme y se deben usar elementos 3D. Por consiguiente, el modelo que se ha utilizado es un modelo en 3D con elementos rígidos.

En las simulaciones de llenado de medios porosos en PAM-RTM, se ha visto que el tamaño de la malla tiene una gran influencia. Para seleccionar el tamaño de los elementos, así como para verificar las interpolaciones y técnicas de discretización, se ha llevado a cabo un estudio de convergencia (figura 32). Para modelos mallados con elementos de gran tamaño, en los que hay baja resolución, el nivel de

impregnación no se asemeja a la realidad. En cambio, a partir de 80000 elementos, el nivel de impregnación tiende a estabilizarse, pero se aprecia un elevado aumento del coste computacional, lo que confirma la existencia de un umbral óptimo. El análisis de convergencia realizado con diferentes tamaños de malla ha mostrado que 1,5 mm es el tamaño óptimo para los elementos tetraédricos lineales, por lo que el modelo se ha mallado con 83228 elementos. El modelo se divide en dos partes: Hueco (h_g), y preforma inicial (h_i). En base al estudio de convergencia, la malla del hueco contiene 27742 elementos tetraédricos lineales, y la preforma contiene 55486 elementos tetraédricos lineales.

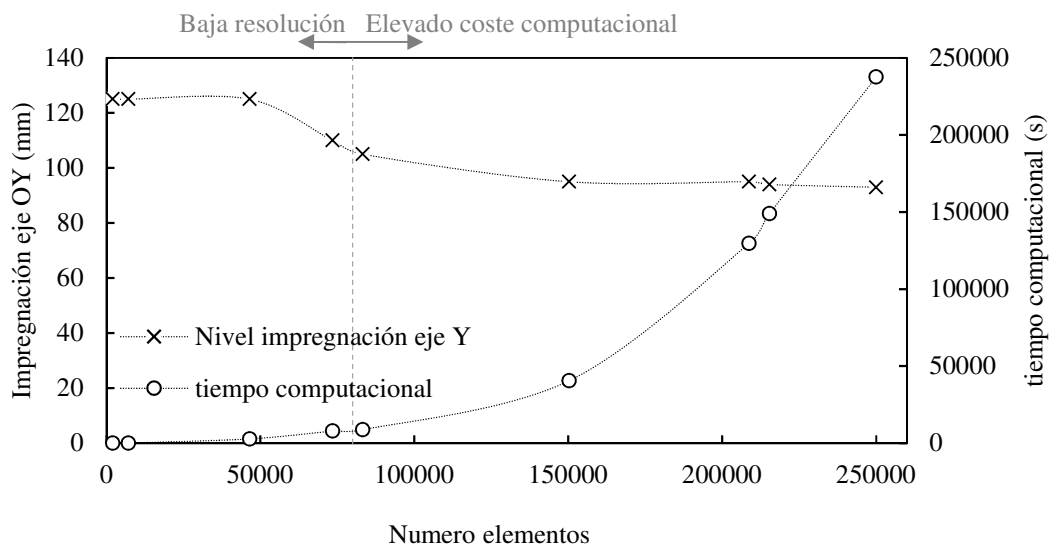


Figura 32: Estudio de convergencia

En cuanto a las condiciones de contorno, la resina se inyecta en el punto central con caudal controlado (Q), y en las dos esquinas inferiores se le aplica el vacío. Las siguientes hipótesis completan el modelo:

- El molde es indeformable.
- No hay caminos preferenciales de flujo (*racetraking*).
- La resina es incompresible.
- En la fase de inyección, se considera que la presión que se genera en el interior de la cavidad no deforma la preforma, es decir, la permeabilidad se mantiene constante [19].
- La viscosidad de la resina es constante, ya que durante la primera etapa del CRTM el grado de conversión es muy bajo y los cambios de viscosidad son insignificantes.

3.3 Influencia de los parámetros de inyección

3.3.1 Estudio paramétrico

El DOE ha permitido determinar la influencia de los diferentes parámetros implicados en la fase de inyección. Al ser un estudio en base a simulaciones, todos los parámetros afectan, sin embargo aquellos parámetros que en el diagrama de Pareto de los efectos muestran un valor del factor de efecto menor que el 5% han sido descartados, considerados como insignificativos en los rangos de valores estudiados. Este umbral del 5% corresponde a un valor de efecto estandarizado (sv) dado por Minitab de 2,2. Cualquier valor que se extienda más allá de esta línea de referencia, es potencialmente importante. Como se muestra en la figura 33, sólo tres variables (h_g , v_{fi} y p_o) superan este umbral, por lo que el estudio se centrará en ellos. El más influyente es la altura del hueco, seguido del contenido de fibra inicial de la preforma y finalmente el volumen de la resina inyectada. Debe mencionarse que a pesar de que la influencia de la viscosidad es muy baja, el aumento de la viscosidad por encima del rango determinado, puede aumentar la presión, pudiendo aumentar la compactación de la preforma y así reducir la permeabilidad. Este rango de viscosidades está fuera del alcance de este estudio.

Analizando estos tres parámetros, el volumen de la resina inyectada es el único que no modifica el frente de flujo de la resina. Se puede observar que cuanto mayor es el volumen de resina inyectada, mayor es la posibilidad de llenar el hueco, pero debe tenerse en cuenta que el coste del material y el tiempo de inyección también aumentan. Sin embargo, la altura del hueco y el contenido de fibra inicial de la preforma determinan la permeabilidad de cada zona dentro del molde y pueden modificar el patrón de llenado. Por consiguiente, el estudio se centrará en estos dos parámetros.

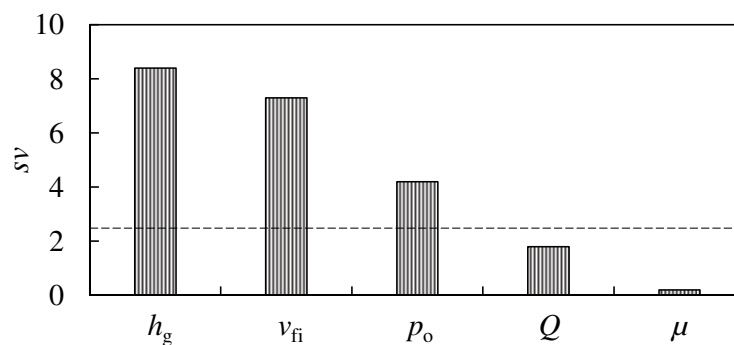


Figura 33: Efecto estandarizado (% impregnado; $\alpha = 0.05$).

Para analizar cómo influye cada parámetro en el nivel de impregnación, se han seleccionado otros tres valores intermedios por parámetro. El nuevo rango de valores analizados es el siguiente: contenido de fibra inicial (v_{fi}) 40%, 41%, 42%, 43%, 44% y 45%; y la altura del hueco (h_g) 1,44, 1,51, 1,58, 1,65 y 1,72. La figura 34 muestra la relación entre la altura del hueco, el contenido de fibra inicial y el

porcentaje de llenado del hueco, teniendo en cuenta que en las figuras 34 y 35 el volumen de resina inyectado es el exacto, sin excesos. La figura 34a muestra que aumentando la altura del hueco y el contenido de fibra inicial, el porcentaje de llenado del hueco aumenta. Además, analizando el valor máximo de cada parámetro (figura 34b), se observa que para el valor más alto de la altura del hueco ($h_g = 1,72$) el llenado del hueco es del 90%, mientras que para el valor más alto del contenido de fibra inicial ($v_{fi} = 45\%$) es del 95%. Por consiguiente, se puede deducir que la influencia del contenido de fibra inicial es mayor que la de la altura del hueco.

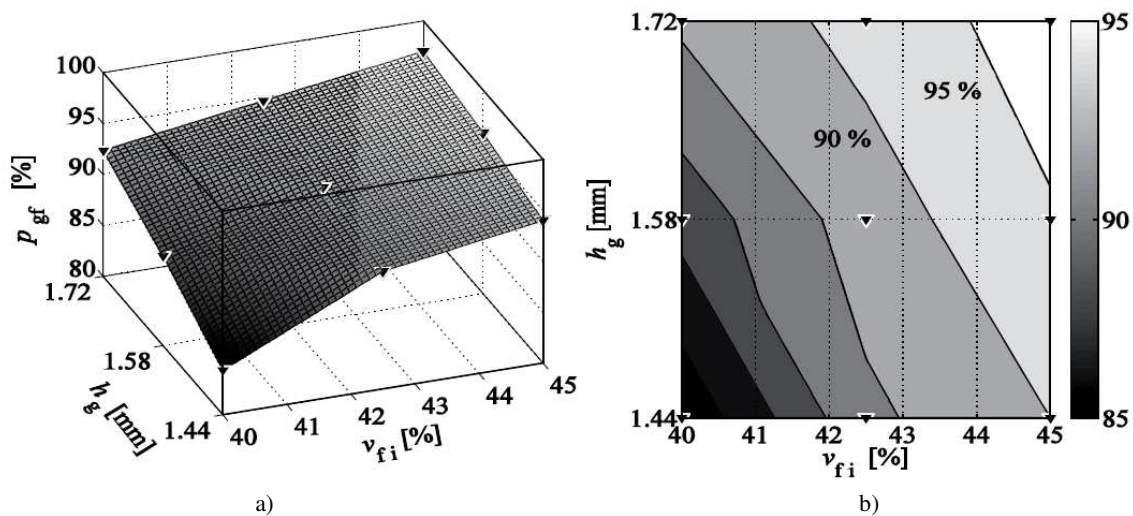


Figura 34: a) Relación entre la altura del hueco, el contenido de fibra y el porcentaje de llenado del hueco, b) variación del porcentaje de llenado en función de la altura del hueco y el contenido de fibra inicial.

Desde el punto de vista fenomenológico, existe una competencia entre la opción de fluir a través del hueco y a través del espesor de la preforma. Esta relación puede ser representada por el cociente de ambas permeabilidades, r , con el que se analiza el límite de resistencia entre los dos medios:

$$r = K_g / K_{zz} \quad (3.1)$$

La figura 35 muestra la evolución del valor r en función del porcentaje de llenado de hueco. Se puede observar que hasta el valor $2,5 \times 10^4$ el llenado del hueco aumenta, sin embargo para valores superiores a este valor de r , se establece en un valor aproximado del llenado del 95%. A partir de este umbral, el valor r es estable, por lo que se puede concluir que es un punto óptimo. Una de las opciones para aumentar el valor de r , es aumentar la altura del hueco, lo que conduce a un mayor tiempo de cierre del molde. Además, sabiendo que la dosis de resina inyectada es la exacta, si la altura del hueco aumenta, el volumen de resina inyectado será menor que el volumen de hueco, por lo que el hueco no se llenará nunca. Otra estrategia para aumentar r es aumentar el contenido de fibra inicial, pero esto dificulta la penetración de la resina en la preforma. Para compactar la preforma seca hasta esos contenidos de fibra tan altos y espesores tan pequeños, se necesita un mayor tonelaje de prensa. Además, aumentando el

contenido de fibra, la permeabilidad en la dirección del espesor disminuye, requiriendo mayor tonelaje de prensa en la fase de compresión.

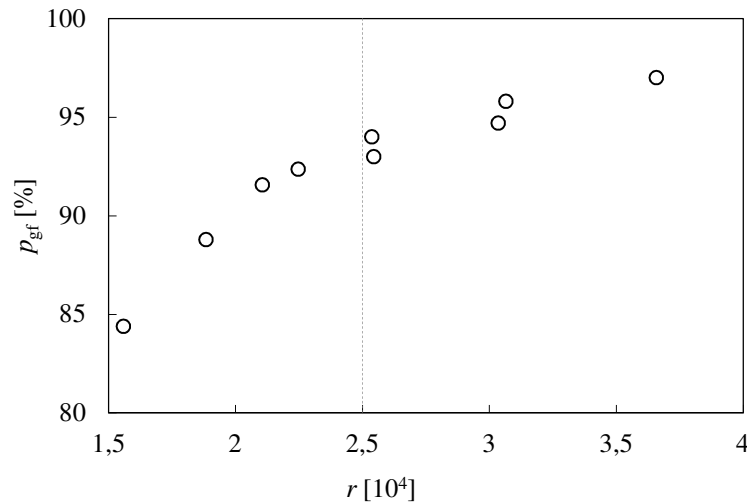


Figura 35: Relación entre el porcentaje de llenado del hueco (p_{gf}) y la relación r .

3.3.2 Patrón de impregnación

A fin de entender mejor el comportamiento de la resina durante la fase de inyección, el análisis cuantitativo (3.3.1) realizado debe completarse con un análisis cualitativo del flujo.

Basándose en los tres parámetros más influyentes, se han identificado dos grupos diferentes de patrón de impregnación: 1) aquellos en los que el fondo de la pieza no está impregnada (patrón I y patrón III), considerando que el porcentaje de volumen de resina penetrado en la preforma es menor (20% de volumen de resina penetrado, figuras 36a y 36c); y 2) aquéllos en los que la impregnación llega a la cara inferior de la preforma (patrón II), lo que significa que el flujo seguirá un patrón más complejo que continuará las direcciones tanto en el plano como a través del espesor (figura 36b). Dependiendo de la dirección de la impregnación (en el plano o a través del espesor), tanto la distribución de la presión del molde, como la calidad de la impregnación de la pieza varían. Por lo tanto, es interesante analizar los parámetros que cambian el patrón de impregnación. Comenzando con el primer grupo, entre todas las simulaciones realizadas, se seleccionan dos patrones; patrón I ($v_{fi} = 45$, $h_g = 1,72$, $p_o = 1$), en el que sólo el 4% del volumen de resina ha penetrado en la preforma, y el patrón III ($v_{fi} = 40$, $h_g = 1,44$, $p_o = 1$), donde la penetración de la resina en la preforma ha sido del 16% pero no ha llegado a impregnar la parte inferior. Con respecto al segundo grupo, se detecta que en el patrón II ($v_{fi} = 45$, $h_g = 1,44$, $p_o = 1,2$), el 27% del volumen de la resina inyectada ha penetrado la preforma. Comparando los dos grupos, se puede ver que el volumen de la resina inyectada y el valor r de cada patrón influyen en el patrón de

impregnación. Se puede concluir que el patrón I se aproxima más a la impregnación ideal de CRTM, debido a la impregnación homogénea del hueco y a la posterior impregnación en la dirección del espesor.

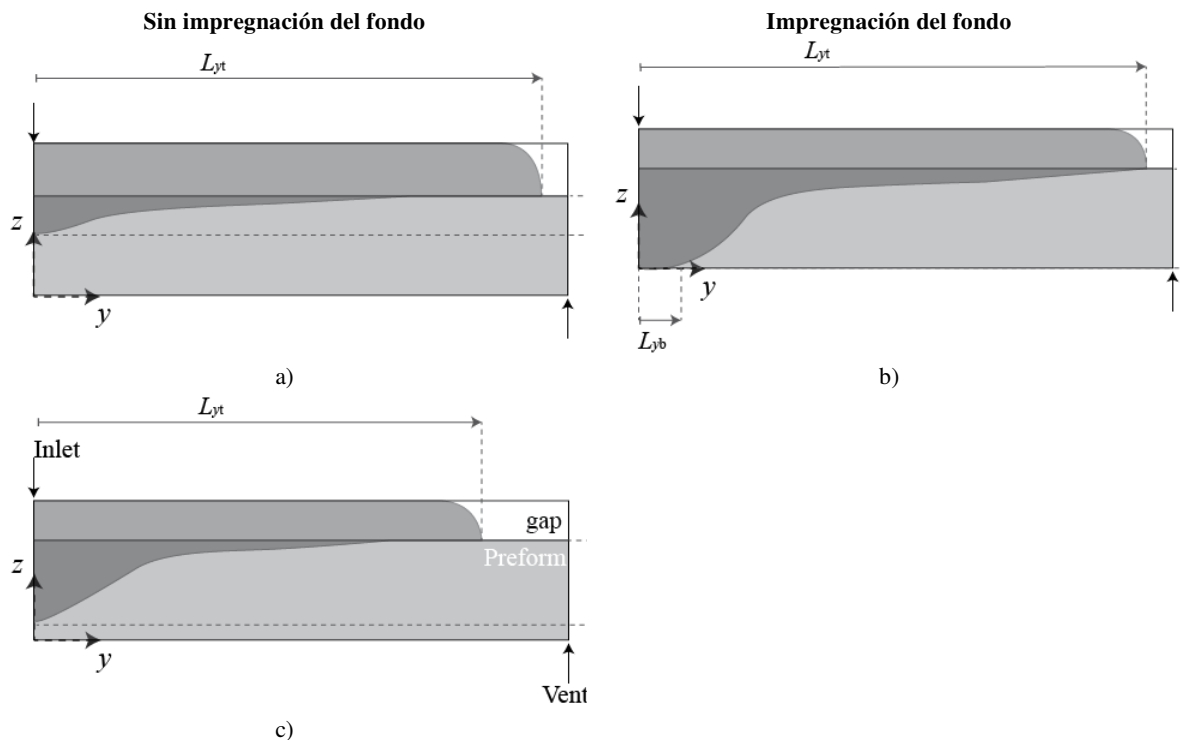


Figura 36: Diferentes patrones de impregnación: a) Patrón I ($v_{fi}=45$, $h_g=1,72$, $p_o=1$), b) patrón II ($v_{fi}=45$, $h_g=1,44$, $p_o=1,2$) y c) patrón III ($v_{fi}=40$, $h_g=1,44$, $p_o=1$).

3.3.3 Validación del modelo de simulación

Método experimental

Con el fin de validar y verificar los resultados basados en las simulaciones realizadas en la sección anterior, los tres patrones de impregnación seleccionados han sido replicados experimentalmente. Se ha diseñado un molde transparente para analizar el patrón de flujo. El molde está compuesto por dos placas de PMMA transparentes, superior e inferior. Entre las dos placas de PMMA se ha colocado un marco, que permite definir el espesor del hueco y de la preforma. El punto de inyección está situado en el centro de la placa superior, y los puntos de vacío están situados en los extremos de la placa inferior. Como se muestra en la figura 37, el molde se ha colocado en una base alta para poder visualizar la vista superior e inferior. Para registrar los patrones de flujo de la vista superior e inferior al mismo tiempo, se ha colocado un espejo en la parte inferior del molde. La preforma que se ha utilizado está compuesta por 6 capas tejido biaxial NCF de fibra de carbono. Como el espesor inicial de la preforma es un parámetro clave, se le ha añadido ligante en polvo para mantener el espesor de la preforma durante los ensayos de inyección.

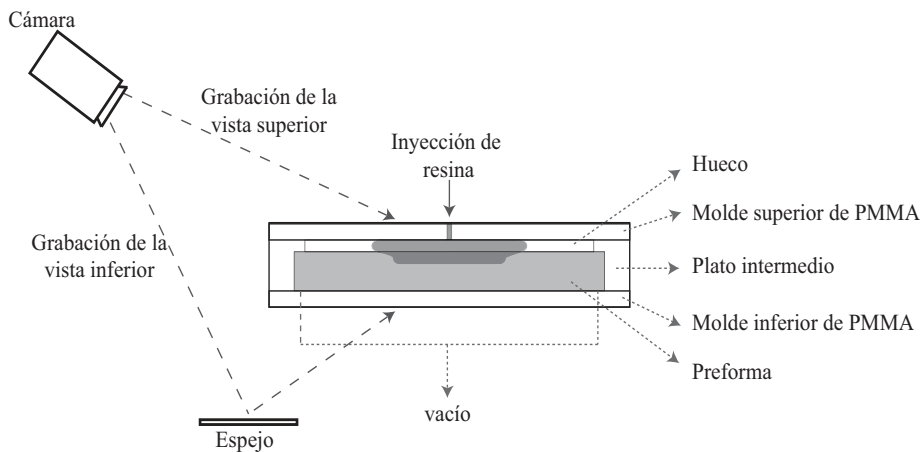


Figura 37: Esquema del ensayo experimental.

Resultados experimentales y correlación con los resultados de simulación

La figura 38 muestra los resultados de la impregnación final obtenidos por simulaciones y experimentalmente. Los criterios de correlación han sido i) el patrón de la zona impregnada, y ii) la diferencia en la trayectoria de flujo más larga (L_{yt}) entre los resultados experimentales y los de las simulaciones. En el caso del patrón I (Figura 38a experimental y 38b simulación) el error de la longitud de impregnación L_{yt} es del 9%, y muestra un llenado de hueco más homogéneo. Ni en la simulación ni en los ensayos experimentales la resina ha llegado a impregnar el fondo de la pieza y la distribución de la resina en la cara superior es semejante. En el patrón III (Figura 38c y Figura 38d), la diferencia en L_{yt} es de 4%. Al igual que en el patrón I, en la simulación y en el ensayo experimental la resina no ha impregnado el fondo de la preforma y la distribución de la resina en el molde superior es similar en ambos casos. Finalmente, las mayores diferencias se han encontrado en el patrón II (Figura 38e y 38f), ya que en el eje x el error es de 16% y en el eje y es del 25%. Analizando la simulación y el resultado experimental, se puede observar que en ambos casos la resina ha impregnado el fondo de la preforma. Además, el llenado del hueco ha sido mayor que en el resto de los patrones, lo que se debe al hecho de que el volumen del hueco es menor que la cantidad de volumen de resina inyectada. Este fenómeno no se ha detectado en las simulaciones. La mayor diferencia entre la simulación y los resultados experimentales es la variabilidad del propio material y el camino preferencial de flujo que se puede generar en los extremos de la pieza (*racetracking*). Cabe mencionar que en el CRTM, el fenómeno *racetracking* tiene menor influencia que en el RTM convencional, ya que en el RTM una vez que la resina toca la esquina de la pieza, tiende a ir alrededor de ella. Otro posible origen del error es que la dispersión en el peso por área del material utilizado es de $\pm 7\%$. Dada la consistencia del peso del tejido, las diferencias en el patrón de llenado se pueden deber a la variabilidad estocástica de la densidad de la

fibra. La variación en el patrón de llenado es atribuible al hecho de que la variabilidad espacial del refuerzo es suficientemente significativa como para afectar en la precisión de las predicciones hechas, ya que en la simulación se considera una preforma homogénea [20].

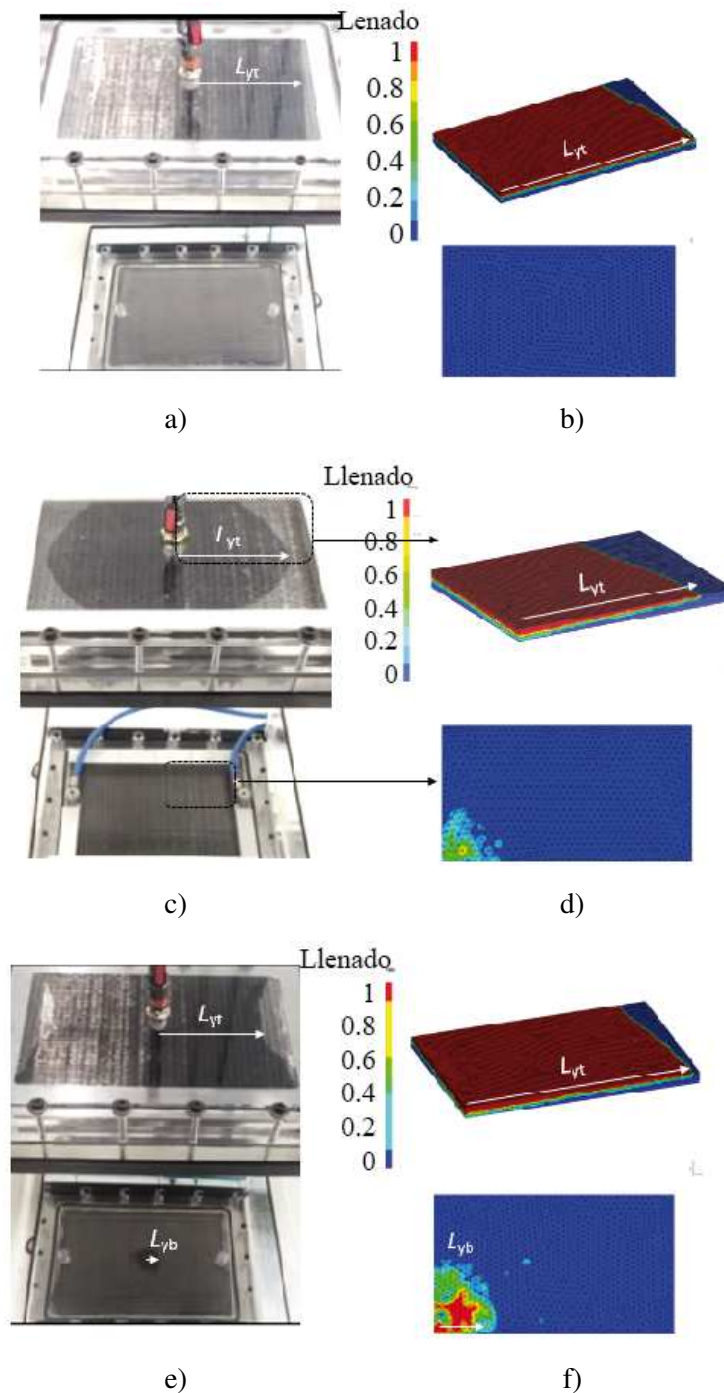


Figura 38: Patrón de flujo final (impregnación transversal 3D y vista superior): a) Patrón I, b) Patrón III y c) Patrón II.

En el modelado de la fase de inyección se ha hecho la hipótesis de que la presión de inyección es lo suficientemente pequeña como para despreciar la deformación de la preforma en la fase de inyección.

Para validar esta hipótesis, la figura 39 muestra la presión máxima obtenida en cada uno de los patrones. Se ha visto que el patrón III ha generado la presión máxima. Long Li *et al* [21] han demostrado que la deformación de tejidos NCF con las presiones de compactación de la preforma generadas en las pruebas de este trabajo puede ser despreciables.

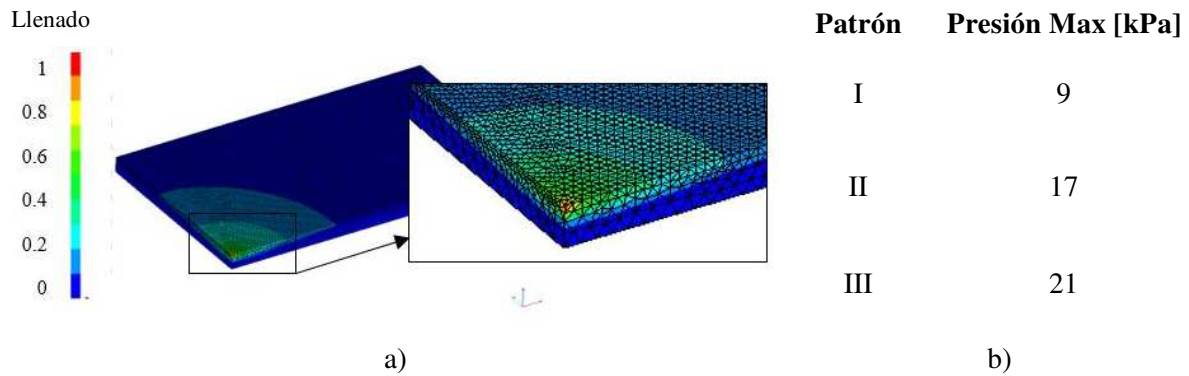


Figura 39: Presión de inyección; Presión de distribución y presión máxima.

3.4 Conclusiones

En este apartado se ha realizado un estudio paramétrico de la fase de inyección del CRTM. Para ello, se han utilizado herramientas de simulación (PAM-RTM) y se ha fabricado un banco de pruebas donde se validan los resultados obtenidos en las simulaciones.

Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

- El patrón del frente de flujo depende de los parámetros de fabricación considerados como variables en este estudio (tabla 9), y se ha demostrado que la resina siempre impregna la preforma. Por consiguiente, no es realista suponer que la resina fluye exclusivamente en el hueco y que la distribución de la resina es homogénea.
- Los resultados de la simulación muestran que los parámetros más importantes en la fase de inyección son el contenido de fibra inicial, el espesor del hueco y el porcentaje de volumen de resina inyectado. De hecho, la relación entre la permeabilidad del hueco y la permeabilidad de la preforma (r) controla la cantidad de resina que fluye en el hueco. A medida que aumenta r , el volumen de la resina que fluye por el hueco también aumenta, acercándose al estadio ideal de llenado total del hueco, con un valor cercano al 95%. Se demuestra que para valores de r superiores a $2,5 \times 10^4$, el aumento del porcentaje de llenado del hueco es mínimo. Además, ir a valores superiores requeriría aumentar tanto el tiempo de cierre del molde como la fuerza de compresión requeridas para la compactación de la preforma. Esto confirma la existencia del umbral óptimo que define el inicio de la ineficiencia del proceso.

- La correlación entre los resultados experimentales obtenidos en un molde transparente y los de la simulación es buena, lo que indica que el modelo del hueco como una zona sólida con la permeabilidad obtenida con la ecuación de la solución lubricada para un flujo entre dos paredes sólidas (ecuación 1.5), es válida.

Capítulo 4

Fase de compresión

El objetivo de este capítulo es analizar la influencia de los diferentes parámetros de procesado en la fase de compresión. El trabajo realizado se ha dividido en 6 pasos:

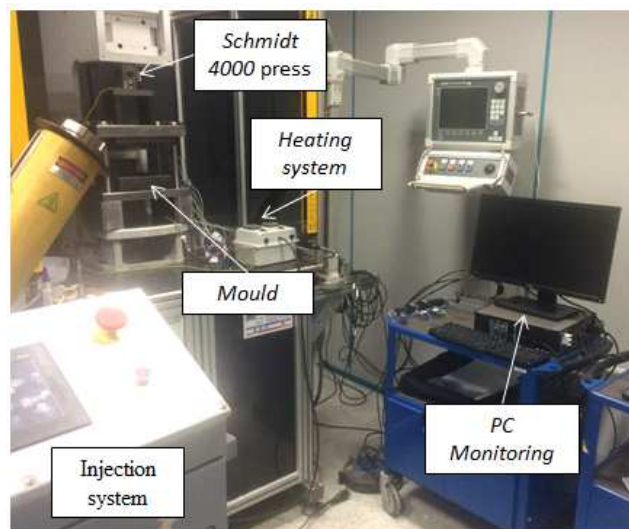
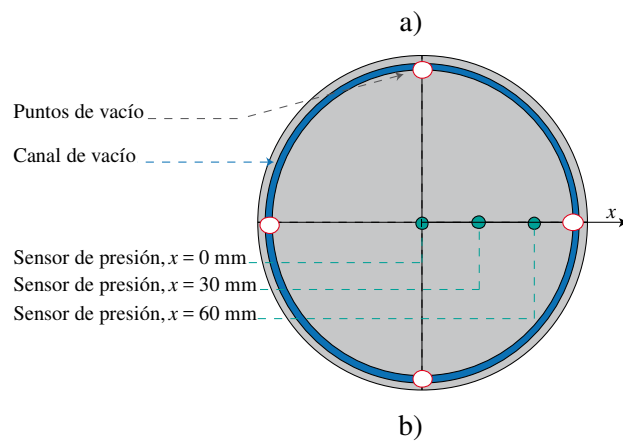
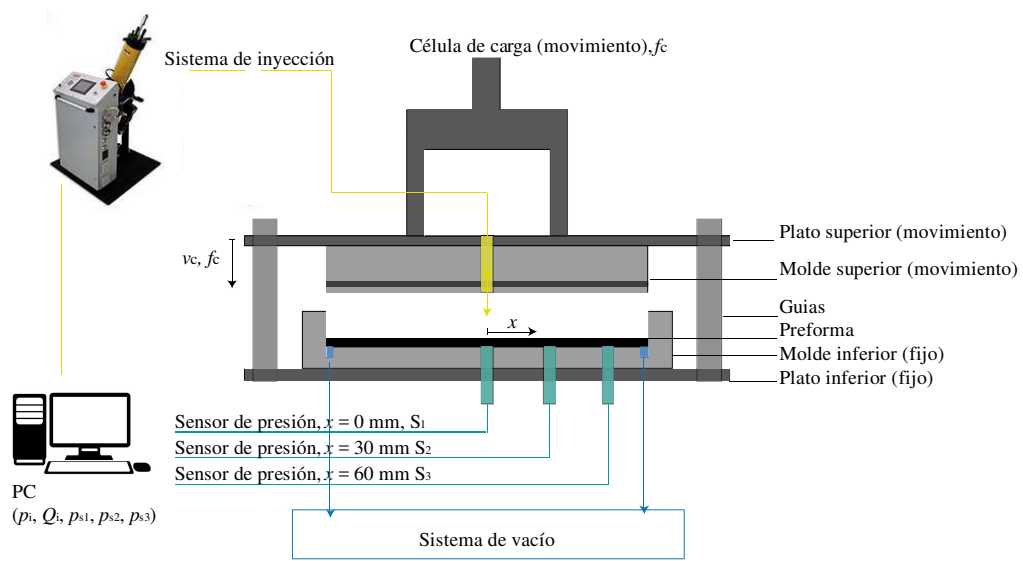
1. Se ha diseñado un molde que posibilita estudiar diferentes estrategias de cierre de molde y monitoriza las condiciones de inyección (control de caudal y presión de inyección), de fuerza de cierre de prensa, de tiempos de ciclo, de presión interna, y de temperatura de la resina.
2. Se ha estudiado estrategias de compresión basados en accionamientos constantes de control de velocidad o control de fuerza. En base a los resultados de la monitorización y la calidad de la pieza obtenida en cuanto al nivel de porosidad, se ha seleccionado la mejor estrategia para los posteriores estudios.
3. El estudio de la estrategia de compresión suscita un gran interés a la hora de optimizar procesos de fabricación. Sin embargo, la distribución inicial de la resina también es otro factor a tener en cuenta. Por ello, cabe analizar su influencia sobre la fase de compresión.
4. Comprendida la fase de compresión del CRTM, se propone una nueva estrategia de compresión con velocidad variable.
5. Una vez optimizada la fabricación de un componente mediante CRTM, se compara con el RTM convencional, mostrando el potencial del CRTM.
6. Y por último, se concluye remarcando los resultados más significativos de cada apartado.

4.1 Método experimental

La geometría que se ha estudiado es una placa circular de 150 mm de diámetro y 3,8 mm de espesor. La figura 40 muestra el esquema del ensayo experimental. El molde está compuesto por una placa inferior fija y una placa superior móvil, que está fijada al cabezal de una prensa servo

mecánica de 4 t (*Schmidt 4000*). La prensa permite una resolución de precisión inferior a 0,01 mm. En el “Anexo 1: Caracterización de los cambios de velocidad del estudio de la fase de compresión”, se describe la precisión de la prensa. En el centro del molde hay un punto de inyección que está conectado al sistema de inyección eléctrico (*2100cc Series RTM RADIUS Injection System*) que controla la inyección de resina con caudal (Q) o presión constante (P). Teniendo en cuenta que el objetivo es fabricar una pieza final con un contenido de fibra del 55%, se define el volumen de resina requerido. El vacío se aplica utilizando cuatro puntos de vacío situados en la placa inferior, los cuales están conectados por un canal que permite aplicar un vacío homogéneo (figura 40b). El sensor de la inyectora se utiliza para controlar la presión de inyección y el caudal. La fuerza de cierre (f_c) es la suma de la presión generada por la resina y la fuerza requerida para compactar la preforma [10]. La magnitud de f_c se registra con la célula de carga de la prensa, mientras que la distribución de presión dentro del molde definida como p se obtiene mediante los sensores de presión (PX61V-0500AV) situados en la dirección radial (figura 40b) a una distancia de 0, 30 y 60 mm desde el punto de inyección.

La preforma que se ha utilizado para estudiar la fase de compresión está compuesta por 6 telas formando una configuración $[0/90]_{3S}$ y con un espesor inicial de 4,8 mm, lo que corresponde a un 43% de volumen en fibra. El volumen de fibra final de la pieza ha sido de 55%. La reproducibilidad de los ensayos realizados se muestran en el Anexo 2 “Reproducibilidad del estudio de la fase de compresión”, donde se demuestra que los ensayos tienen una desviación estándar de la fuerza pico de $\pm 0,18$.



c)

Figura 40: Esquema del molde de los ensayos experimentales.

4.2 Estrategias de compresión constantes: Control de velocidad vs. fuerza

El objetivo de este apartado es estudiar las dos estrategias de compresión clásicas descritas en la bibliografía; compresión a velocidad constante o fuerza constante, con la particularidad de que en el caso de la compresión con velocidad constante se han explorado velocidades mayores que las reportadas en la bibliografía, y que en el caso de la presente tesis están más cerca de la realidad industrial que la del resto de autores. Debido a que la distribución inicial de la resina influye en la fase de compresión, primero se describe la distribución inicial de la resina. A continuación, se estudian las estrategias de compresión, y por último, las muestras se validan en términos de nivel de porosidad.

Patrón I

En la fase de inyección (capítulo 3.3.2) se han detectado tres patrones de impregnación en base a los resultados de simulación. Para el estudio de este apartado, se parte del patrón I (Figura 36a). El criterio de selección del patrón se ha basado en la elección del caso que muestra la impregnación más cercana a la impregnación ideal del CRTM, es decir, el hueco lleno de resina y el fondo de la preforma sin impregnarse.

Con el fin de validar el patrón de resina obtenido en la simulación del capítulo 3, se realiza un ensayo denominado *short-shot*. Este ensayo consiste en inyectar la resina y curarla rápidamente, sin que se dé la fase de compresión, de forma que se pueden verificar los resultados obtenidos en la simulación. Las condiciones de procesado han sido las mismas que en el estudio de la fase de inyección. En la figura 41a se muestra la vista superior e inferior del patrón I obtenido mediante la técnica *short-shot*. Analizando la vista superior, se puede ver que el llenado de hueco es semejante a la simulación, acercándose al llenado ideal del proceso. En la vista inferior se puede ver que no llega a penetrar en el fondo de la pieza, lo que concuerdan con los resultados obtenidos en la simulación. En la figura 41a se han estudiado las longitudes de impregnación superior e inferior, pero no se ha podido analizar la sección transversal de la muestra. Por ello, se ha realizado un corte transversal a las muestras, y así poder ver la impregnación en el espesor (figura 41b). En el caso experimental, la resina ha penetrado hasta una profundidad mayor que en la simulación. Uno de los factores al que se puede atribuir el origen de esta diferencia, es que desde el fin de la inyección hasta que la resina cura, la resina continua fluyendo en la dirección del espesor.

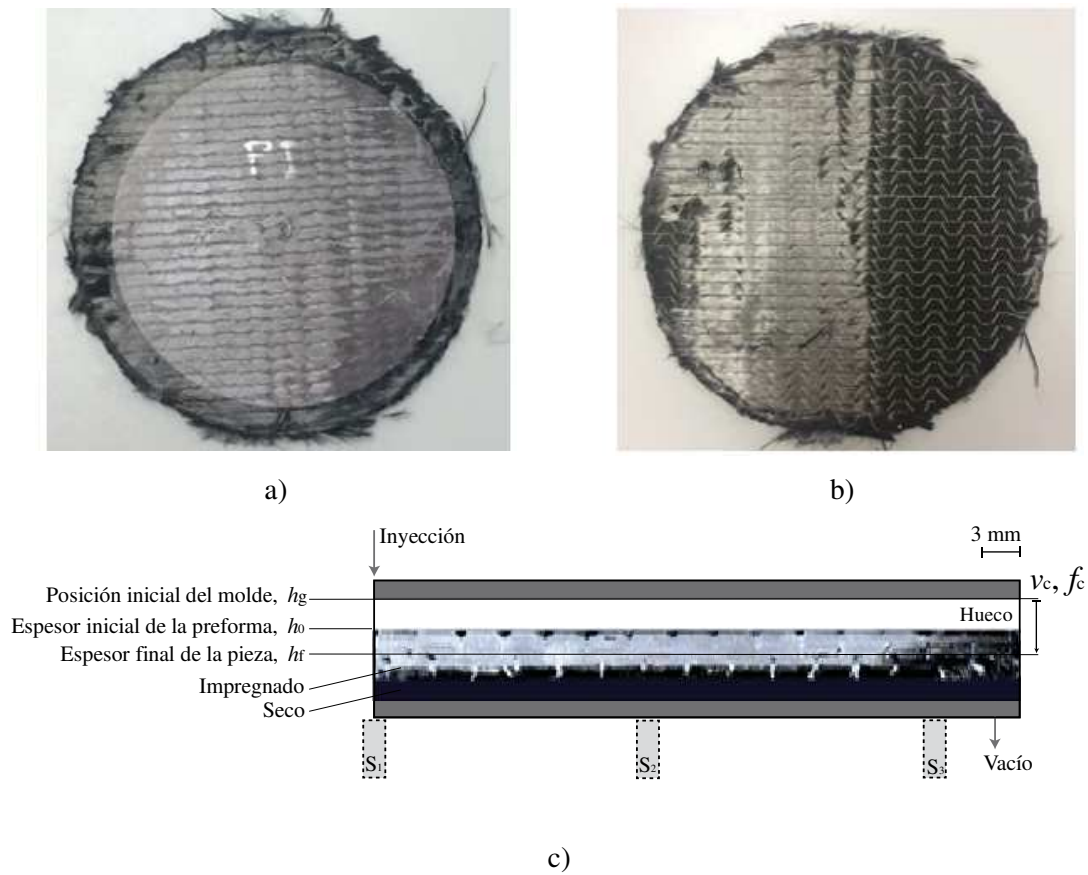


Figura 41: Resultados del ensayo *short-shot* del patrón I: a) Vista superior, b) vista inferior, y c) corte transversal.

Una vez verificada la distribución inicial de la resina, se han estudiado diferentes estrategias de compresión constantes. En la Tabla 10 se describen los parámetros de compresión analizados. Los ensayos se dividen en dos grupos; compresión a velocidad constante correspondiente a la nomenclatura C, y F la de fuerza constante. El número describe el valor de cada consigna (mm/s o kN). Debido a que el estudio está dirigido al sector automovilístico en el que la reducción de los tiempos de ciclo es fundamental, se parte de valor más alto definido en la bibliografía, 0,1 mm/s [47], y se llega hasta valores 20 veces mayores. Este valor de 0,1 mm/s permitirá comparar los resultados con las conclusiones obtenidas en los trabajos publicados hasta la fecha. El rango de fuerzas de cierre se ha definido en base al tonelaje de la prensa.

Tabla 10: Ensayos realizados con control de velocidad y fuerza.

	Patrón	v_c [mm/s]	f_c [kN]
C0,1	PI	0,1	-
C0,5	PI	0,5	-
C1	PI	1	-
C2	PI	2	-
F5	PI	-	5
F10	PI	-	10
F15	PI	-	15

4.2.1 Compresión con velocidad constante

En la figura 42 se muestra la evolución de la fuerza de cierre, en función de la posición del molde superior durante el cierre del molde a velocidad constante. El tiempo de compresión total (t_c) disminuye a medida que la velocidad aumenta, siendo la diferencia de tiempos entre la velocidad más baja y la más alta de un factor de 26. Sin embargo, para la velocidad más alta, la fuerza de pico (f_p) es aproximadamente tres veces mayor. Las diferencias se encuentran no sólo en la última etapa de compresión, sino también durante todo el proceso de compresión. En el inicio de la etapa del cierre del hueco hay un plateau (figura 42, zona A) donde las fuerzas son similares para las cuatro condiciones de procesado. Esto está relacionado con el flujo de resina a través del hueco y con la parte que penetra a través del espesor. La permeabilidad del hueco se reduce a medida que se cierra el molde, ya que es proporcional al cuadrado del espesor del hueco (ecuación 1.5), por lo que el flujo de resina encuentra una mayor resistencia para fluir a través del hueco. Esta tendencia se extiende hasta que el molde superior toca la preforma para las dos velocidades más lentas. Sin embargo, para las dos velocidades más rápidas C1 y C2, hay un aumento de fuerza antes de que el molde superior entre en contacto con la preforma (figura 42, zona B). La razón principal de este fenómeno se justifica por el hecho de que una mayor velocidad implica una mayor presión en el frente de flujo, tal como describe la ley de Darcy (ecuación 1.1); por consiguiente, la preforma empieza a ser parcialmente compactada. Además, a medida que se compacta la preforma, se reduce su permeabilidad en el plano así como a través del espesor, aumentando su resistencia al flujo. En los ensayos a bajas velocidades, la compactación de la preforma se puede despreciar, ya que la fuerza de cierre es constante durante todo el cierre del hueco. Para los dos casos con compactación a bajas velocidades, la fuerza de cierre empieza a aumentar cuando el molde superior toca la preforma (figura 42, zona C). A partir de este instante, la preforma se compacta en los cuatro casos estudiados. Se puede observar que cuanto mayor es la velocidad de compactación, el aumento de fuerza de cierre es mayor, lo que se debe a que la

presión necesaria para empujar el frente de flujo de resina es también mayor [47], así como al comportamiento viscoelástico de la preforma [76,77].

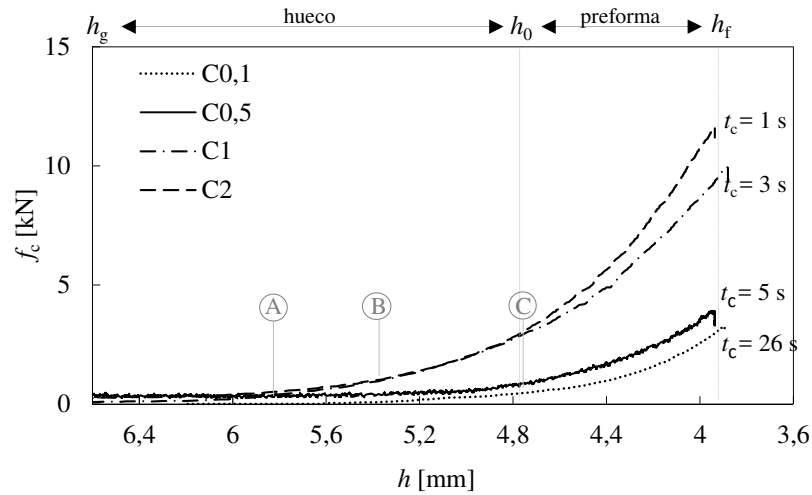


Figura 42: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa, en función de la posición del molde, a diferentes velocidades de compactación constantes.

4.2.2 Compresión con fuerza constante

En la figura 43 se representa la evolución de la fuerza de cierre en función de la posición del molde a diferentes fuerzas constantes de compresión. Se puede observar que el tiempo de compresión total (t_c) disminuye a medida que la fuerza aumenta, siendo la diferencia entre la fuerza más baja y la más alta de un factor de 4. Sin embargo, para las condiciones de compresión más rápidas, la fuerza de pico (f_p) es aproximadamente tres veces mayor. A diferencia de la estrategia de compresión a velocidad constante, las fuerzas aumentan desde el inicio del cierre del hueco, siendo el aumento similar para las tres condiciones. Sin embargo, a partir del punto A (figura 43), el ensayo F5 muestra un cambio de comportamiento, reduciendo la pendiente. El ensayo F10 repite esta tendencia en el punto B (figura 43), una vez que el molde superior está en contacto con la preforma. Por el contrario, en el ensayo F15 no se ha apreciado ningún cambio en el comportamiento durante todo el trayecto. Cuanto mayor es la fuerza de compresión, mayor es el incremento de la fuerza de pico, y mayor es la pendiente de fuerza en la compactación final de la preforma. Esta tendencia está fuertemente influenciada por la velocidad. En la figura 44 se muestra el perfil de velocidad por cada ensayo a fuerza constante. Se puede ver como a mayor fuerza, mayor es el aumento de la velocidad de compactación. Por ello, como se ha comentado en el apartado anterior, el hecho de cerrar el molde a mayor velocidad, implica una mayor presión en el frente de flujo, y mayor compactación de la preforma, reduciendo la permeabilidad en el plano, así como a través del espesor y aumentando la resistencia al flujo.

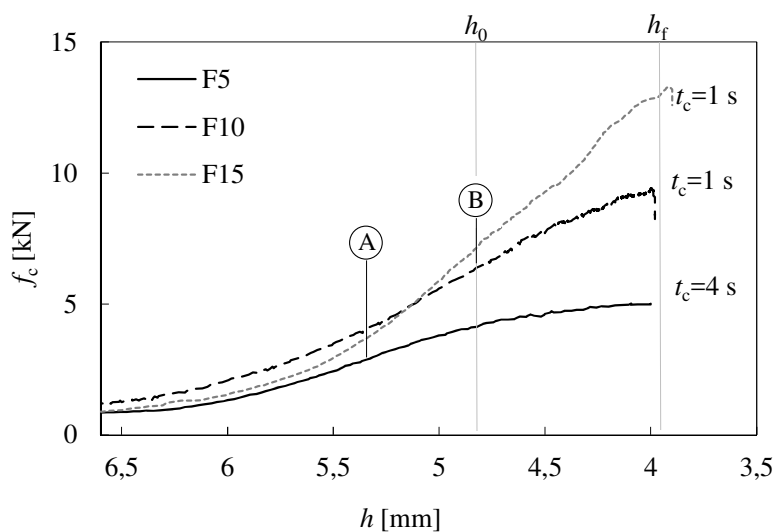


Figura 43: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa en función de la posición del molde para diferentes fuerzas de compresión constantes.

Visto que la velocidad es un parámetro crítico durante la compactación, en la figura 44 se muestra la rampa de velocidad de cada ensayo. Se puede ver que a diferencia del anterior apartado, las velocidades son mayores, justificando así la reducción de los tiempos de compactación. La tendencia de la reducción de velocidad en el cierre del hueco es semejante para los tres casos. Para el caso más rápido, el cierre del hueco se realiza a 15 mm/s, mientras que el caso más lento a 5 mm/s. A pesar de ello, una vez que el molde superior está en contacto con la preforma, la fuerza aumenta considerablemente, reduciendo la velocidad de compactación. Debido a que el hueco muestra una menor resistencia, el valor de la velocidad aumenta; en cambio, en la compactación de la preforma la velocidad se reduce drásticamente. Se puede comprobar que la estrategia de cierre a fuerza constante optimiza cada trayecto de cierre, cerrando el hueco a altas velocidades y compactando la preforma a bajas velocidades.

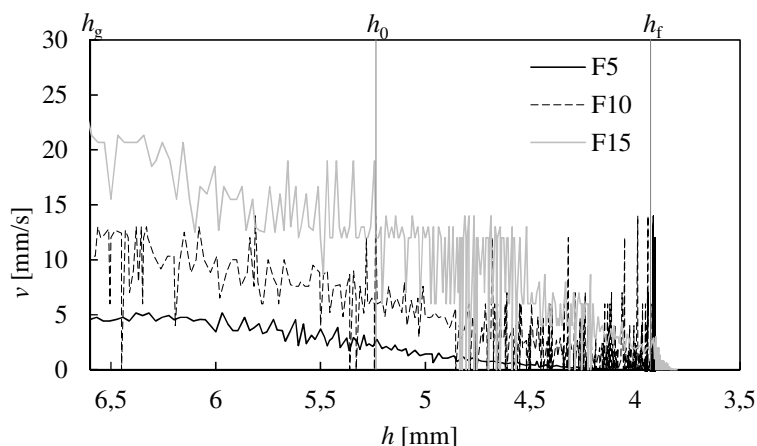


Figura 44: Evolución de la velocidad en función de la posición del molde para diferentes fuerzas de compresión constantes.

4.2.3 Comparación de las estrategias de compresión constantes

La figura 45 muestra los valores de los principales parámetros obtenidos en la fase de compresión, la fuerza máxima de cierre y el tiempo total de la compactación, para las estrategias de velocidad constante y fuerza constante. Cada estrategia de compactación muestra una tendencia de estos parámetros diferentes. En el control de velocidad, cuanto mayor es la velocidad, mayor es la fuerza pico. En cambio, en el control de fuerza, cuanto mayor es la fuerza menor es el tiempo de compactación y en todo el recorrido del cierre del molde la fuerza aplicada por la prensa es la definida. Estas dos tendencias de velocidad y fuerza coinciden con los estudios de simulación y validación experimental realizados por varios autores [35,36,43,45,46,78]. Sin embargo, se puede ver que en el caso de los ensayos a F10 y F15 el tiempo de compactación ha sido el mismo. Esto demuestra que, a partir de cierto valor de fuerza, la reducción del tiempo de compactación es despreciable frente a la fuerza necesaria, limite que también se demostró en el trabajo publicado por Merotte *et al.*, [78], (figura 10).

A la hora de determinar la estrategia de compactación óptima, el criterio establecido es tratar de llegar a un equilibrio entre la fuerza y el tiempo. Se detectan dos grupos: por un lado, se puede ver que las condiciones de compactación de los ensayos C1 y C2 y F10 y F15 muestran el menor tiempo de compresión. Sin embargo las fuerzas en dichos ensayos aumentan considerablemente. Por otro lado, los ensayos C0,5 y F5 muestran un tiempo de compactación tres veces mayor que el anterior grupo, pero las fuerzas se reducen a la mitad.

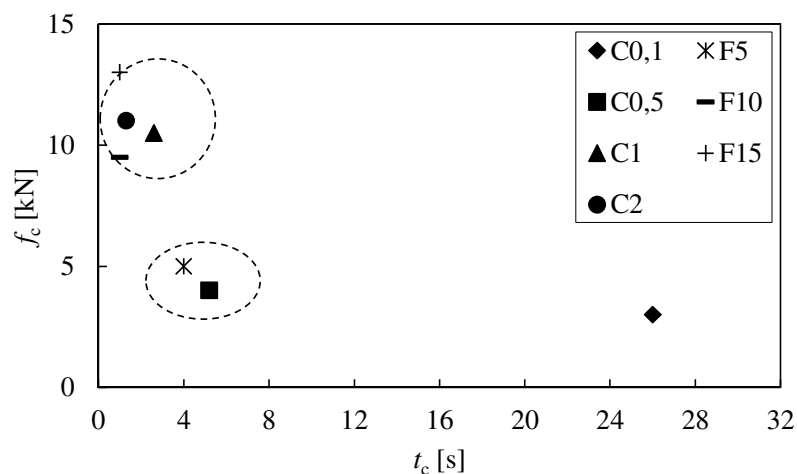


Figura 45: Fuerza pico frente a tiempo de compactación de las estrategias de compactación de estrategias constantes.

Estudio de la presión interna

Los tres sensores del molde detectan la llegada de la resina a su posición, lo que da una idea de la dirección del avance del frente de flujo. La figura 46 muestra el valor de la presión para cada sensor en el tiempo. A velocidades elevadas correspondientes a los ensayos C1 y C2, los valores de los sensores (S_1 , S_2 y S_3) aumentan al mismo tiempo (figura 46c, d), por lo que se puede concluir que la impregnación se produce en la dirección del espesor, ya que si la impregnación se diera en el plano, se apreciaría un intervalo de tiempo entre las señales de los sensores S_1 , S_2 y S_3 . Sin embargo, a velocidades bajas (ensayos C0,1 y C0,5), entre el instante en el que el sensor S_1 detecta el flujo y lo hacen los sensores S_2 y S_3 transcurre cierto tiempo. En este intervalo de tiempo puede suponerse que el flujo se produce tanto en el plano como a través del espesor.

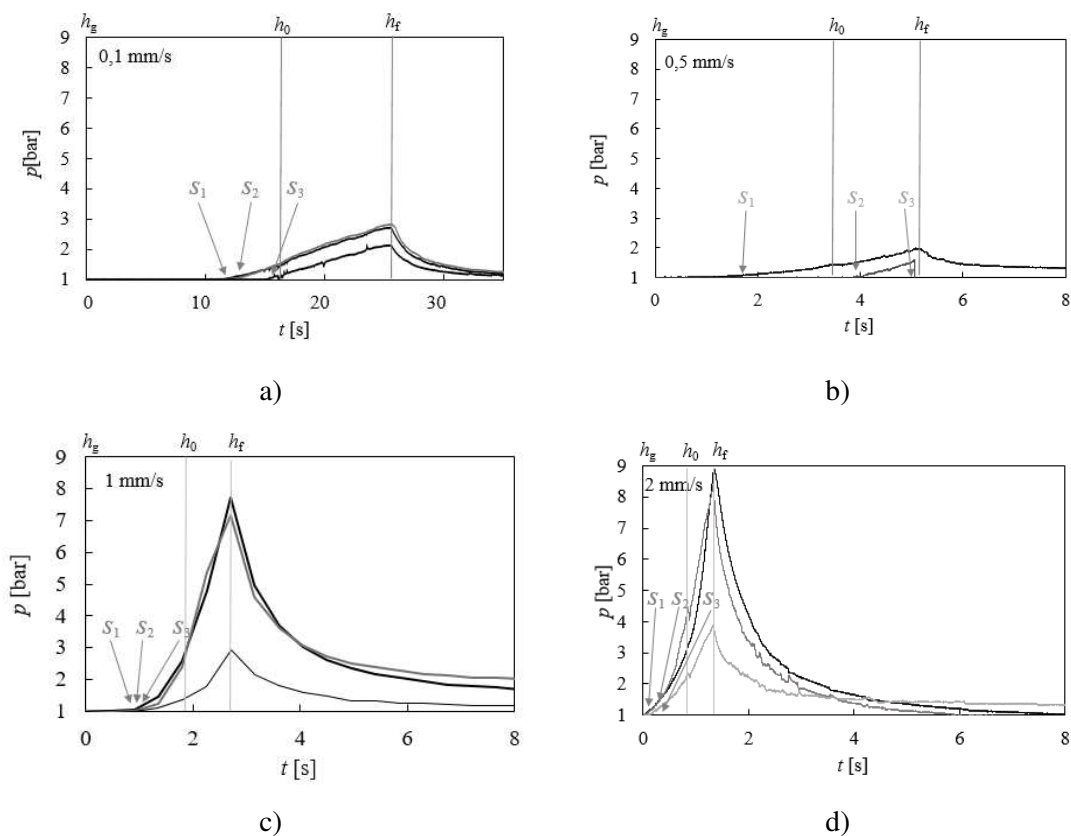


Figura 46: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde: a) C0,1, b) C0,5, c) C1, y c) C2.

La figura 47 muestra los valores de los sensores de presión con el control de fuerza. Para los tres casos de fuerzas, los sensores detectan el frente de flujo antes de que el molde superior esté en contacto con la preforma. Además, la detección de los tres sensores se da en el mismo instante, lo que indica que la impregnación se da en la dirección del espesor. La evolución de la señal de los sensores de presión coincide con los de la célula de carga de la prensa. En ambos casos se aprecia un crecimiento con una pendiente pronunciada hasta entrar en contacto con la preforma.

En este instante, se produce un punto de inflexión en el cual la señal se redondea. Este comportamiento difiere del obtenido con el control de velocidad, ya que en este último no se da este cambio de tendencia y la señal crece hasta el valor máximo de forma continua. En lo que se refiere al punto en el que se alcanza la presión máxima, también hay diferencias, ya que en el control de fuerza el máximo se encuentra en las inmediaciones en las que el molde superior entra en contacto con la preforma, mientras que en el control de velocidad el máximo se alcanza al cerrar completamente el molde. Esto significa que la presión interna, cuando se controla la fuerza, disminuye antes de que se cierre el ciclo de compresión, mientras que en el control de velocidad la relajación se produce una vez cerrado el molde.

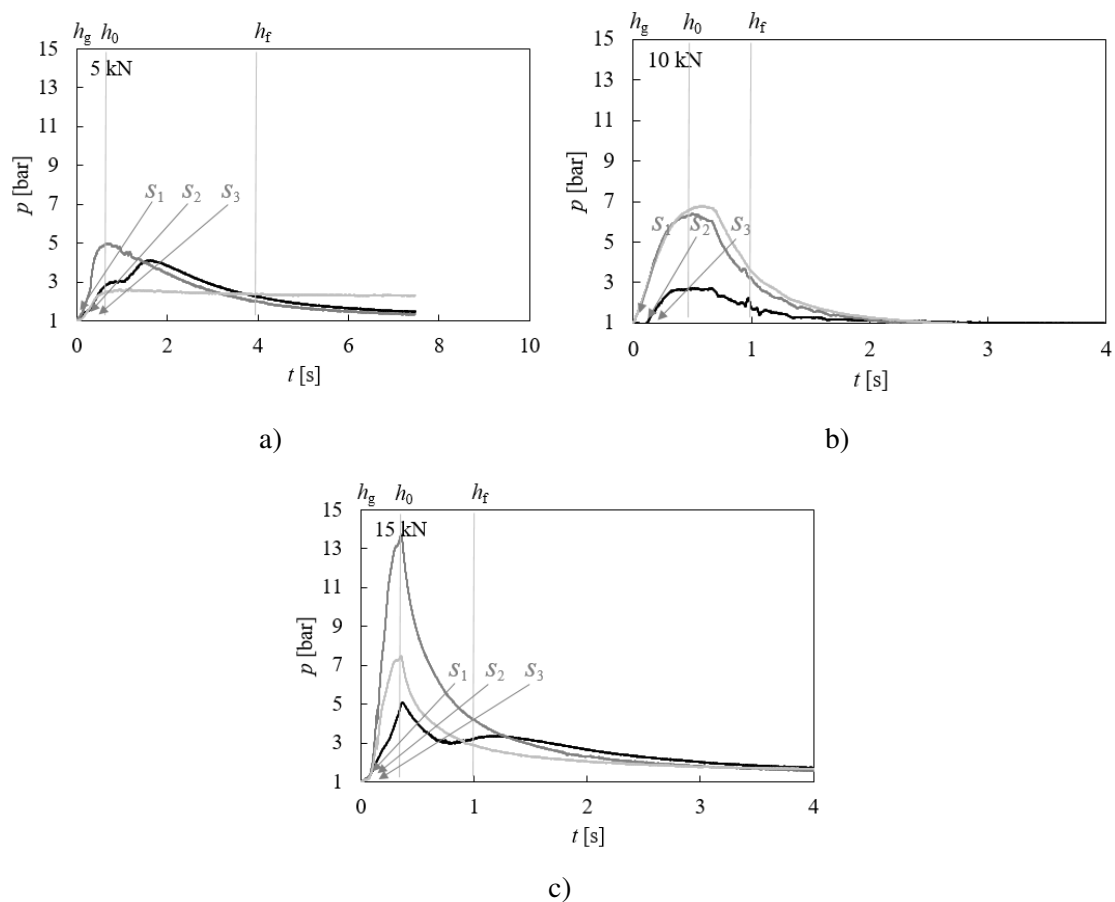


Figura 47: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde: a) F5, b) F10, y c) F15.

La Figura 48 muestra la presión máxima para cada sensor en la dirección radial del molde. El valor de las presiones máximas muestra una tendencia semejante a la del valor de la prensa. Es decir, en las velocidades altas (ensayos C1 y C2), las presiones son altas, y a velocidades bajas (ensayos C0,1 y C 0,5), las presiones máximas son menores. Además, en la figura 48a se puede ver que el sensor central y el posicionado a 30 mm muestran un valor semejante, y hay una caída de presión para el sensor ubicado a 60 mm. En cambio, el control de fuerza muestra un comportamiento diferente (figura 48b): la caída de presión en la dirección radial se puede

considerar lineal. Por consiguiente, la estrategia de compresión a velocidad constante muestra una distribución más homogénea, lo que se traduce en un control de paralelismo más sencillo.

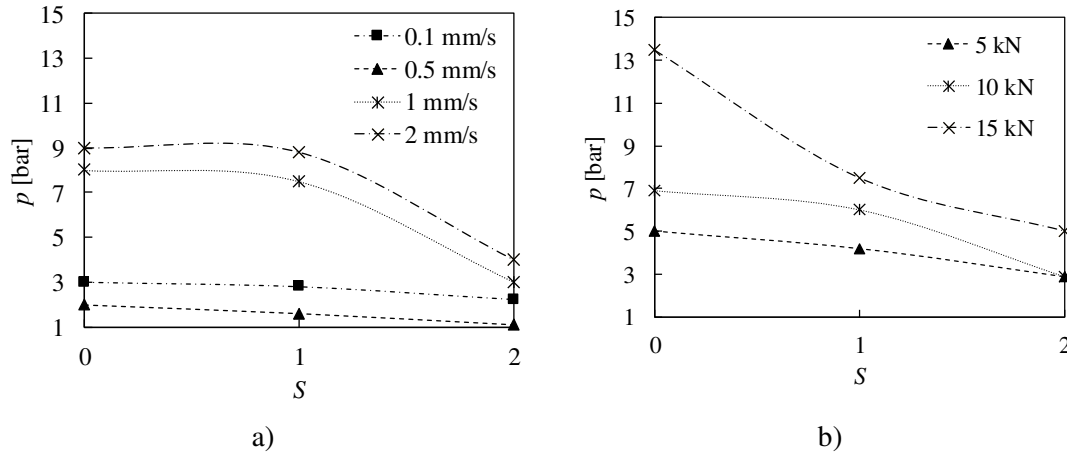


Figura 48: Presión máxima para cada sensor en la dirección radial: a) Control de velocidad, y b) control de fuerza.

Análisis microscópico de los composites

La calidad de los materiales compuestos es tan importante como la eficiencia del procesado, ya que la porosidad reduce el rendimiento mecánico del material [55]. En la figura 49 se pueden ver las microfotografías de las secciones transversales pulidas. Se muestran dos microfotografías por cada estrategia de compresión, seleccionando los valores extremos de cada estrategia. Se pueden ver diferencias significativas dependiendo de la estrategia utilizada. En las muestras de control de velocidad, el nivel de porosidad es muy bajo (figura 49a y b). Por lo contrario, controlando la fuerza el nivel de porosidad es considerablemente mayor (figura 49c y d). Además, se puede ver que la generación de poros se da en la parte inferior de la pieza, es decir, en la última parte de impregnación. También se ha podido ver que una de las razones de la generación de los poros es el ligante que no ha llegado a fundirse en la fase de preformado. Este se posiciona entre las mechas y obstruye el flujo de resina.

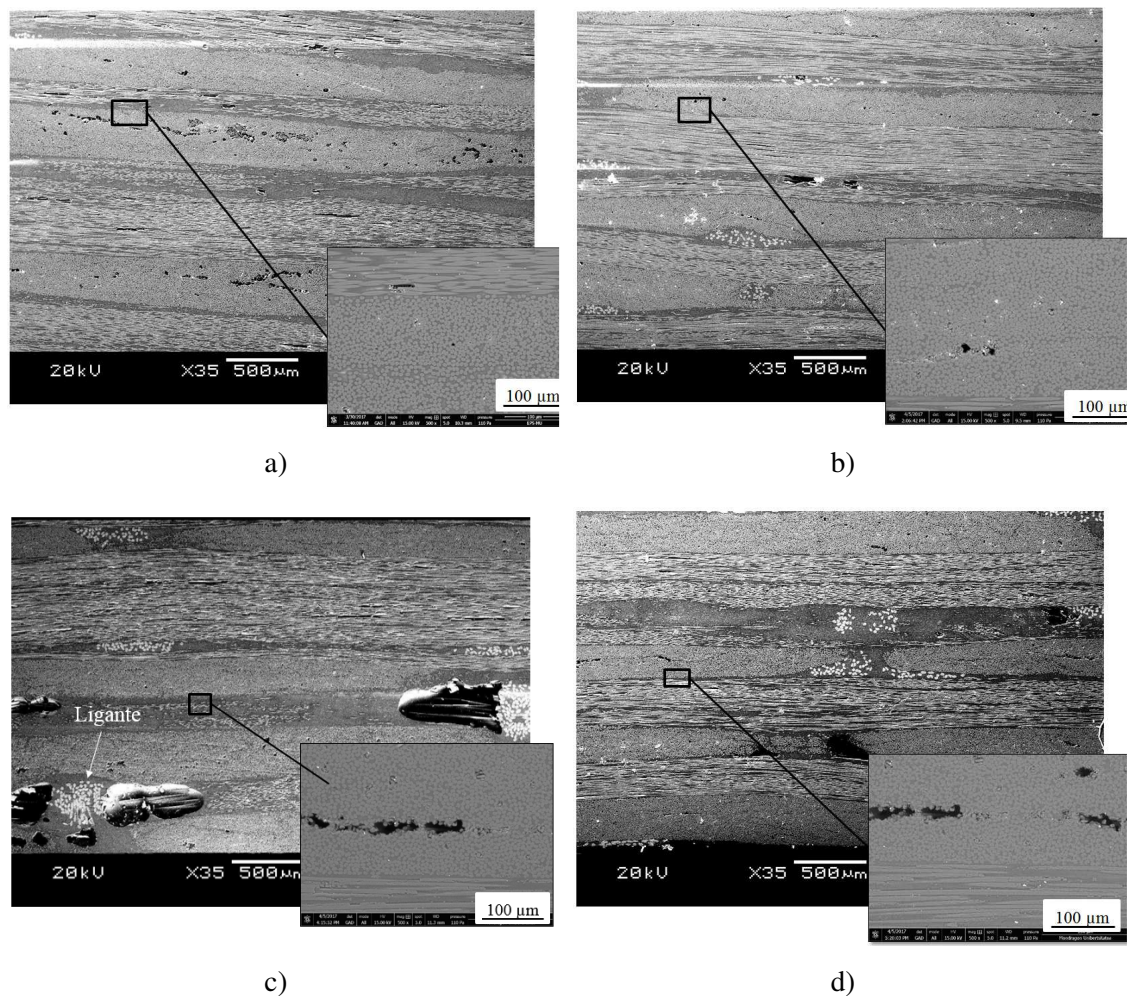


Figura 49: Micrografías de condiciones de compresión diferentes: a) 0,1 mm/s, b) 1 mm/s, c) 5 kN, y d) 15 kN.

4.2.4 Selección de la estrategia de compresión

Una vez estudiadas las dos estrategias de compresión clásicas en términos de fuerzas de cierre y tiempo de ciclo, presión interna y análisis microscópico, se determinan las siguientes conclusiones.

- Cara a un proceso industrial uno de los aspectos a tener en cuenta es la robustez de la estrategia. Cuando se utiliza un control de velocidad, se asegura que el cierre del molde se da en un tiempo determinado y no varía. Sin embargo, cuando se controla la fuerza, la velocidad de cierre está influenciada por la resistencia que se le opone durante el cierre, debido a la heterogeneidad de cada preforma, o a las posibles modificaciones de las condiciones de inyección, lo que se traduce en tiempos de ciclo no repetitivos. Para asegurar un tiempo de cierre de prensa robusto y evitar posibles desviaciones en los tiempos, la fuerza debería de estar sobredimensionada.

- La estrategia de control de velocidad ha demostrado generar una presión hidrostática más homogénea dentro del molde, lo que se traduce en un control de paralelismo más simple.
- Por último, se ha estudiado el nivel de porosidad de cada estrategia, llegando a la conclusión de que las probetas fabricadas a fuerza constante muestran mayor nivel de porosidad.

Por consiguiente, debido a la incertidumbre que puede llegar a generar el cierre del molde con control de fuerza, a que muestra mayores diferencias de presión interna en la dirección radial del molde, el nivel de porosidad es considerablemente mayor, y visto que en bibliografía, en cuanto al control de velocidad con inyección en el hueco no se ven directrices claras de optimización, la estrategia de compresión que se utilizará en los siguientes apartados será la de control de velocidad.

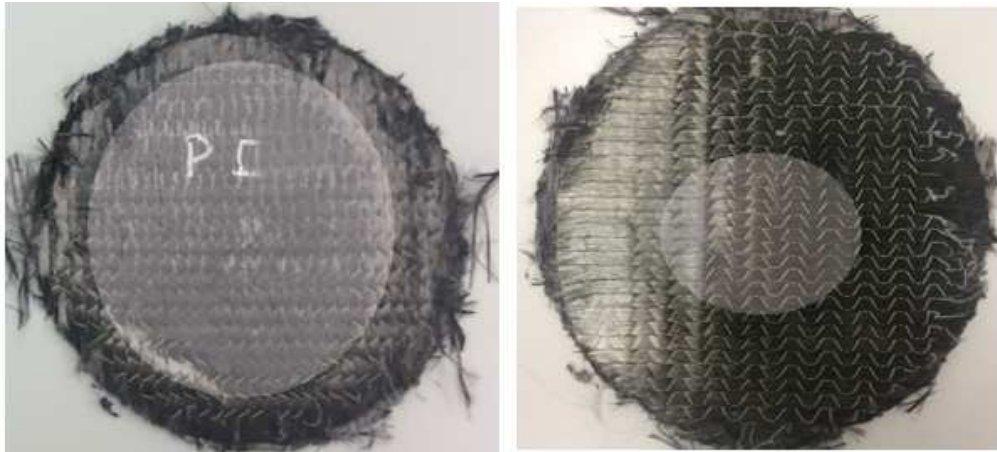
4.3 Influencia de la distribución inicial de la resina

Como se ha comentado anteriormente, el estudio de la estrategia de compresión suscita un gran interés a la hora de optimizar el CRTM. Sin embargo, la distribución inicial de la resina también es otro factor a tener en cuenta. El objetivo de este apartado es analizar la influencia de la distribución inicial de la resina de la fase de compresión. Los resultados obtenidos se analizarán en términos de tiempo de llenado y fuerza de cierre de la prensa. Además, el frente de flujo y la distribución de presión también se estudian mediante los sensores de presión situados en diferentes posiciones dentro del molde.

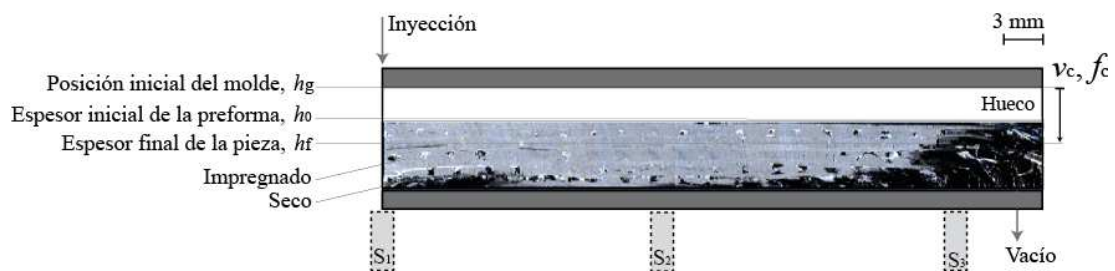
Descripción de patrones

Para llevar a cabo el estudio se comparan los dos patrones de impregnación descritos en la sección 3.3.2: El patrón I (figura 36a) y el patrón II (figura 36b). La selección del patrón II se justifica por el hecho de ser el caso más alejado de la impregnación ideal del CRTM, ya que a diferencia del patrón I, en el patrón II la resina llega a impregnar el fondo de la pieza. Las principales diferencias entre ambos patrones son la altura del hueco y el volumen de la resina inyectada (descripción de las condiciones de fabricación en el capítulo 3.3.2). Al igual que en el anterior apartado, se ha validado el patrón de impregnación mediante la técnica *short-shot*. En la figura 50a se muestra la vista superior e inferior de las placas obtenidas mediante la técnica *short-shot*. Analizando la vista superior, se puede ver que la resina ha llegado a impregnar gran parte del hueco. A diferencia del patrón I (figura 41), en el patrón II se ha impregnado el fondo de la pieza. Por otro lado, en la figura 50b se muestra la sección transversal del patrón II. Se puede ver que en el ensayo experimental, la penetración de la resina ha sido más profunda que los resultados obtenidos en la

simulación. Al igual que en el patrón I, uno de los factores a los que se puede atribuir esta desviación es que desde el final de la inyección hasta que la resina se cura, ésta continua fluyendo en la dirección del espesor, pudiendo alterar la distribución de resina que había justo al terminar la fase de inyección.



a)



b)

Figura 50: Resultados del ensayo *short-shot* del patrón II: a) vista superior e inferior, y b) corte transversal.

Una vez definido el punto de partida, se determina la estrategia de compresión con control de velocidad. En este apartado se han repetido los ensayos realizados con el patrón I a velocidad controlada en el anterior apartado (tabla 10); de esta manera se podrá analizar la influencia de los diferentes patrones de impregnación.

Tabla 11: Lista de ensayos a velocidad constante con el patrón II.

	v_c [mm/s]	f_c [kN]
C0,1 (II)	0,1	-
C0,5 (II)	0,5	-
C1 (II)	1	-
C2 (II)	2	-

En la figura 51 se muestran los resultados obtenidos empleando un control de velocidad en la fase de compresión con una distribución de resina inicial según el patrón II. Si se comparan estos resultados con los obtenidos con el patrón I (figura 42), se puede ver que la tendencia general es la misma. Sin embargo, la fuerza final de compresión con el patrón II ha sido mayor para todos los casos. Este incremento de fuerza se genera por:

- El incremento de volumen de resina inyectada.
- La reducción del hueco del patrón II, que reduce el trayecto del cierre del hueco, disminuyendo la posibilidad de que la resina fluya por el hueco.

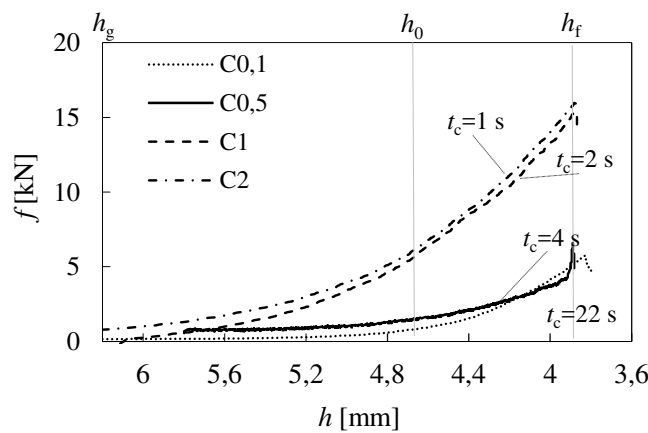


Figura 51: Evolución de la fuerza de cierre de la prensa, en función de la posición del molde, a diferentes velocidades de compactación constantes (patrón II).

Al igual que en el anterior apartado, en la figura 52 se recogen los valores de salida más significativos de proceso: fuerza máxima frente a tiempo de compactación. Las fuerzas inducidas en el patrón I por cada velocidad son aproximadamente 3 kN menores que en el caso del patrón II. Por consiguiente, el aumento de fuerza debido a la diferencia del patrón de resina es independiente de las condiciones de compresión.

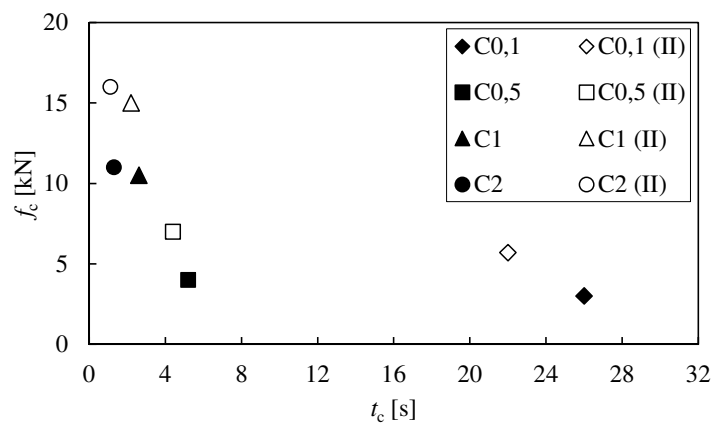


Figura 52: Fuerza pico frente a tiempo de compactación. Estrategia de velocidad constante de patrón I y II.

Estudio de la presión interna

La figura 53 muestra el valor de presión para cada sensor, y se delimita el instante de cierre de hueco (h_0) y cierre de molde (h_f) para el patrón II. A altas velocidades (ensayo C2) los valores de presión de los sensores (S_1 , S_2 y S_3) aumentan en el mismo instante, por lo que se podría concluir que la impregnación se da en la dirección del espesor. A velocidades bajas (ensayos C0,1 y C0,5) hay un intervalo de tiempo entre los sensores S_1 y S_2 y el sensor S_3 , concluyendo que el flujo se produce en el plano y en la dirección del espesor. Sin embargo, para el ensayo C1 el avance del frente de flujo cambia con el patrón. En el patrón I, los tres sensores aumentan el valor al mismo instante (figura 46). Sin embargo, en el caso del patrón II hay 1 s de diferencia entre las señales de S_1 y S_2 y la de S_3 . Por último, se ha podido ver que en todos los casos la presión aumenta exponencialmente y la presión obtenida es mayor que en el patrón I. Por lo tanto se ha demostrado que el exceso de resina debe de evitarse, ya que influye fuertemente en el aumento de las fuerzas de cierre y presiones internas generadas.

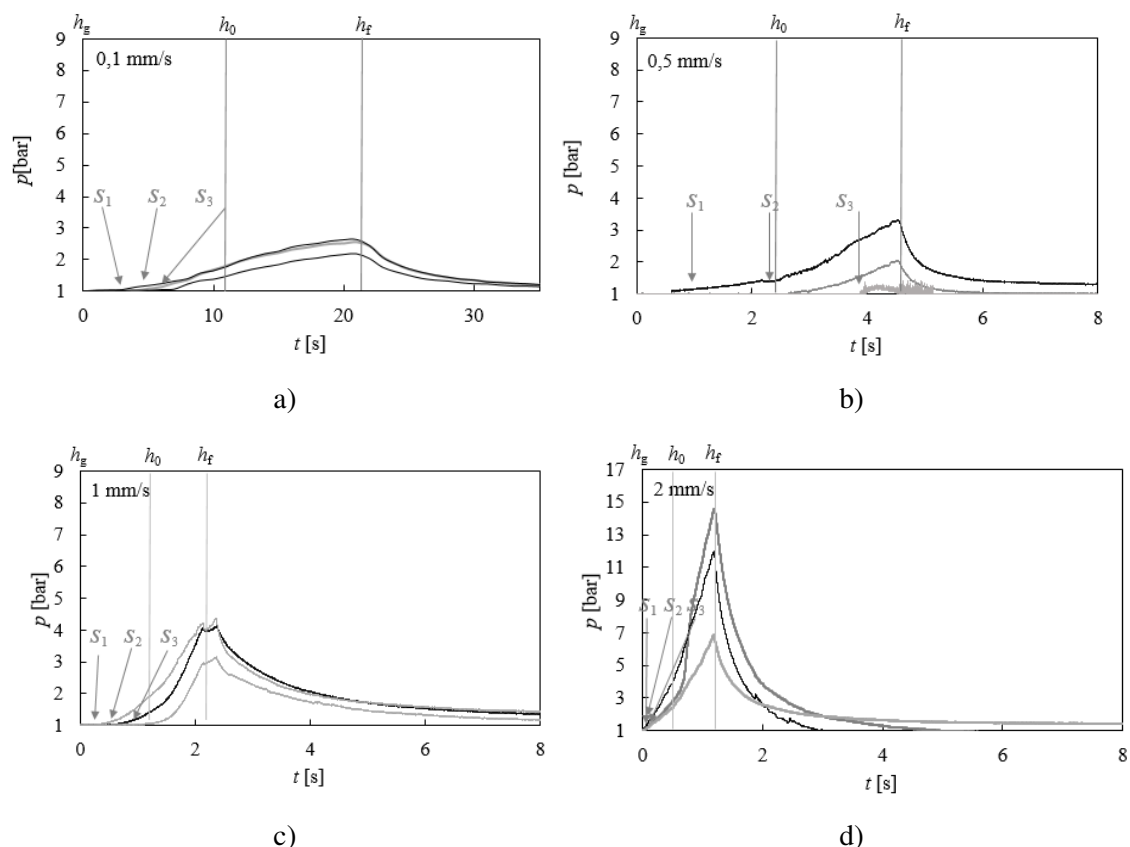


Figura 53: Perfil de la presión de los sensores situados en la dirección radial del molde para patrón II: a) 0,1 mm/s, b) 0,5 mm/s, c) 1 mm/s, y c) 2 mm/s.

La figura 54 muestra la distribución de presión dentro del molde. Al igual que con el patrón I (figura 46a), los sensores S_1 y S_2 registran una presión similar y hay una caída en el sensor S_3 . Sin embargo, se detecta un cambio de comportamiento en el ensayo C1. Con el patrón I, la presión

en los ensayos C1 y C2 ha sido similar, pero con el patrón II para el ensayo C1 la presión generada ha sido considerablemente menor. Esto se puede deber a la dirección de flujo en la compresión, ya que como se ha demostrado en la figura 53c, la diferencia de tiempo de S_1 y S_3 demuestra que el flujo se da en el plano.

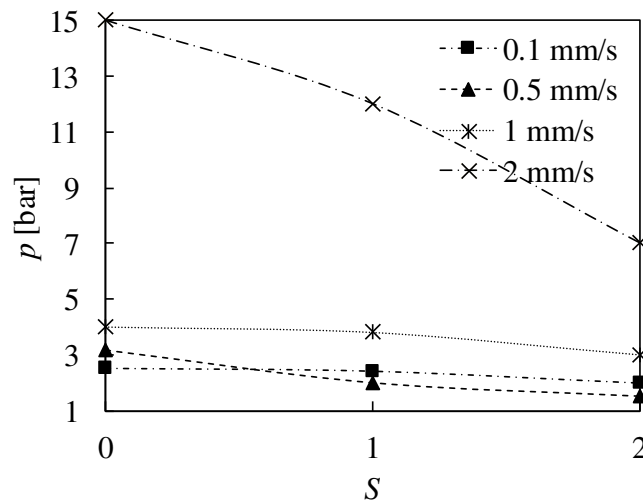


Figura 54: Presión máxima para cada sensor en la dirección radial (patrón II).

4.4 Estrategia de compresión a velocidad variable

En los anteriores apartados se han analizado estrategias de compresión constantes. Sin embargo, se ha podido ver que debido a las características propias del CRTM, los comportamientos en las dos etapas de compresión, cierre de hueco y compactación de la preforma, difieren. Consecuentemente, se plantea una estrategia de compresión de secuencia variable. También se ha podido comprobar que cara a una producción industrial el control de velocidad es más preciso, por lo que la estrategia propuesta se basa en determinar el perfil óptimo de velocidades para reducir el del tiempo de ciclo y las fuerzas de cierre. Por todo ello, se propone emplear velocidades de compresión adaptadas a cada etapa, para conseguir un tiempo de ciclo bajo y unas fuerzas pico bajas. Los resultados de la velocidad de compresión constante han demostrado que el aumento de la fuerza con la velocidad es menos pronunciado durante el cierre del hueco que durante la etapa de compactación; por lo tanto, para la fase de cierre de hueco la velocidad puede ser más rápida y para la etapa de compactación conviene emplear una velocidad más lenta (Figura 55).

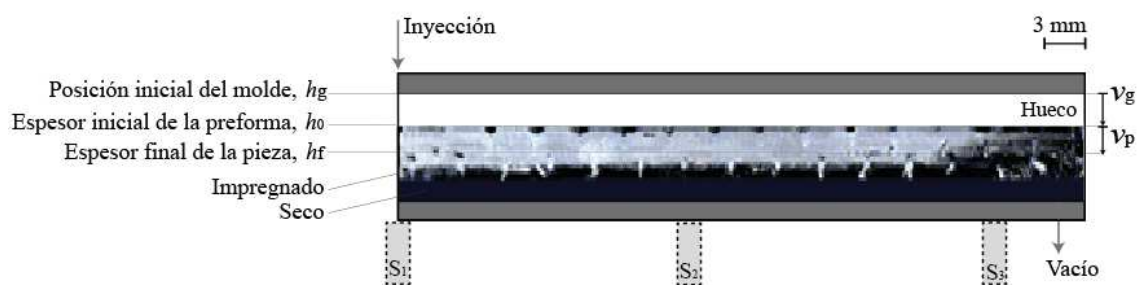


Figura 55: Estrategia de velocidad variable (patrón I): velocidad del cierre del hueco (v_g) y de la compactación de la preforma (v_p).

Los parámetros de compresión se muestran en la tabla 12. La letra corresponde a la estrategia de compresión, refiriéndose A para velocidad variable, cuyo número revela la velocidad de compresión en mm/s. El primer número, corresponde a la velocidad de cierre del hueco (v_g), y el segundo a la velocidad de compactación de la preforma (v_p). La velocidad cambia de v_g a v_p cuando el molde superior entra en contacto con la preforma. Debido a la pequeña distancia en la que se da la compresión y que el cambio de velocidad que se propone hacer es importante, en el anexo 1 se muestra la caracterización de los cambios de velocidad del estudio de la fase de compresión. Se ha podido verificar que las transiciones son muy rápidas y se puede considerar que el cambio de velocidad es inmediato.

Tabla 12: Condiciones de ensayos con cierre de prensa a velocidad variable.

	Patrón	v_g [mm/s]	v_p [mm/s]
A1/0,1	I	1	0,1
A1/0,5	I	1	0,5
A2/0,1	I	2	0,1
A2/0,5	I	2	0,5
A2/1	I	2	1
A5/0,5	I	5	0,5

En la figura 56 se muestran los resultados de los ensayos más representativos en cuanto a la evolución de la fuerza de cierre de molde frente a las curvas de desplazamiento. El comportamiento en la fase de cierre del hueco sigue las mismas reglas que las curvas de compresión a velocidad constante. A medida que aumenta la velocidad de compresión, aumenta la fuerza máxima y aparece la compactación de la preforma. Tan pronto como cambia la velocidad de compresión, en todos los casos hay un punto de inflexión en el que se observa una caída brusca de fuerza. Esta relajación aumenta a medida que aumenta la diferencia entre ambas velocidades. Se supone que este cambio está relacionado por una parte con la relajación de la preforma

compactada durante la fase de cierre de hueco y por otra con la reducción de la velocidad de cierre. Finalmente, en la última etapa de compactación de la preforma, el aumento de la fuerza de cierre es más rápido cuanto más rápida es la velocidad de compresión. La comparación de las estrategias de compresión A2/1 y A2/0,5 confirman estos argumentos. En A2/1, la caída de fuerza es menor que en A2/0,5, y la fuerza de cierre final en A2/1 alcanza su valor máximo al final de la compactación, mientras que para A2/0,5 la fuerza final es similar a la del cierre del hueco. Las estrategias de compresión con velocidades más lentas que A2/0,5 muestran comportamientos equivalentes, pero los tiempos de ciclo se ven penalizados.

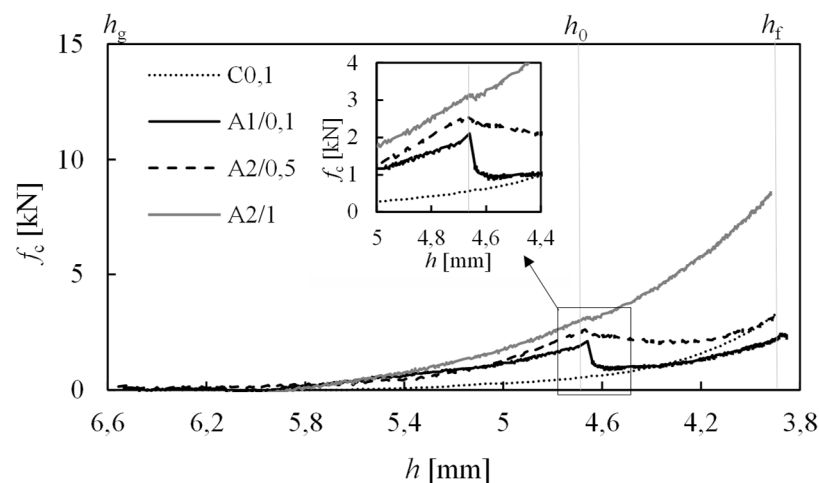


Figura 56: Evolución de la fuerza en términos de nivel de compactación de preformas a diferentes velocidades.

La figura 57 muestra los dos valores de salida principal de la fase de compresión, la fuerza máxima de cierre (f_c) y el tiempo total del ciclo (t_c), para las estrategias de velocidad constante y variable. Con respecto a la estrategia de velocidad constante, no es posible combinar fuerzas de cierre bajas y tiempos de ciclo cortos. Sin embargo, el uso de la estrategia de velocidad variable permite reducir las fuerzas de cierre a la vez que los tiempos de ciclo son relativamente cortos. La mejor estrategia de compresión se encuentra en el extremo izquierdo y más bajo del gráfico (A2/0,5); se puede ver que el caso A2/0,5 es casi tan rápido como el más rápido de los casos de control constante (C1 y C2), pero con aproximadamente un tercio de la fuerza de cierre. Además, su fuerza es similar al caso C0,1 pero con un tiempo de ciclo un 85% más corto. Utilizando una velocidad de compactación variable más rápida (A2/1 y A5/0,5), el tiempo de ciclo es prácticamente el mismo, pero la fuerza de cierre aumenta hasta los valores del ensayo C1. Si se utiliza una velocidad de compactación más lenta (A1/0,1), la reducción de la fuerza de cierre es residual y el tiempo de ciclo aumenta en aproximadamente un factor de 4.

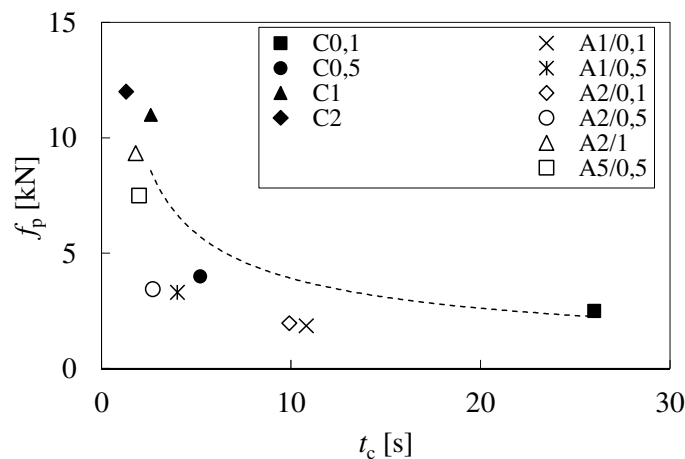


Figura 57: Fuerza máxima y tiempo de ciclo para las estrategias de compresión de velocidad constante y variable.

Estudio de la presión interna

La fuerza de cierre registrada por la prensa es la suma de la compactación de la preforma y la presión interna generada durante la compresión, pero para comprender mejor este fenómeno, conviene analizar la distribución de presión interna. La figura 58 muestra la señal de los sensores de presión durante toda la etapa de compresión para las condiciones de procesado del ensayo C1 (figura 58a) y A2/0,5 (figura 58b). Se puede observar que en ambos casos, la evolución de la presión sigue el mismo patrón que el registrado por la célula de la prensa (figuras 42 y 56). Analizando el frente de flujo, se puede ver que en el ensayo A2/0,5 los sensores S_1 y S_3 muestran un tiempo de detección de flujo diferente, confirmando que el flujo a pesar de fluir en la dirección del espesor, también fluye en el plano. Sin embargo, el análisis cuantitativo da nueva información sobre el proceso. La Figura 58c muestra la presión máxima para cada sensor y se obtienen dos conclusiones principales: i) la presión interna para la estrategia de velocidad variable es menor en todo el molde, y ii) la distribución de presión en el molde es constante, mientras que con la velocidad constante se generan gradientes de presión. Por consiguiente, para la estrategia de velocidad variable se requiere un menor tonelaje de prensa, moldes que soporten menos fuerza y un control de paralelismo más sencillo.

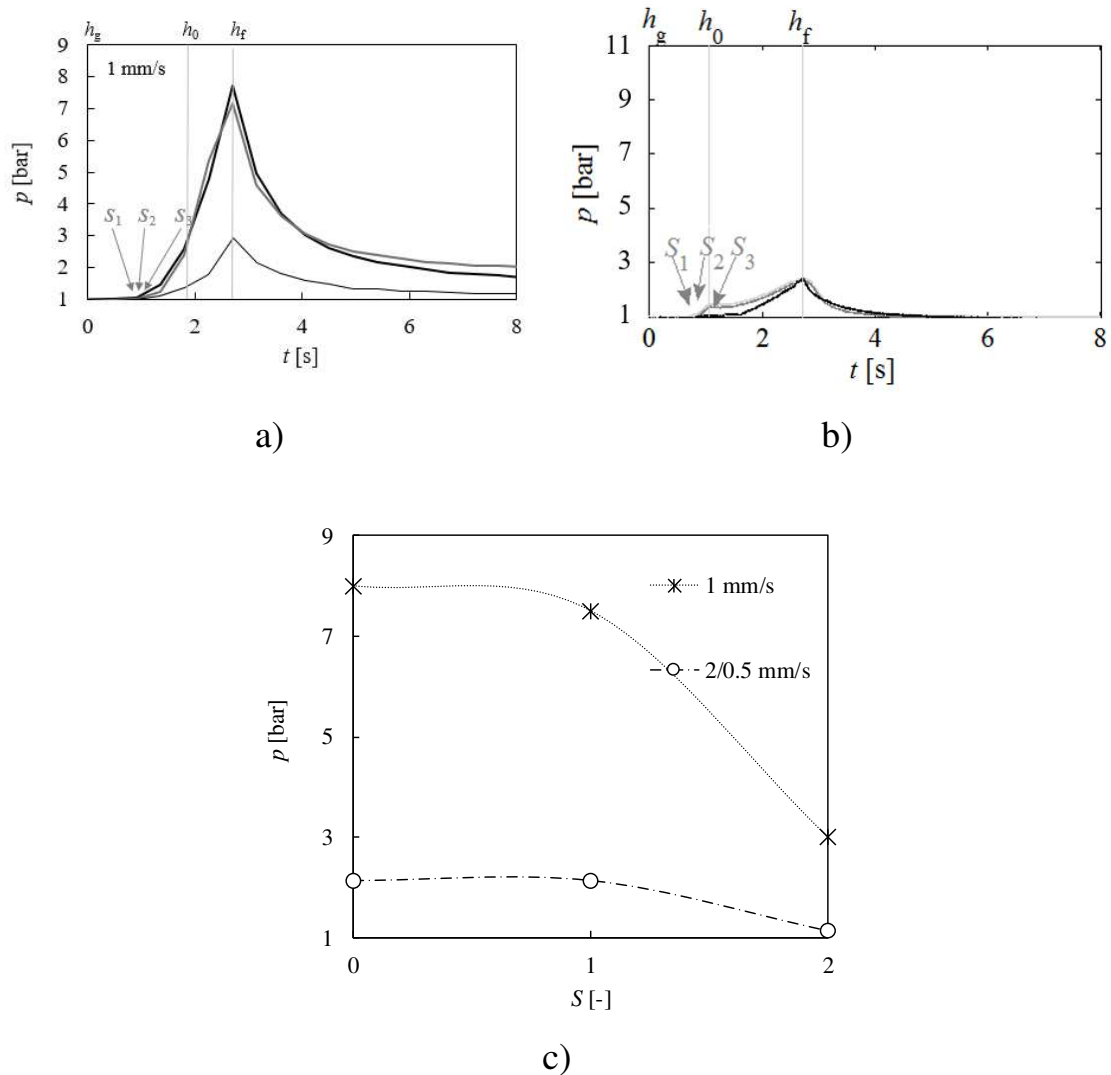


Figura 58: Distribución de presión: a) C1, b) A2/0,5, y c) presiones máximas de ambos.

Análisis microscópico de los materiales

Debido a que se propone una nueva estrategia de compresión, se considera imprescindible determinar la calidad de los materiales compuestos en términos de porosidad de los ensayos C1 y A2/0,5. En la figura 59 se pueden ver las micrografías de las secciones transversales pulidas. Se ha demostrado que el nivel de porosidad para C1 y A2/0,5 es muy baja. Además, a pesar de obtener zonas ricas en ligante entre las mechas, no se han generado macro poros, demostrado que la estrategia de compresión influye fuertemente en la generación de micro y macro poros.

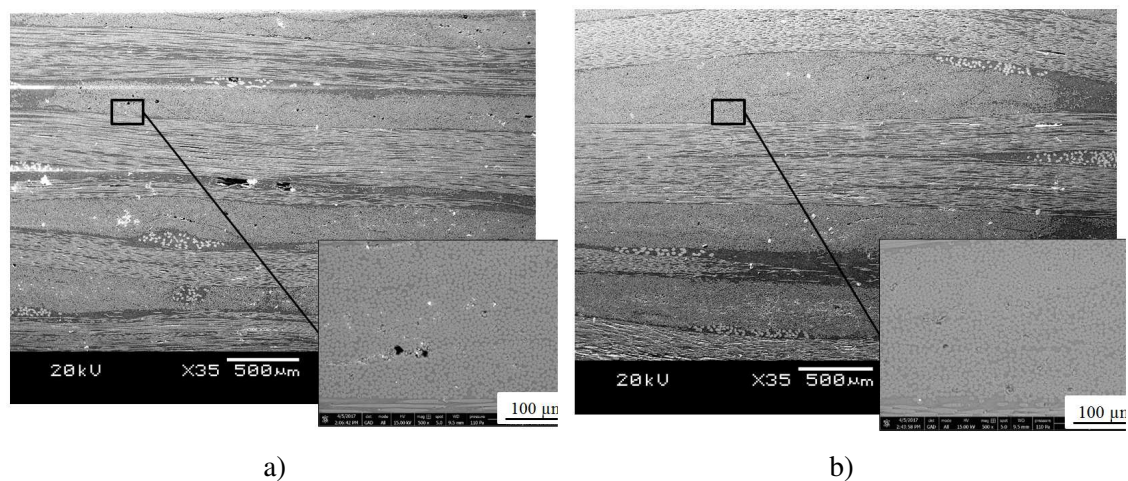


Figura 59: Nivel de porosidad. Imágenes obtenidas con el microscópico óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM): a) Ensayo C1 y b) ensayo A2/0,5.

4.5 RTM vs. CRTM sin hueco vs. CRTM con hueco

Una vez analizada la fase de inyección y compresión del CRTM, y seleccionada la estrategia de fabricación óptima del CRTM, se ha llevado a cabo una comparación del proceso de CRTM optimizado con las variantes de RTM más convencionales. Los procesos de fabricación analizados son: RTM convencional, CRTM sin hueco (CRTM SG) y la estrategia óptima del CRTM (A2/0,5). Los parámetros de proceso para cada estrategia se recopilan en la tabla 13.

La secuencia de procesado de RTM es la siguiente: se cierra el molde hasta la cota final, se aplica el vacío y se inyecta a presión de inyección constante hasta inyectar todo el volumen de resina. Una vez que la resina haya curado, se desmoldea la pieza.

En el caso del CRTM sin hueco (CRTM SG), las condiciones de procesado se han seleccionado en base a los ensayos de menor tiempo de ciclo encontrados en la bibliografía [36]. La secuencia de procesado ha sido la siguiente: se cierra el molde hasta la altura inicial, h_0 , se inyecta la resina, y debido al aumento del espesor inicial, la resina fluye más fácil que en el RTM convencional, sin embargo, a diferencia del CRTM estudiado en este trabajo, la resina fluye en la dirección del plano. Finalmente, una vez inyectada la resina, se cierran los puntos de inyección y se compacta la preforma hasta la cota final.

En cuanto al proceso de CRTM optimizado, las condiciones de procesado óptimas correspondientes al ensayo (A2/0,5) se han descrito en el apartado anterior.

Tabla 13: Condiciones de procesado de RTM, CRTM sin hueco (CRTM SG) y CRTM optimizado con velocidad variable. El parámetro h_0 es la altura inicial de la preforma antes de la inyección, h_f es el espesor final de las muestras una vez fabricada, P es el valor de la presión de inyección, y v_c es la velocidad de la compresión, dividida en el caso de CRTM en v_g , velocidad del hueco y v_p velocidad de la preforma.

	h_0 [mm]	h_f [mm]	P [bar]	v_c [mm/s]	
				v_g	v_p
RTM 1	3,9	3,9	6	-	2
CRTM SG	5,6	3,9	4	-	0,1
CRTM A 2/0,5	4,7	3,9	1	2	0,5

En la tabla 14 se muestran los tiempos de ciclo de cada proceso. El tiempo de ciclo total (t_T) del CRTM frente a RTM es 2,2 veces menor y 3 veces menor que CRTM SG. En el RTM el parámetro más desfavorable es el tiempo de inyección. A pesar de que la resina se inyecta a mayores presiones, debido a la baja permeabilidad que muestra el tejido, presenta una mayor dificultad de impregnación. En el CRTM SG el parámetro crítico es la velocidad de compactación de la preforma; a pesar de que se haya escogido la velocidad más alta encontrada en la bibliografía en este tipo de procesos, no son estrategias optimizadas, de cara a una producción industrial. Además, ha sido el proceso en el que se ha registrado una mayor fuerza.

Tabla 14: Tiempos de ciclo de cada proceso.

	Tiempos de ciclo			
	P_i [bar]	t_i [s]	t_c [s]	t_T [s]
RTM	6	16	1,2	17,2
CRTM SG	4	8	15	23
CRTM A2/0,5	1	4	3	7

En la figura 60 se analiza la evolución de la fuerza de cierre durante el cierre del molde. Cabe destacar que los tres procesos han requerido una fuerza de cierre baja, siendo la diferencia de fuerzas de 1 kN entre el mejor y el peor de los casos. No obstante, la evolución de cada una de las fuerzas es diferente. Al principio del cierre en el caso de CRTM SG no se ve ningún aumento de fuerza. A partir de la posición (A) en la que el contenido en fibra equivale al 40%, la fuerza empieza a crecer exponencialmente hasta que el molde se cierre completamente. En el caso del RTM el molde se cierra sin resina, con la preforma seca, siguiendo una tendencia similar al CRTM SG, pero debido a la ausencia de la resina las fuerzas en todo momento son menores. Por último, en el CRTM optimizado, se comprueba que la evolución de la fuerza es diferente al resto. El inicio del cierre se da a la misma velocidad que para el RTM pero la fuerza es mayor. Este aumento de

fuerza se debe a la resina que se está empujando para que se distribuya por el hueco y que entre en la preforma. Como se ha comentado en el anterior apartado, una vez que el molde superior se pone en contacto con la preforma, la velocidad se reduce, de tal manera que a partir de este instante casi no se sobrepasa la fuerza total obtenida en el cierre del hueco.

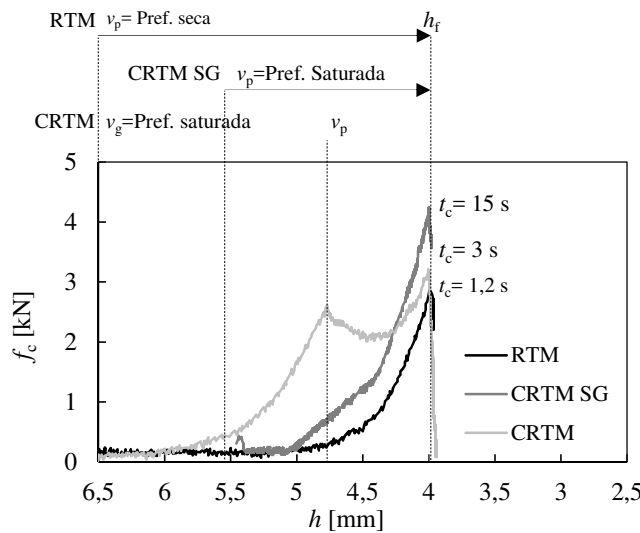


Figura 60: Resultados de procesado: Tiempos de ciclo y evolución de la fuerza de cierre según la posición del molde superior, para RTM, CRTM SG y CRTM A2/0,5

Estudio de la presión interna

La figura 61 muestra la presión interna generada dentro del molde para los casos de RTM, CRTM SG y CRTM A2/0,5. La presión máxima se ha medido en el sensor central del molde en el caso del RTM, ya que para que la resina llegue a impregnar los extremos de la pieza, se necesita un gradiente de presión considerable. En cambio, CRTM SG y CRTM A2/0,5 muestran una distribución de presiones similar. El valor máximo obtenido en ambos casos es muy bajo y la distribución de presiones es homogénea en la dirección radial.

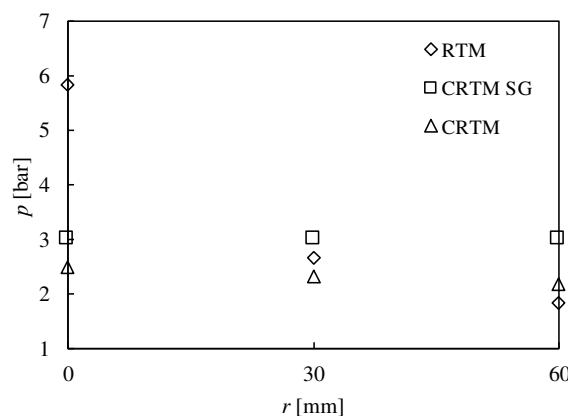


Figura 61: Distribución de presión dentro del molde; RTM, CRTM SG y CRTM.

Análisis microscópico del material

En el anterior apartado se ha estudiado los tres procesos en términos de prestaciones de equipamiento y tiempos de ciclo; sin embargo, la calidad de las muestras tiene que ser validada. Anteriormente se ha validado la calidad de las muestras fabricadas mediante CRTM. La figura 62 muestra las micrografías de RTM y CRTM SG. Se puede ver que en el RTM convencional existen algunos macro poros generados entre las mechas. En cambio, el CRTM SG muestra una calidad de pieza semejante a la del CRTM. En base a los resultados obtenidos de las micrografías, se ha demostrado que la fase de compresión a bajas velocidades ayuda a reducir la cantidad de macro poros generados. Esta reducción de poros puede ser debida a la presión generada por la prensa en la fase de compresión.

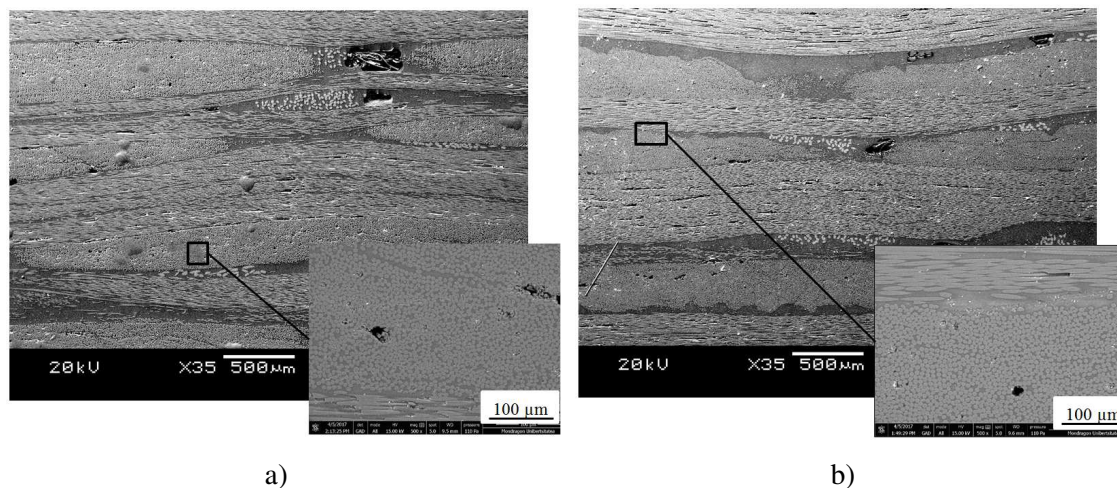


Figura 62: Micrografías de los procesos convencionales de LCM: a) RTM y b) CRTM sin hueco (CRTM SG).

4.6 Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la fase de compresión del CRTM, teniendo en cuenta aspectos tales como las estrategias de compresión diferentes o la influencia de la distribución inicial de la resina. A partir de los resultados obtenidos, se ha propuesto una nueva estrategia de compresión adaptada a las necesidades del CRTM. También se ha comparado el potencial del proceso frente a los procesos convencionales de RTM. En todos los casos se ha verificado la calidad del material resultante en términos de porosidad.

Las principales conclusiones obtenidas en el estudio de la fase de compresión son las siguientes:

- Se ha validado el *set up* de un banco de pruebas, donde se monitorizan las condiciones de inyección (caudal y presión), volumen inyectado, la fuerza de cierre del molde y velocidad, presión interna del molde en el tiempo y temperatura de la resina.

- Se han validado los patrones de inyección descritos en la fase de inyección (capítulo 3), por medio de los ensayos *short-shot*. De esta manera se comprueba cuál es la distribución final de la resina antes de la compresión.
- Estrategias de compresión constante: Los resultados de velocidad constante muestran que el tiempo de ciclo se acorta cuando se aplican velocidades más rápidas, pero la fuerza máxima de cierre aumenta en mayor proporción y el proceso se aleja de las condiciones óptimas. En cambio, los resultados del cierre de prensa a fuerza constante muestran que hay dos tramos de cierre claramente diferenciados: el cierre del hueco y la compactación de la preforma. Con esta estrategia, cabe la posibilidad de que el tiempo de cierre varíe en función de las singularidades de la preforma, lo que genera una incertidumbre de cara a un proceso industrial robusto. Para evitar esta incertidumbre, habría que sobredimensionar la prensa, lo que aumentaría considerablemente los costes.

Debido a estos inconvenientes y que la optimización de control de velocidad con la inyección de resina en el hueco no ha sido estudiada en profundidad en la bibliografía, se ha seleccionado el control de velocidad como el de mayor interés.

- Se ha demostrado que la distribución final de la resina tiene una gran influencia en la evolución de las fuerzas de cierre del CRTM. El sobre-volumen de resina inyectado genera una presión interna mayor, lo que demuestra que la optimización de la fase de inyección y compresión es fundamental para una reducción en tiempos de ciclo y prestaciones de maquinaria. También se ha podido comprobar que el incremento de fuerza debido a la sobre-inyección de resina es independiente a las condiciones de procesado.
- Velocidad variable: Se ha comparado la estrategia basada en la velocidad constante y un nuevo enfoque de velocidad variable en el que el cierre del hueco y la compactación de la preforma se llevan a cabo con velocidades diferentes. Teniendo en cuenta que a velocidad constante el aumento de la fuerza de cierre es menor durante la fase de cierre del hueco que durante la compactación, se ha propuesto utilizar una velocidad rápida para el cierre del hueco y una velocidad más lenta para la compactación de la preforma. Entre los parámetros de velocidad variable estudiados, el cierre del hueco a 2 mm/s y la compactación de la preforma a 0,5 mm/s permite obtener el tiempo de ciclo más corto combinado con la fuerza de cierre más baja. Además, la presión es más baja y su distribución más homogénea que en el caso de velocidad constante.

La calidad de los demostradores obtenidos empleando una velocidad de compresión variable es equivalente a la obtenida con una velocidad constante. En consecuencia, se puede postular que el empleo de una velocidad de compresión variable permite un proceso CRTM más rápido con prensas de menor tonelaje, moldes más baratos y un

control de paralelismo menos sofisticado, sin que esto implique ninguna pérdida de calidad.

- Una vez determinada la mejor estrategia de compresión de CRTM con velocidad variable, ésta se ha comparado con los procesos más presentes en la bibliografía, siendo éstos el RTM y el CRTM sin hueco (CRTM SG). El CRTM muestra el menor tiempo de ciclo y menores requerimientos en cuanto sistemas de inyección, aunque las fuerzas máximas de cierre han sido parecidas. En cuanto a la distribución de presiones, mientras que CRTM y CRTM SG muestran una presión baja y distribución homogénea, en el RTM se genera un gradiente de presión alto. Por consiguiente, el CRTM muestra resultados más competitivos en cuanto a tiempos y requerimientos en instalaciones.

Capítulo 5

Monitorizado del proceso

Los resultados obtenidos durante la caracterización de la resina son difícilmente extrapolables al proceso real, de ahí que los sistemas de monitorizado de procesos sean importantes a la hora de interpretar el comportamiento de la resina en condiciones reales. En la presente tesis se cuenta con diferentes sensores, como termopares, sensores eléctricos y transductores de presión integrados en el molde. La función principal de los sensores de presión ha sido la de detectar la llegada del frente de flujo y monitorizar la presión interna del molde. Sin embargo, en esta tesis se pretende explorar la validez de los transductores de presión para comprender el comportamiento del curado de la resina dentro del molde, como información complementaria al resto de sensores específicamente desarrollados para monitorizar el curado. La hipótesis de partida es que la contracción asociada al curado [79] modifica la presión interna, y que la sensibilidad de los sensores permite detectar dichas alteraciones. A fin de interpretar la relación entre la variación de presión y el grado de curado de la resina, se necesita utilizar información directamente ligada al curado, como puede ser la del sensor eléctrico [80] o el modelo de curado de Kamal-Sourour (ecuación 2.2).

5.1 Interpretación de la señal del sensor de presión durante el curado

Para seleccionar el sensor de presión se debe tener en cuenta la compatibilidad que muestra con las condiciones de procesado típicas de RTM presión y temperatura, los materiales procesados, la capacidad de integrarlo en el molde, el poder ser utilizado permanentemente sin afectar a la pieza final y realizar la captación de la señal en tiempo real. Basándose en estos principios, se han utilizado sensores de presión (PX61V-0500AV) que miden en un rango de 0 a 30 bar, con una frecuencia de muestreo de 1,6 kHz. Como sensor eléctrico, se utiliza un sistema Optimol de la casa Synthesites, que además de medir la resistencia, también incorpora un termopar para registrar la temperatura. La figura 63 muestra una descripción gráfica del utillaje para el análisis del curado.

El utillaje está compuesto por un molde inferior fijo y uno superior móvil donde se han colocado los dos sensores. El utillaje se ha calentado mediante un sistema de calentamiento eléctrico. Una vez que las dos placas de acero han alcanzado la temperatura de curado, la fibra seca se ha impregnado de resina y se ha introducido entre las dos placas donde se registra la señal de ambos sensores durante todo el procesado. Con el objetivo de proporcionar un amplio abanico de temperaturas con las que poder estudiar y optimizar el proceso de fabricación, se han analizado las temperaturas comprendidas entre 80 y 120 °C, con 3 repeticiones para cada una de las temperaturas.

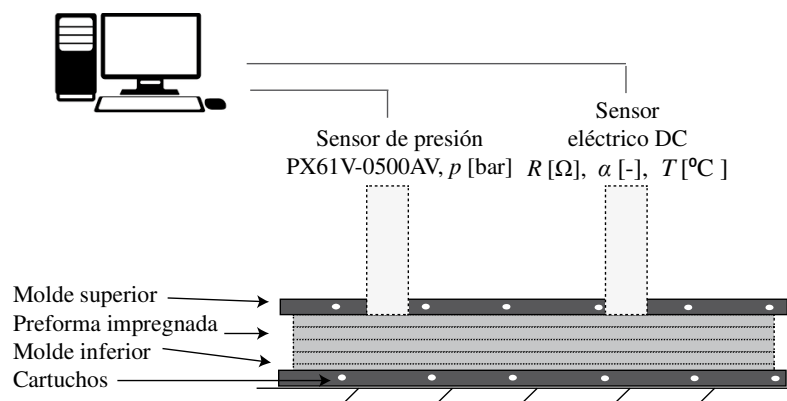


Figura 63: Esquema de la configuración del ensayo para la interpretación de la señal del sensor de presión.

La figura 64 muestra la señal de ambos sensores en el tiempo y a diferentes temperaturas. 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 en cada instante (R), el grado de conversión equivalente (α), que se estima con la ecuación 2.2 y los parámetros de la tabla 3, y la temperatura de la resina (T) registrada por el sensor eléctrico. 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 aumenta su 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 durante 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 [79]. 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 por encima del 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 resina epoxy alcanza aproximadamente un 50% de sus propiedades finales [79]. Por lo tanto, y dependiendo de la complejidad del componente que se esté fabricando, la rigidez puede ser suficiente como para poder desmoldarlo. 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.

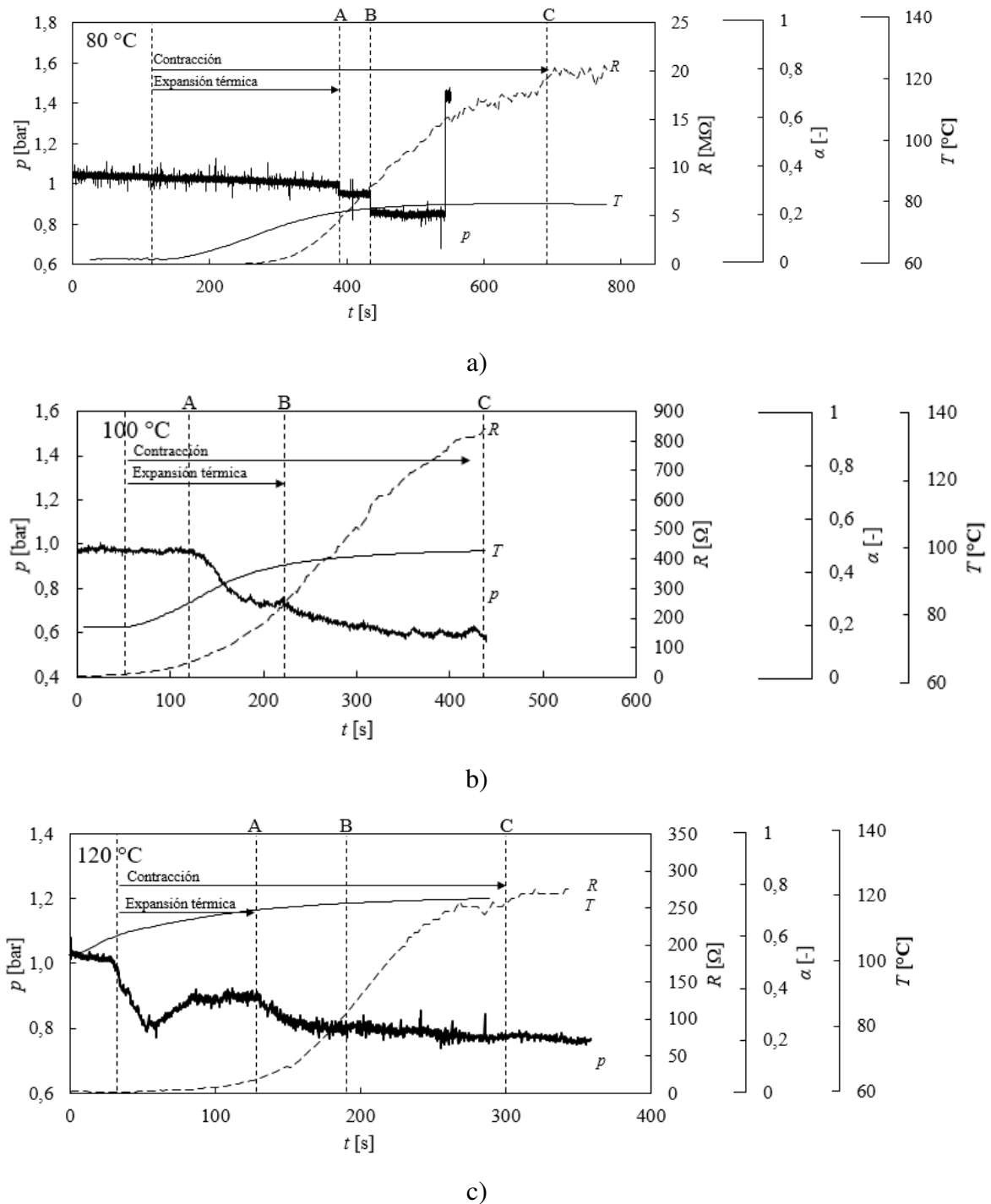


Figura 64: Señal del sensor de presión frente al sensor eléctrico DC durante el curado: a) 80 °C, b) 100 °C, 120 °C.

Una vez entendido el comportamiento de los sensores de presión frente al grado de conversión, la figura 65 muestra la señal del sensor eléctrico (DC), marcando el inicio y final de curado para cada temperatura. También se representan los tres picos de señal obtenidos de los sensores de presión (SP) referentes a la zona A, B y C. Se ha podido ver que la señal de ambos sensores coincide en el límite inicial y final del curado. Debido a que una vez que se da la contracción (zona B) la pieza muestra suficiente rigidez como para desmoldarla, esta zona define el momento en el cual se puede desmoldar la pieza. Por último, basándose en el modelo de la viscosidad, se grafica el límite del tiempo de gel por cada temperatura. Para los posteriores ensayos realizados, esta gráfica determinará la ventana de proceso en función de la temperatura de procesado.

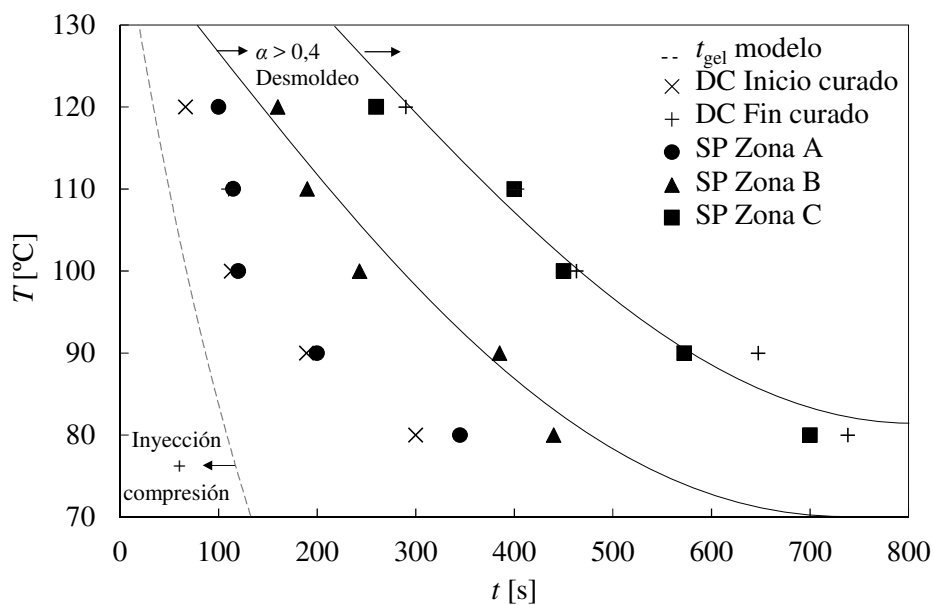


Figura 65: Ventana de proceso en función de la temperatura de curado. DC referente al sensor eléctrico y SP referente al sensor de presión.

5.2 Conclusiones

En este capítulo se ha determinado la ventana de proceso óptima para la fabricación de un demostrador empleando sensores de presión. Para calibrar e interpretar la señal del sensor de presión durante el curado, se ha utilizado un sensor DC y varios termopares.

Se ha podido comprobar que la contracción asociada al curado modifica la señal del sensor de presión, por lo que este tipo de sensores son válidos para aportar una información complementaria a otros sensores específicos para monitorizar el curado.

Capítulo 6

Estudio de un componente de automoción

En los capítulos anteriores se ha estudiado el comportamiento de los parámetros de procesado de la fase de inyección y compresión para una geometría simple. Sin embargo, la validez de las conclusiones obtenidas en las aportaciones anteriores no está asegurada a la hora de transferir el conocimiento a aplicaciones reales, debido a que la mayoría de las aplicaciones industriales consisten en componentes con geometrías más complejas. La fabricación de geometrías no planas y de ratios geométricos altos muestra mayores retos: pueden dificultar la impregnación, se debe tener en cuenta la influencia del drapeado del tejido (permeabilidad local, compactación de la preforma), no se tiene una altura del hueco constante en toda la pieza, la distribución de la presión interna y temperatura es más compleja y en consecuencia, la reología y cinética de curado de la resina también lo son.

Por todo ello, en este apartado se presenta un estudio sobre la fabricación de un componente real de automoción. Primero, junto a la validación de la técnica de monitorizado descrita en el capítulo 5, se han optimizado las variables de procesado de RTM y CRTM experimentalmente. Después, se ha analizado la calidad de las piezas mediante el contenido en vacíos, y por último, se ha optimizado cada proceso mediante herramientas de simulación, y se ha realizado un análisis de costes preliminar, demostrando el potencial del CRTM.

6.1 Definición del prototipo: barra anti-intrusión

Para el análisis de este estudio se ha seleccionado una barra anti-intrusión de una puerta (figura 66). Con el objetivo de detectar las limitaciones de la fabricación, para el diseño de la pieza se han determinado los siguientes requisitos. Las dimensiones de la barra anti intrusión son 155 × 800 mm, con varios cambios de plano y diferentes grosores (desde 2,9 mm hasta 8,3 mm). El

diseño del prototipo, del molde y su fabricación corrió a cargo de Jon Lopez Nuñez en el marco de su trabajo fin de grado [81].

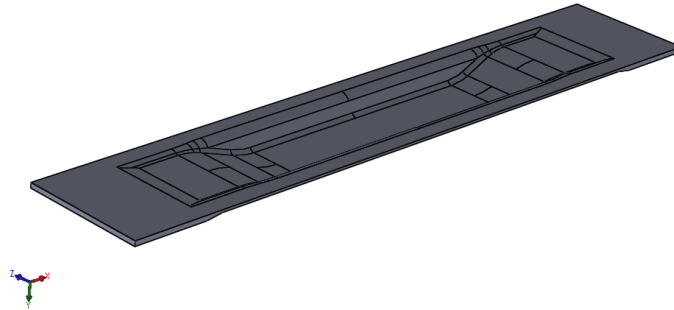


Figura 66: Geometría de la barra anti-intrusión [81].

La preforma que se ha utilizado para la obtención de la pieza no plana está compuesta por cuatro telas del tejido analizado en apartados anteriores y definido en el apartado 2.3 en la parte central y seis capas en los laterales, debido al aumento del espesor en los extremos de la pieza (figura 67). El ligante y la resina utilizada se describen en el capítulo 2.



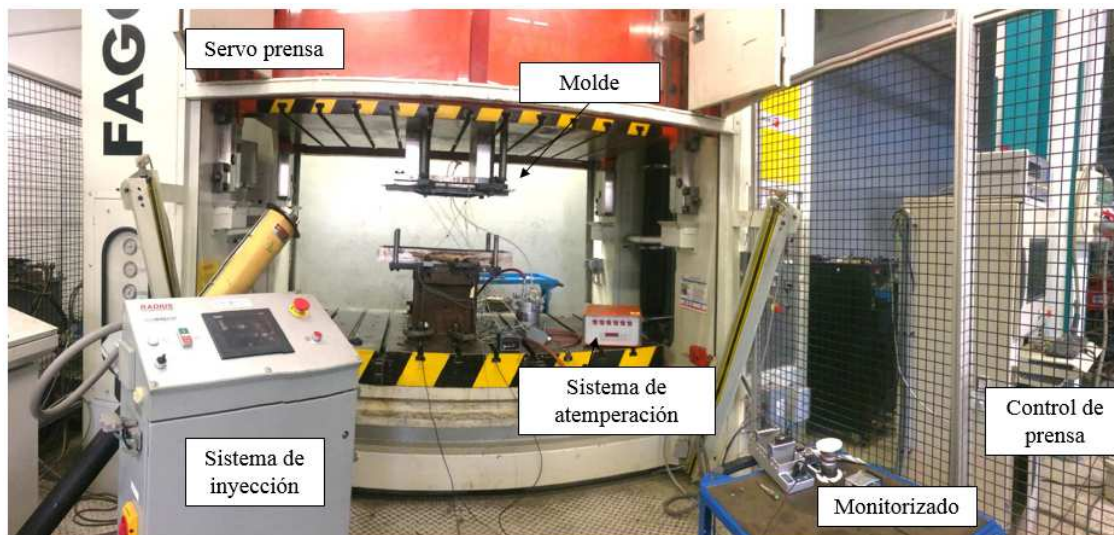
Figura 67: Configuración de la preforma utilizada para la fabricación de la pieza [81].

6.2 Método experimental

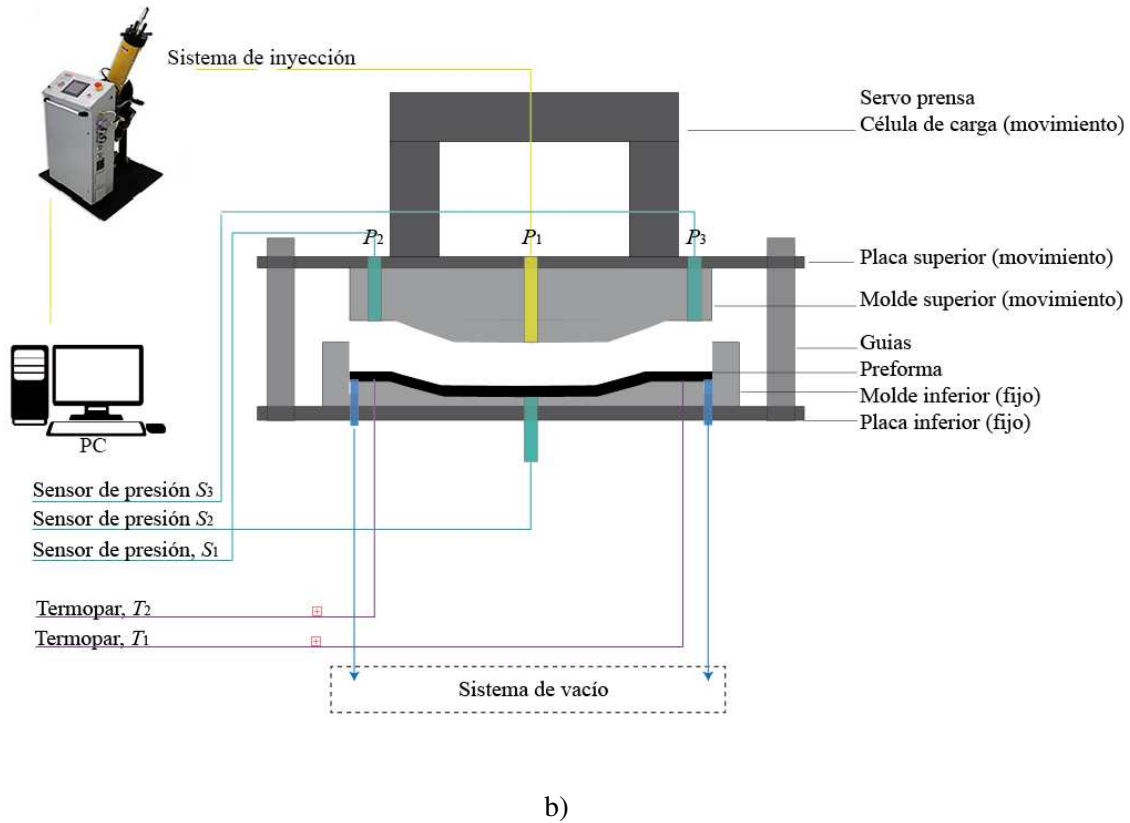
En este apartado se describe el montaje experimental que se ha diseñado para la fabricación de la pieza anti-intrusión mediante RTM y CRTM (figura 68a). El molde está compuesto por un semi molde inferior fijo y uno superior móvil que se amarra a una servo prensa mecánica de 400 t. Para la inyección se utiliza una inyectora eléctrica (2100cc Series RTM Injection System) con la cual se puede controlar el caudal o la presión. Según los puntos de inyección que se utilicen, la configuración del molde varía; en el caso de inyectar con un punto de inyección (figura 68b), la inyección se conecta en el centro del molde superior P_1 y los puntos de vacío en los dos extremos inferiores. Sin embargo, para la inyección con dos puntos (P_2 y P_3 de la figura 68b), se dispone de dos entradas de resina en los extremos del molde superior, y el vacío se conecta en la parte inferior central. Teniendo en cuenta que todos los ensayos tienen como objetivo fabricar piezas finales con un volumen de fibra final definido del 60%, el volumen de resina requerida es conocido. En

el caso de CRTM, la estrategia de compresión se realiza mediante control de velocidad, siendo de 0,3 mm/s. La selección de la velocidad proviene de los resultados obtenidos en la figura 46, donde se selecciona un valor promedio para el cual los valores de fuerza no superan los 4 kN, obteniendo un compromiso entre fuerza pico y tiempo. En cuanto al monitorizado del proceso, la fuerza de cierre requerida se registra mediante la servo prensa mecánica. Para controlar la impregnación de la preforma, la distribución de presiones dentro del molde y obtener una idea del nivel de conversión de la resina en cada instante, se colocan tres sensores de presión, dos en los extremos S_1 , S_3 y uno en el centro, S_2 . Para registrar la temperatura de la resina se introducen dos termopares, T_1 , T_2 (figura 68).

Para poder calcular el tiempo de ciclo, es necesario optimizar el tiempo de desmoldeo. Para ello, se emplearán los sensores de presión siguiendo las indicaciones sugeridas en el capítulo anterior.



a)



b)

Figura 68: Configuración del sistema de fabricación de la barra anti-intrusión: a) Fotografía del sistema, y b) esquema de la configuración.

En los procesos de RTM se producen diferentes fenómenos físico-químicos en diferentes etapas. Esto implica que hay fuertes interacciones y dependencias que deben tenerse en cuenta, y que la información del sistema de monitorizado resulta imprescindible para poder optimizar los parámetros de procesado. En la figura 69 se muestra el diagrama de control de flujo que permite controlar las diferentes etapas del proceso en 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 implantación de acciones correctivas a tiempo real.

En la figura 69a, se muestra un diagrama de control de flujo de resina en el RTM. Se divide en 4 grupos generales: (1) inicio de la inyección, donde se controla la presión de inyección P_i , caudal Q_i , la presión de vacío P_v , y se hace el control de frente de flujo validando el correcto llenado mediante los sensores de presión (S_1 , S_2 y S_3), termopares (T_1 y T_2) y controlando el volumen que se está inyectando en cada instante (V_i); (2) inicio de la reacción de curado; (3) fin de la inyección, donde se valida que: i) Todo el volumen de resina se ha introducido en el molde y ii) la viscosidad de la resina está por debajo de 1 Pa·s, y (4) el desmoldeo, momento en el cual mediante la señal del sensor de presión (S_1 , S_2 y S_3) se detecta el instante idóneo de desmoldeo, en base al análisis realizado en el capítulo 5.

En la figura 69b se muestra el diagrama de control de flujo del CRTM. El diagrama se divide 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 y sensores de presión (S_1 , S_2 y S_3). Cabe destacar, que debido a que el molde está parcialmente abierto (h_g), 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. Paralelamente, 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. Una vez comprobado que todo el volumen ha sido inyectado, se pasa a la fase de compresión (4). En este momento, se cierra el molde a velocidad constante y una vez finalizada la compresión, se validan los siguientes aspectos: i) la viscosidad de la resina debe de ser inferior a 1 Pa·s y, ii) los sensores de presión detectan la llegada del frente de flujo y debido a la compactación, la presión interna del molde aumenta. A continuación se aplica el vacío para extraer las posibles burbujas generadas dentro del molde y así reducir la cantidad de poros generados en la pieza final. Por último, basándose en la ventana de proceso definido en el apartado 5 y en la señal de los sensores de presión, se desmoldea la pieza (5).

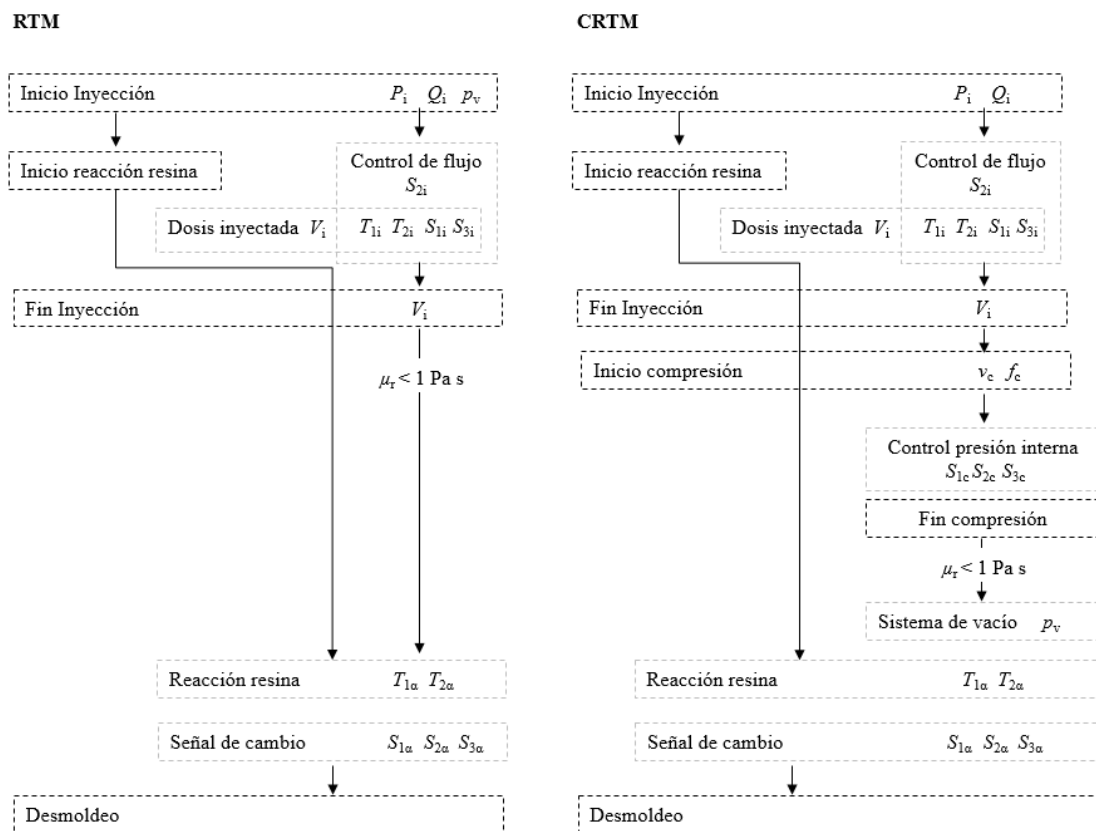


Figura 69: Diagrama de control de flujo: a) RTM y b) CRTM.

La puesta a punto del proceso de fabricación involucra a muchos parámetros de procesado que pueden variar en un amplio rango de valores. Para centrar el estudio de forma más eficiente, se han realizado simulaciones numéricas. En base a estos resultados las principales variable de proceso y los valores que se han empleado en el estudio experimental son:

- Rango de temperatura de curado de entre 60-120 °C. La definición de este rango se ha realizado considerando que el tiempo de llenado obtenido en la simulación debe ser menor al tiempo de gel, que depende de la temperatura del molde (ecuación 2.7).
- Volúmenes en fibra (45-55%). Como se ha comentado en el estado del arte, el RTM convencional tiene problemas para obtener piezas con gran contenido en fibra, por lo que se pretendía validar unos porcentajes adecuados para el RTM.
- El número de puntos de inyección. Visto los resultados preliminares [27], en los que para equiparar los tiempos de llenado del RTM con el CRTM se necesitaban varios puntos de inyección.

En este trabajo se muestran los ensayos más representativos de cada proceso, descartando aquellos casos en los que los tiempos de ciclo y las características de las piezas se alejan del objetivo

principal de eficiencia de proceso. En la tabla 15 se muestran los ensayos seleccionados, donde el primer número de la nomenclatura corresponde al número de puntos de inyección, y el segundo a la temperatura de curado. La temperatura de inyección de la resina ha sido 25 °C para todos los casos. En el caso de RTM, debido a los largos tiempos de inyección, y para poder comparar con el CRTM, se ha estudiado la inyección con uno y dos puntos de inyección y la temperatura de 60 a 80 °C. En el caso del CRTM solo se ha empleado con un punto de inyección, ya que es el proceso más rápido y la variable estudiada ha sido la temperatura en un rango de 80-120 °C.

Tabla 15: Ensayos realizados de RTM y CRTM.

	T_m [°C]	N_i
RTM-1-80	80	1
RTM-1-60	60	1
RTM-2-80	80	2
CRTM-1-80	80	1
CRTM-1-90	90	1
CRTM-1-100	100	1
CRTM-1-110	110	1
CRTM-1-120	120	1
CRTM- <i>short-shot</i> -100	100	1

6.3 Fabricación de la barra anti-intrusión

6.3.1 Fabricación empleando RTM

En la tabla 16 se muestran los resultados de las piezas realizadas mediante RTM, donde se define el tiempo de inyección t_i , el volumen de resina inyectado V_r , y tiempo total del ciclo t_T . En el caso del ensayo RTM-1-80, se puede ver que el volumen inyectado ha sido de un 40% de lo requerido, considerándose pieza no válida para el estudio posterior. La razón de no haber inyectado más volumen de resina se debe a la baja permeabilidad en el plano. Esto ha supuesto que la velocidad del frente de flujo sea demasiado baja, para el tiempo de gel disponible a 80 °C (t_{gel} de 110 s), no siendo suficiente como para impregnar toda la pieza. A pesar de que en el ensayo RTM-1-60, al disponer de mayor tiempo de gel, se haya llegado a impregnar casi toda la pieza, la inyección de RTM con un único punto de inyección no presenta tiempos de ciclo competitivos como para compararlo con las estrategias de CRTM.

Tabla 16: Ensayos de RTM realizados.

		t_i [s]	V_r [%]	t_T [s]
RTM-1-60	60 °C	340	80	800
RTM-1-80	80 °C	120	40	-
RTM-2-80	80 °C	110	100	460

Viendo que en el ensayo RTM-2-80 se ha llegado a inyectar todo el volumen de resina con un tiempo de ciclo competitivo, se realiza el estudio de proceso en términos de tonelaje de prensa, condiciones de inyección y señal de los sensores de presión (figura 70). La secuencia de fabricación ha sido la siguiente; una vez introducida la preforma dentro del molde, se cierra el molde hasta llegar a la cota final (1). A continuación se empieza a inyectar la resina con un caudal de 500 cm³/min y con la restricción de 30 bar de inyección (zona 2). A medida que se está inyectando, los sensores de presiones instalados a lo largo de la pieza empiezan a detectar señales relacionadas con la llegada del frente de flujo. Una vez finalizada la inyección, la resina empieza a curar (zona 3). En esta última fase de curado, basándose en la ventana de proceso definida en el capítulo 5, se determina el instante en el cual la pieza se puede desmoldear (zona B).

En el RTM-2-80 (figura 70), debido a que la inyección se realiza con dos puntos de inyección, se reduce el tiempo de inyección frente a los casos inyectados con un punto, permitiendo inyectar todo el volumen de resina. Analizando los sensores de presión, se puede ver cómo en la fase de inyección los tres sensores han detectado en frente de flujo. En cuanto a la fase de curado, basándonos en los valores del sensor de RTM-2-80 y en la ventana de proceso definida en el apartado 5, el desmoldeo se realiza en 460 s.

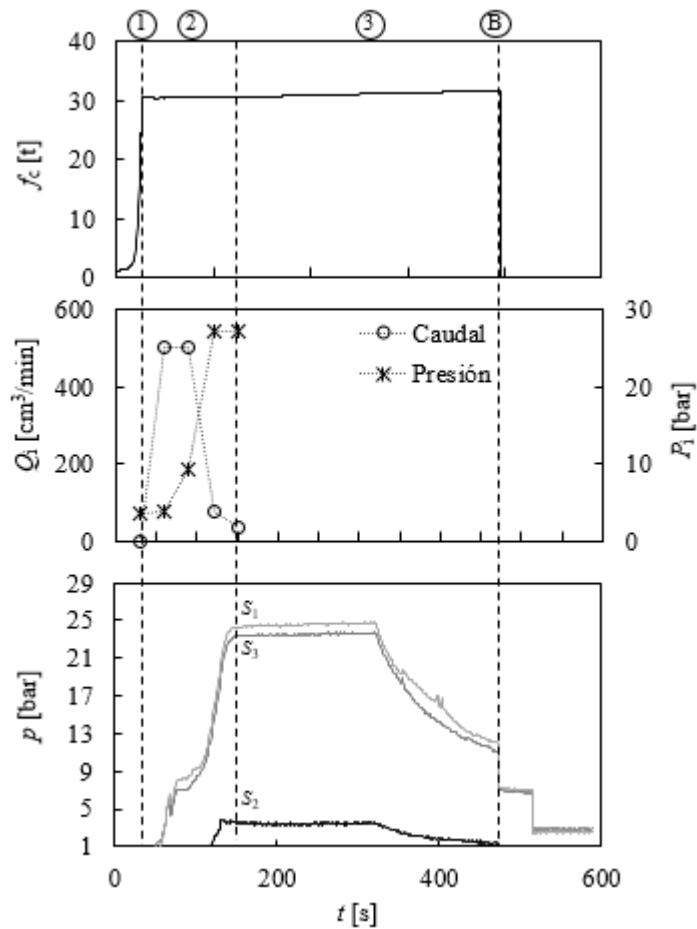


Figura 70: Resultados del ensayo RTM-2-80. Fuerza de cierre de prensa, parámetros de inyección y sensores de presión.

6.3.2 Fabricación empleando CRTM

El CRTM, debido a su bajo tiempo de inyección, se considera un proceso de alto potencial, por lo que sólo se estudiará el caso de un único punto de inyección. Dado que la resina se inyecta a temperatura ambiente en molde calefactado, la física asociada a la cinética de curado y reología de la resina es compleja; por ello, se considera imprescindible el estudio experimental de la diferencia de temperaturas entre resina y molde en condiciones reales de procesado [50]. Por ello, el parámetro estudiado ha sido la temperatura de procesado y para conocer el patrón de flujo generado en la inyección, se ha realizado un *short-shot* con la temperatura óptima.

Selección de la temperatura

Para analizar la influencia que ejercen las diferentes temperaturas de curado, se comparan los ensayos de CRTM realizados a 80 °C, 90 °C, 100 °C, 110 °C, y 120 °C. La consigna de la inyectora utilizada ha sido 500 cm³/min. Las figuras 71, 72 y 73 recogen los resultados del proceso a diferentes temperaturas.

La figura 71 representa el caudal y la presión de inyección media obtenida para las placas realizadas mediante CRTM. Se puede ver que para las temperaturas de curado comprendidas entre 80 °C y 100 °C, el caudal y la presión de inyección no varía demasiado, a pesar de que hay un ligero aumento de la presión a medida que la temperatura aumenta. Sin embargo, en los ensayos realizados a partir de 100 °C, y en base al comportamiento reológico de la resina, se detecta que el tiempo de inyección es mayor que el tiempo de gel, lo que conlleva a que las condiciones de inyección no sean las adecuadas. Consecuentemente, con las mismas condiciones de inyección, la presión generada en el punto de inyección es mayor y en respuesta a ese aumento de presión, el caudal se reduce, aumentando finalmente el tiempo de inyección.

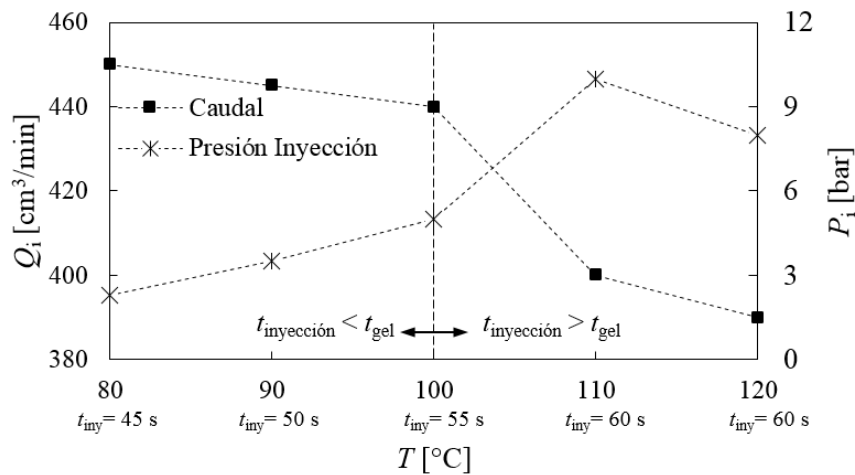


Figura 71: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM, condiciones de inyección frente a temperatura.

La figura 72 analiza la fuerza de compresión máxima en un rango de temperatura comprendido entre 80 y 120 °C. Se aprecia un incremento en la fuerza pico a medida que la temperatura aumenta, debido al aumento de la viscosidad de la resina. En los ensayos realizados a partir de 100 °C, el tiempo de inyección es mayor que el tiempo de gel, con el consecuente aumento de la fuerza de compresión y la dificultad de obtener una buena impregnación.

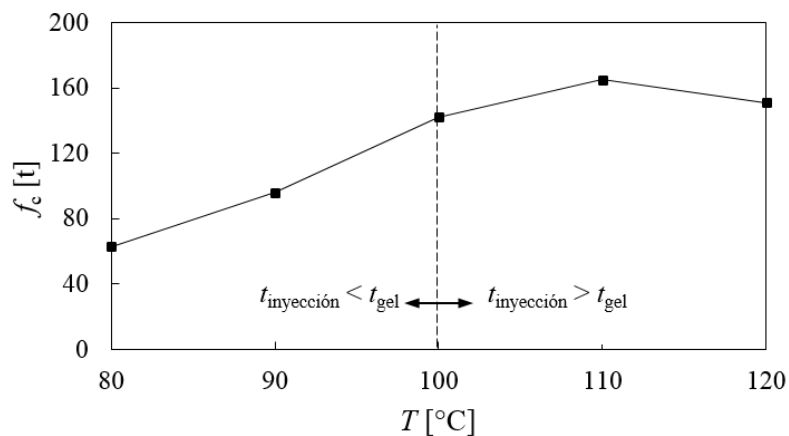


Figura 72: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM, tonelaje de prensa frente a temperatura.

En cambio, la figura 73 muestra que la temperatura no influye en la presión hidrostática generada. El valor de los sensores laterales de presión es más bajo (S_1 y S_3), para las temperaturas superiores a 100 °C, lo que se debe a que la pieza no ha impregnado las zonas en las que están los sensores.

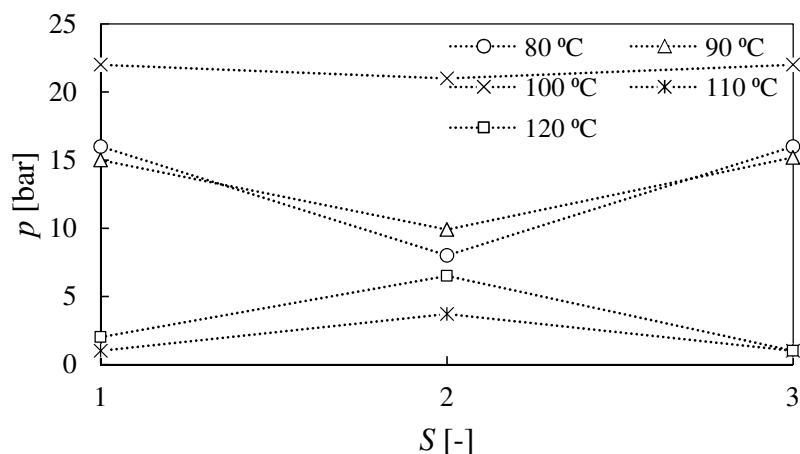


Figura 73: Resultados de las piezas fabricadas mediante CRTM: Señal de los sensores de presión frente a temperatura.

Una vez analizada la influencia de la temperatura en general, se analizan las tres temperaturas más representativas; CRTM-1-80, CRTM-1-100 y CRTM-1-120. El proceso de fabricación de CRTM se puede dividir en cuatro etapas: posición inicial de la prensa h_g (1), inyección de la resina (zona 2), cierre de prensa hasta llegar al espesor final de la pieza h_f , curado (zona 3) y por último, el desmoldeo (zona B).

En la figura 74 se muestran las condiciones de proceso del ensayo CRTM-1-80. Una vez finalizada la inyección, se puede ver cómo los sensores de presión no han detectado el frente de flujo, pero todo el volumen de resina ha sido inyectado. A diferencia del RTM, esto se debe a que

la resina tiende a ir por el hueco, y debido a que la altura de la cavidad del molde es mayor, no llega a llenar toda la pieza. En cambio una vez que el molde superior empieza a cerrar el molde hasta la cota final, se puede apreciar el incremento de la presión hidrostática. Por último, en cuanto al desmoldeo, debido a que la temperatura del molde es de 80 °C, no se puede desmoldear hasta que han transcurrido 420 s, como muestra la señal de presión en la zona B.

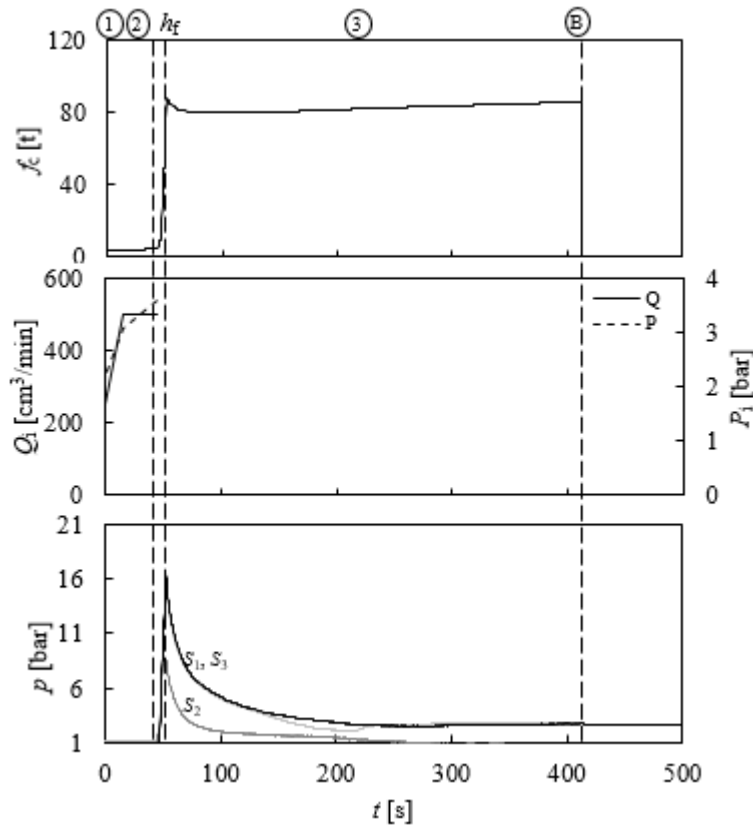


Figura 74: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-80.

El ensayo CRTM-1-100 muestra unas condiciones de proceso semejantes al ensayo CRTM-1-80, con la diferencia de que la presión de inyección y la presión interna son mayores. La presión interna en los extremos del molde (S_1 y S_3), aumenta debido a la presión hidrostática generada. Al cerrar el molde la dirección del flujo tiende a ir a los extremos, aumentando considerablemente la presión. A diferencia del ensayo CRTM-1-80, mantener el molde a 100 °C posibilita la opción de desmoldear una vez transcurridos 250 s llegando a ratios de tiempos de ciclo más competitivos.

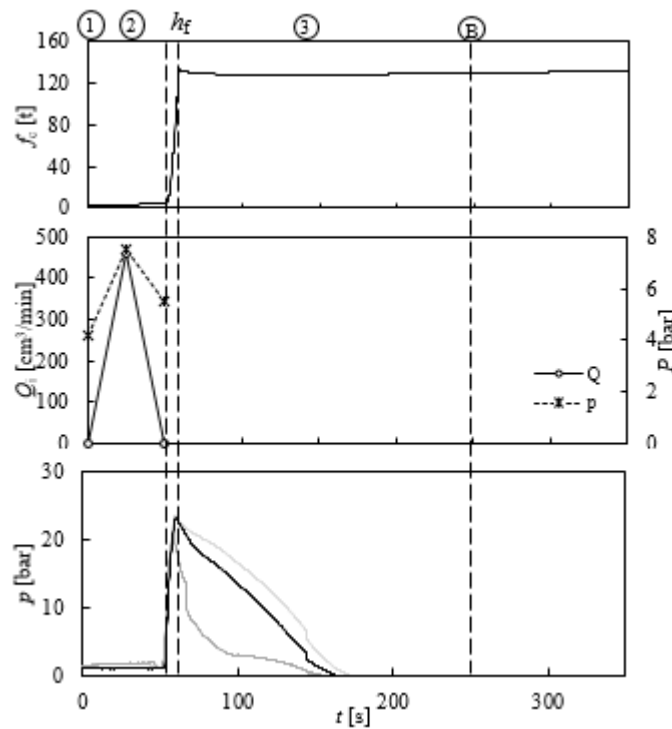


Figura 75: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-100.

Por último, en el ensayo CRTM-1-120 (figura 76), debido a la alta temperatura del molde, la viscosidad aumenta rápidamente, haciendo que la presión de inyección aumente considerablemente y el sensor de presión central detecte la presión generada del frente de flujo (instante i). En cambio, la presión de los sensores laterales no aumenta. Esto se debe a que la resina no ha podido llegar a impregnar los extremos de la pieza.

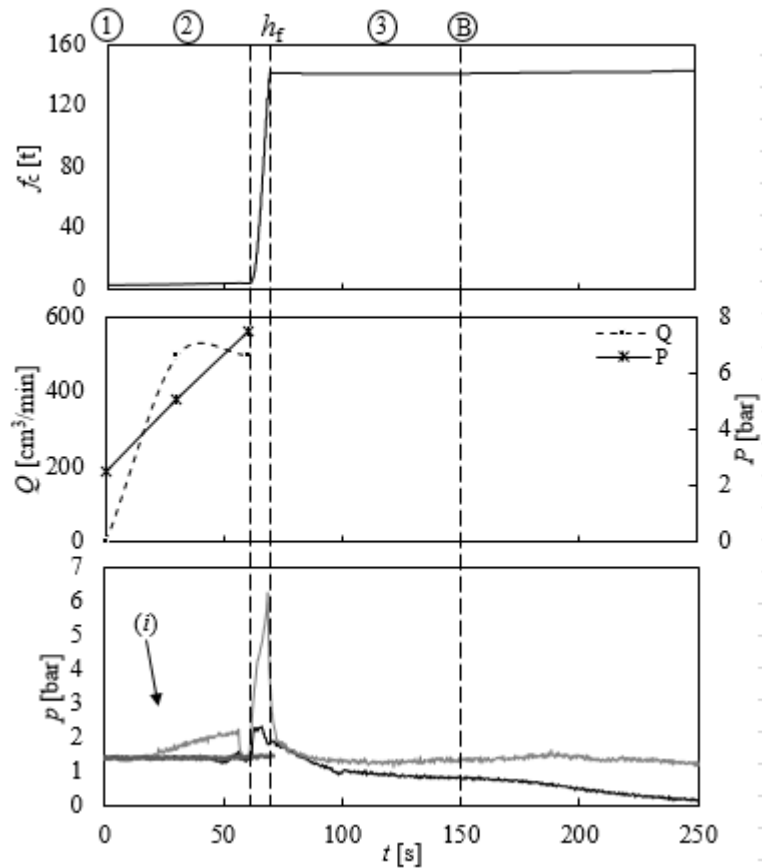


Figura 76: Resultados del sistema de monitorizado de ensayo: CRTM-1-120.

Short shot del ensayo óptimo

Viendo que el ensayo CRTM-1-100 muestra los resultados más competitivos en términos de tiempos de ciclo, se considera imprescindible el estudio del patrón inicial de la resina. Para ello, se han realizado ensayos de *short-shot* (descripción del ensayo en el capítulo 4). Se puede ver como a pesar de la heterogeneidad del espesor del hueco, toda la superficie superior está impregnada (figura 77). La superficie inferior de la pieza también está parcialmente impregnada, aunque esto puede deberse a que la resina haya fluido en dirección del espesor por la baja viscosidad inicial de la resina.

En la figura 77a se observa que los dos extremos de la pieza no muestran el mismo acabado en la superficie. El extremo derecho presenta una superficie rugosa debido a la resina que ha fluido por el hueco. Sin embargo, en el extremo izquierdo el acabado de la superficie se asemeja al acabado obtenido de la pieza final, concluyendo que la resina ha estado en contacto con la superficie del molde en el momento del curado, lo que se atribuye a una falta de paralelismo del molde. Al no tener hueco en el extremo izquierdo, la cantidad de resina introducida ha sido menor que en el

lado derecho. Esto hace que la impregnación de la preforma en la cara inferior ha sido menor (figura 77b).

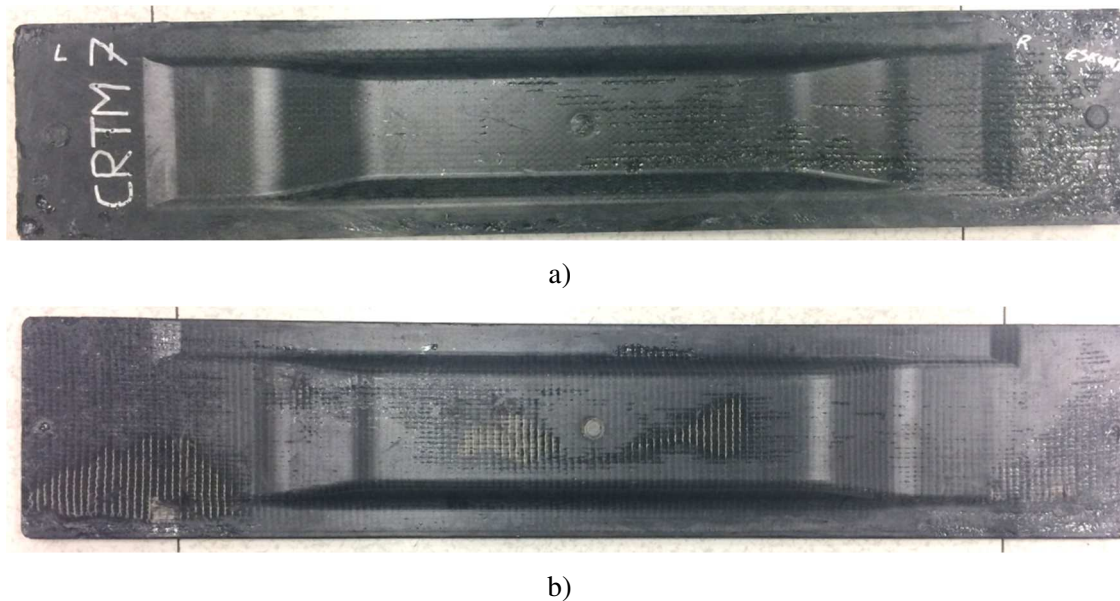


Figura 77: Short shot del CRTM3: a) Vista de la superficie superior, b) vista de la superficie inferior.

6.3.3 Eficiencia de proceso

A continuación se comparan los resultados obtenidos en RTM y CRTM. Para analizar la eficiencia de cada proceso no solo es suficiente el análisis del tiempo de ciclo de cada proceso, sino que, en un proceso eficiente, se requiere de un análisis de calidad de las piezas en términos de porosidad, ya que ésta está ligada a las propiedades finales de la pieza.

Tiempos de ciclo

Para comparar los tiempos de ciclo de ambos procesos, en la figura 78 se han recogido los tiempos de ciclo de cada pieza fabricada definiendo los criterios establecidos en el capítulo 5. En el eje horizontal se representa el tiempo de ciclo y en el eje vertical la temperatura de molde. Se marca el límite del tiempo de gel por temperatura y se definen las zonas B y C referentes a grados de conversión mayores que 0,4 y 0,8, respectivamente. Para definir cada ensayo en la gráfica, se define una barra a la altura de la temperatura de proceso dividida en tres etapas: inyección, compresión (en el caso de CRTM) y curado. Una de las condiciones para que la pieza impregne adecuadamente es que el tiempo de gel sea mayor que el tiempo de inyección más el de compresión. Basándose en este criterio e imponiendo como prioritario el conseguir un menor tiempo de ciclo, la temperatura óptima para la fabricación mediante CRTM es 100 °C y en el caso de RTM con dos puntos de inyección es 80 °C.

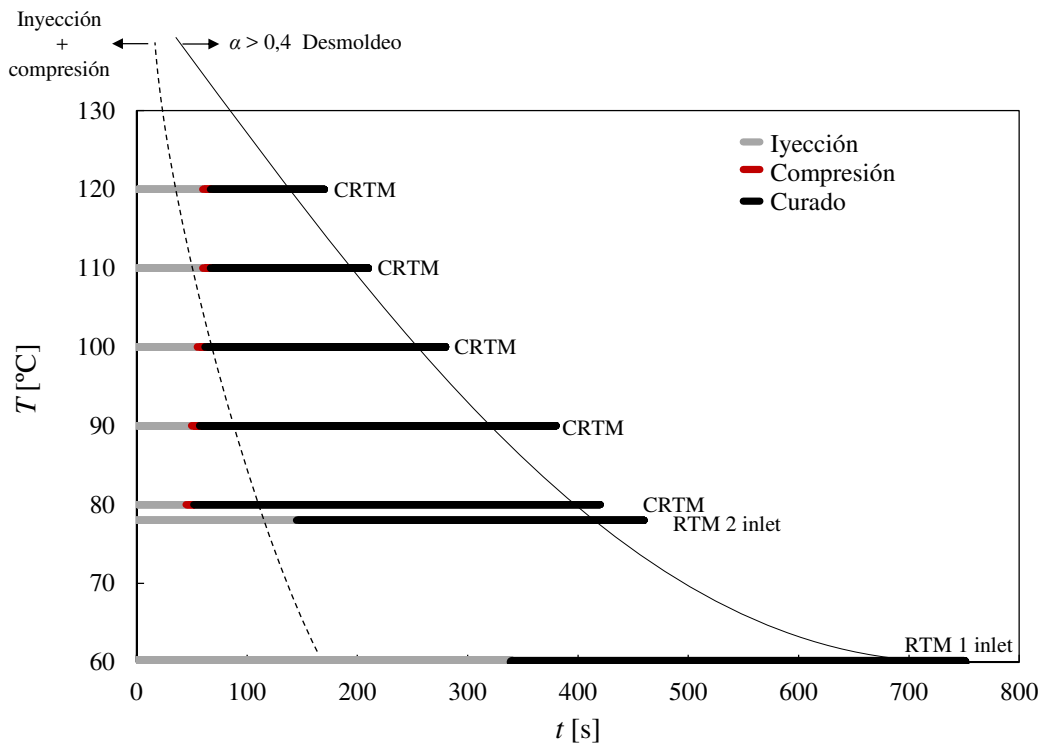


Figura 78: Short shot del CRTM3: a) Vista de la superficie superior, b) vista de la superficie inferior.

Vistos los requerimientos de bienes de equipo de cada proceso, se concluye con los siguientes puntos:

- En cuanto al RTM, se ha podido comprobar que la reducción del tiempo de ciclo está limitada por la presión de inyección.
- En el CRTM, la limitación detectada ha sido el caudal de inyección. Se ha podido verificar que las presiones generadas son mínimas, por lo que podría soportar la inyección de caudales mayores.

Análisis macro y micro de las piezas fabricadas

El bajo tiempo de ciclo que necesita el CRTM-1-100 frente al resto de los ensayos hace que se reduzca el coste, lo que lo convierte un proceso competitivo. A pesar de ello, se debe de asegurar una calidad mínima de la pieza. Para ello, se ha analizado el nivel de porosidad que presenta la pieza fabricada. Uno de los objetivos del trabajo es validar el proceso de fabricación en una pieza con cambios de plano y espesor, por lo que los cortes analizados se han realizado en las zonas que se consideran más críticas.

En la figura 79a se muestra la imagen de la pieza fabricada con las condiciones definidas en el ensayo RTM-2-80, donde se verifica la idoneidad de la impregnación. Se ha realizado un corte longitudinal definido en la figura 79a. Las figuras 79b y c muestran las imágenes obtenidas del

microscopio electrónico de barrido (SEM), referentes a la zona A de la pieza, es decir, los extremos de la pieza (superior e inferior). La figura 79d muestra la micrografía de la zona B y la figura 79e la zona C. Se puede ver que los mayores poros se han generado en los extremos de la pieza.

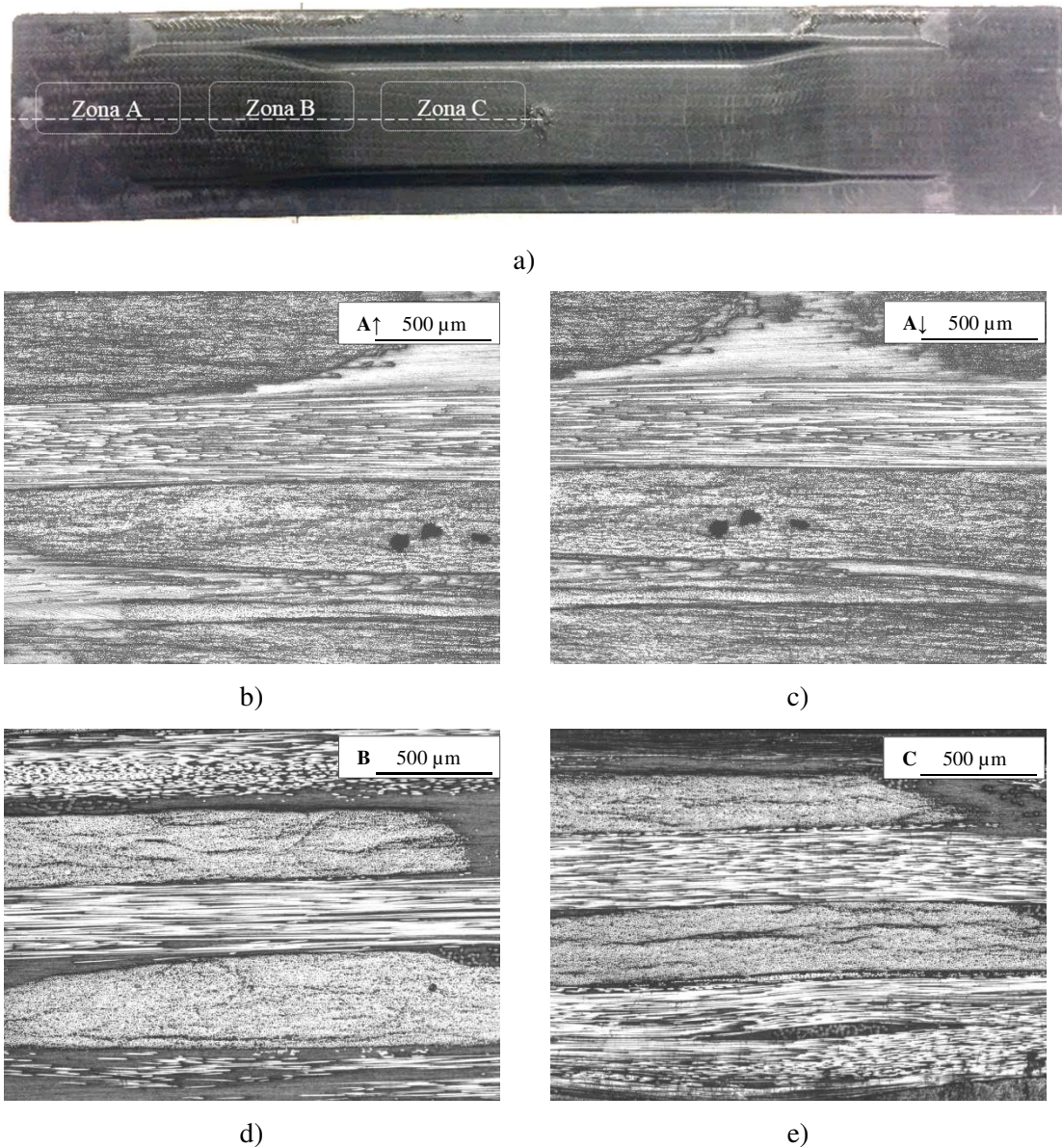


Figura 79: Micrografías de diferentes zonas de la barra anti-intrusión fabricada mediante RTM a 80 °C: b) Zona A superior, c) zona A inferior, d) zona B, y e) zona C.

En cuanto a las piezas fabricadas en CRTM, en la figura 80 se muestran las imágenes a diferentes temperaturas de procesamiento. Se ha podido comprobar que las piezas fabricadas a 120 °C no han llegado a impregnar los extremos de las piezas (Figura 80c, d). En cambio, la pieza fabricada a

100 °C está perfectamente impregnada, lo que corrobora la conclusión obtenida sobre la ventana de procesos (apartado 5.1) (figura 80b).

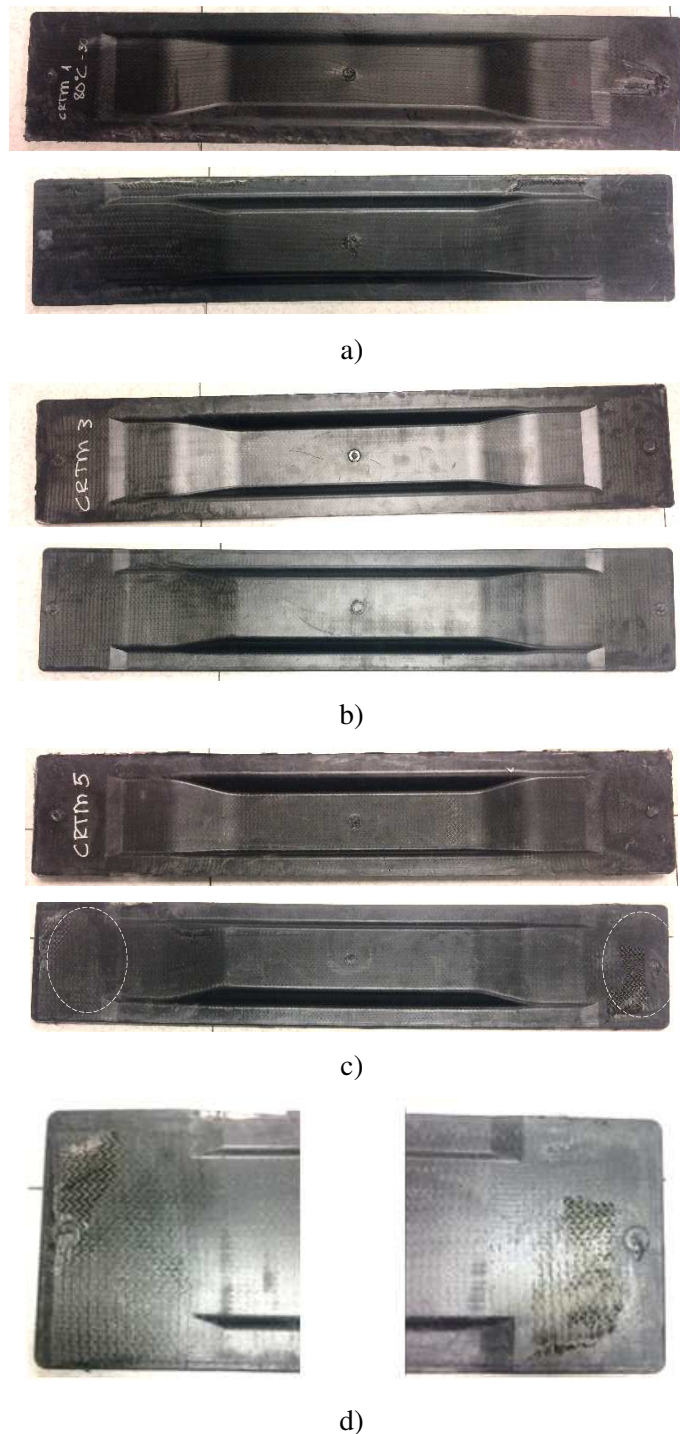


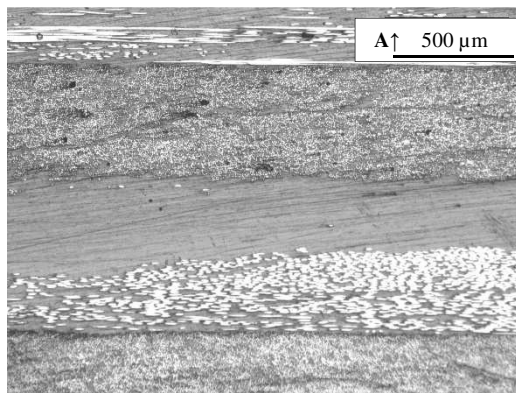
Figura 80: Imágenes de las barras anti-intrusión fabricada mediante CRTM: a) 80 °C, b) 100 °C, c) 120 °C, y d) extremos inferiores de la pieza fabricada a 120 °C.

A continuación se muestran las microfotografías de la pieza de CRTM fabricada a 100 °C; se puede ver que los micro-poros generados están en los extremos inferiores de la pieza. Esta zona ha sido la última en impregnarse y teniendo en cuenta que el instante de tiempos en el que se da la fase

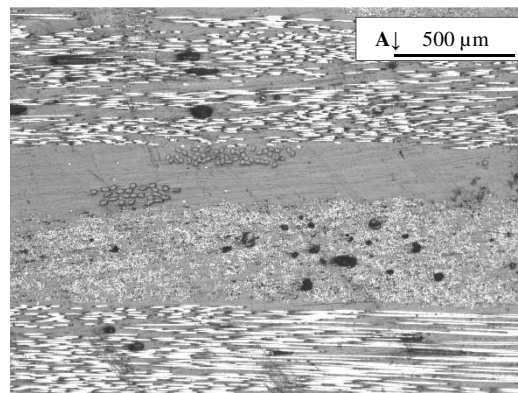
de compresión es cercano al tiempo de gel de la resina, es decir, que la resina estaba al límite de tener una viscosidad máxima admisible para la correcta impregnación, se considera esta zona como una zona crítica de impregnación.



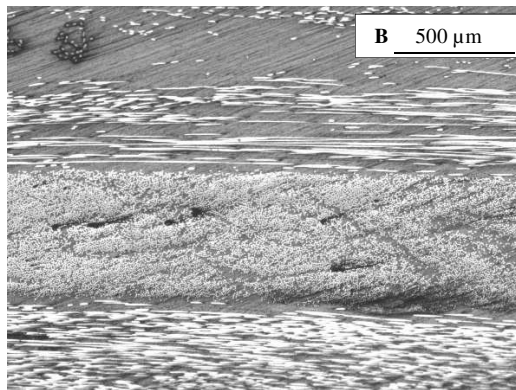
a)



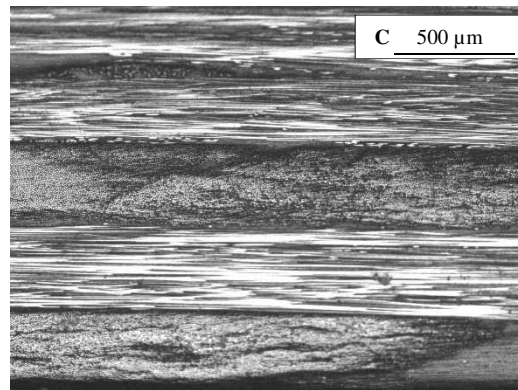
b)



c)



d)



e)

Figura 81: Micrografías de diferentes zonas de la barra anti-intrusión fabricada mediante CRTM a 100 °C: b) Zona A superior, c) zona A inferior, d) zona B, y e) zona C.

Al igual que las conclusiones obtenidas sobre la ventana de proceso en el capítulo 5, la pieza fabricada en RTM con dos puntos de inyección a 80 °C y la de CRTM con un punto de inyección a 100 °C son las condiciones óptimas de cada uno de los procesos.

6.4 Análisis de costes

En este apartado se ha analizado el coste de fabricación de la barra anti-intrusión fabricada tanto mediante RTM como mediante CRTM. En el anterior apartado se ha llevado a cabo el estudio experimental de la fabricación de una barra anti-intrusión, donde se optimizan los parámetros de proceso del RTM y CRTM. Sin embargo, debido a limitaciones en el equipamiento disponible, en las piezas de RTM se ha visto que el límite máximo de la presión de la inyectora reducía las posibilidades de obtener mejores tiempos de ciclo, y en CRTM ocurre algo similar con el caudal. Por ello, para obtener un estudio de costes competitivo y poder acercarse a valores correspondientes a una producción industrial, se propone optimizar y llevar al límite cada proceso, para que el conocimiento obtenido se pueda transferir a la industria. Para ello, se ha realizado simulaciones con el software PAM-RTM y los resultados de las simulaciones se han validado con los resultados experimentales obtenidos en el anterior apartado. Por último, con los resultados obtenidos en las simulaciones se ha realizado un análisis de costes que permita determinar el potencial de CRTM.

6.4.1 Optimización del proceso de fabricación mediante PAM-RTM

Descripción del modelo

La herramienta de simulación que se ha utilizado para analizar el proceso es el módulo de RTM de PAM-RTM. El modelado de la pieza se ha realizado en función de las hipótesis planteadas en el apartado 3.2. Debido a que el objetivo es obtener un tiempo de inyección menor que el tiempo de gel, la viscosidad implementada será acorde a la viscosidad que muestra la resina por debajo del límite de tiempo de gel considerada constante, siendo 0,25 Pa·s (valor obtenido de la figura 13a). La diferencia de los modelos de RTM y CRTM se basa en la existencia del hueco en el caso del CRTM. Es decir, en el caso de RTM las dimensiones del modelo son acordes a las dimensiones de la pieza final; sin embargo, para CRTM el modelo está compuesto por dos zonas principales: 1) La zona del hueco, y 2) la zona de la preforma inicial. Las dos preformas de RTM y CRTM, debido a los cambios de sección y geometría de la pieza, muestran diferentes permeabilidades locales a lo largo de la pieza. En la figura 82a se muestran las diferentes zonas con porosidad y permeabilidad local diferentes.

El modelo utilizado para los dos procesos, está compuesto por una malla tetraédrica 3D (CTETRA(4)). Se ha realizado un estudio de la sensibilidad del tamaño de malla, con el que se ha concluido que un tamaño de elemento de 5 mm, se considera suficientemente pequeño como para que los resultados no varíen más del 2%, lo que permite reducir el coste computacional (figura 82a).

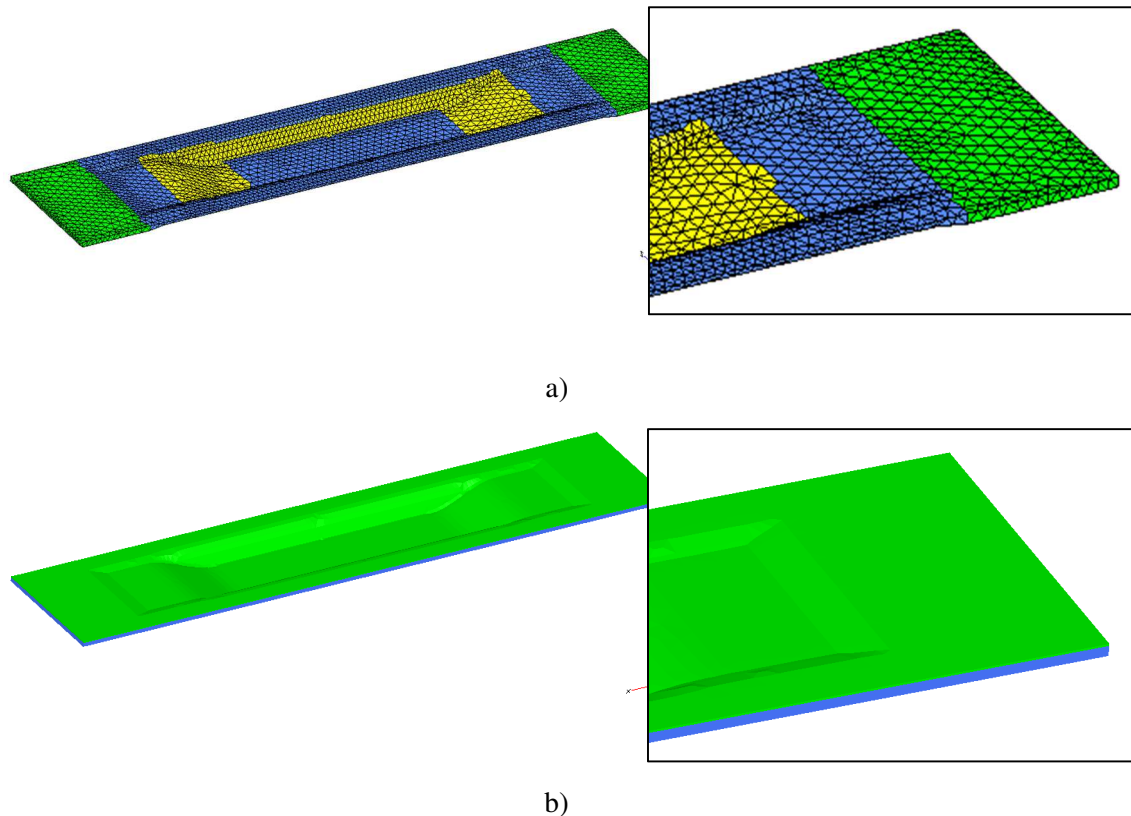


Figura 82: Modelado de procesos; a) RTM, y b) CRTM: a) Definición de las permeabilidades locales implementadas y b) definición de la zona definida referente al hueco y preforma.

Los parámetros estudiados se centran en las estrategias de inyección. En el RTM la presión estudiada ha sido de 20-60 bar con dos puntos de inyección en los extremos, y en el CRTM el caudal analizado ha sido entre 250-3000 cm³/min posicionado en el centro.

Optimización de los tiempos de ciclo

La figura 83 recoge los resultados obtenidos en las simulaciones. Con el fin de validar las simulaciones realizadas, en el anexo 9.3 se muestra la correlación con los resultados experimentales. En los resultados de las simulaciones se ha podido comprobar que el tiempo de llenado presenta un error del 7% para RTM y de un 3% para CRTM. Consecuentemente, se han dado por válidos los dos modelos desarrollados mediante PAM-RTM.

Para las simulaciones de RTM se puede comprobar que a partir de 40 bar de inyección aproximadamente, la reducción del tiempo de llenado ha sido mínima (figura 83a). Sin embargo, para el CRTM (figura 83b), se puede ver que a mayor caudal, el tiempo de inyección es menor, llegando a un límite a partir del cual la reducción es mínima. Por ello, se ha seleccionado una presión de inyección de 40 bar para RTM y 2000 cm³/min de caudal para CRTM.

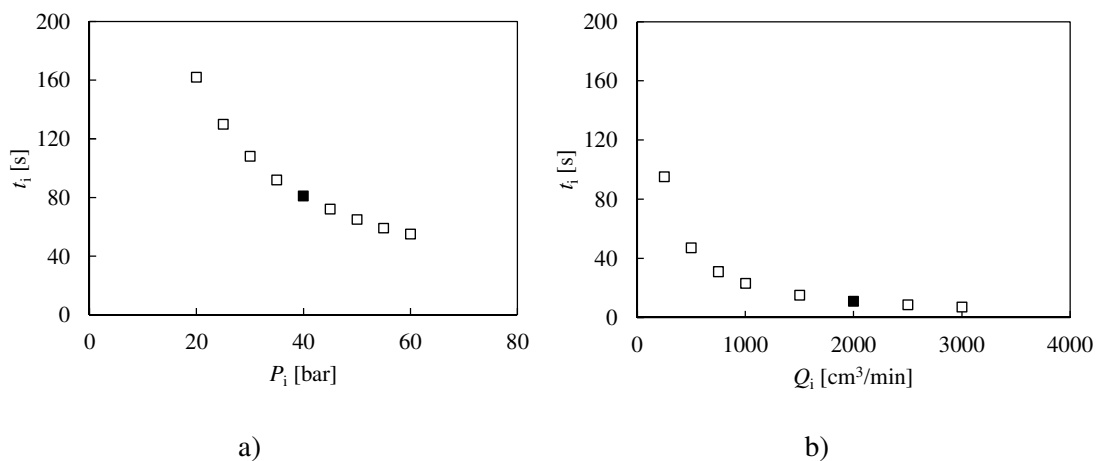


Figura 83: Resultados de las simulaciones realizadas (viscosidad constante): a) En el RTM variación del tiempo de inyección en función de la presión de inyección, y b) en el CRTM variación del tiempo de inyección en función del caudal de inyección.

En las simulaciones realizadas se ha planteado la hipótesis de que la viscosidad de la resina es constante. En la realidad, la viscosidad por debajo del tiempo de gel es constante hasta que empieza a acercarse a este límite, ya que, un instante antes, la viscosidad empieza a aumentar (Figura 13). Esto hace que los tiempos de inyección reales sean algo mayores de los obtenidos en las simulaciones, por lo que las condiciones de inyección de RTM y CRTM seleccionadas se han vuelto a calcular implementando el modelo de viscosidad (ecuación 2.4), obteniendo así el tiempo de inyección real. Las condiciones de procesado y resultados de tiempos de ciclo seleccionados para el estudio de costes son los siguientes:

- RTM: Estrategia de inyección de 40 bar, con un tiempo de inyección de 81 s. Acorde a la ventana de proceso definida en el capítulo 5, la temperatura del molde no puede superar los 90 °C.
- CRTM: Estrategia de inyección de 2000 cm³/min, con un tiempo de inyección de 10 s más 10 s de la fase de compresión. Al igual que en el RTM, acorde a la ventana de proceso definida en el capítulo 5, la temperatura del molde no puede superar los 125 °C.

6.4.2 Estructura de costes

El objetivo de este apartado es mostrar una comparativa de estructura de costes de los procesos RTM y CRTM para un volumen de producción de 100.000 barras anti-intrusión por año. Estas dos últimas técnicas son las candidatas para obtener piezas estructurales rentables de automoción [68,82].

Diferentes estudios de costes [83–85] han demostrado que el coste del material es dominante en el coste total del componente. Sin embargo, teniendo en cuenta que en este estudio la resina y la preforma que se utilizan es la misma para RTM, y CRTM, el coste será el mismo. El coste de

fabricación es la suma de material, equipamiento, mano de obra y gastos generales. La mano de obra se considera equivalente para todos los casos estudiados debido a la alta automatización. Como el CRTM es un nuevo proceso, los gastos generales no se pueden definir, por lo que no se ha tenido en cuenta. Así mismo, el coste del proceso depende de: equipamiento (unidad de inyección, prensa y robot), área de la célula de fabricación, utillaje y energía. El análisis del cálculo de costes se ha llevado a cabo mediante el estudio paramétrico de costes (TCM) propuesto por Wakeman *et al.* [85]. El TCM divide el proceso en los pasos más relevantes para la fabricación de la barra anti-intrusión. Los pasos para el RTM y CRTM son; carga de la preforma en el molde, cierre del molde, inyección de resina, curado de la resina, apertura del molde y extracción de la pieza.

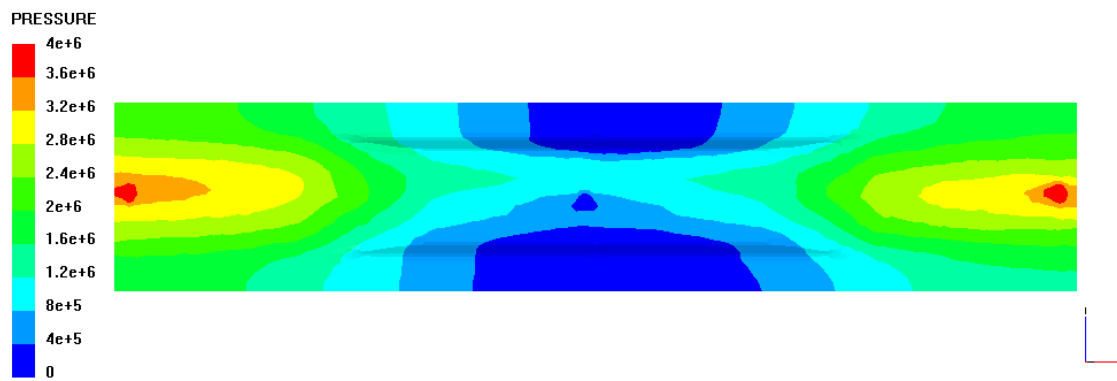
Parámetros de procesado

Los resultados de apartado 6.4.1 se han utilizado para definir el tiempo de ciclo, especificaciones del equipamiento y layout de cada tecnología. El tiempo de llenado para RTM ha sido de 81 s y de 10 s para CRTM. La compresión del CRTM ha sido a 0,27 mm/s, sumando 10 s al tiempo de la inyección de la resina. El bajo tiempo de llenado del CRTM, posibilita una mayor temperatura de moldeo, reduciendo el tiempo total de ciclo por pieza. La presión de inyección, tiempo de llenado y máxima fuerza de cierre se muestran en la tabla 17. El volumen de producción de 100.000 piezas por año se divide durante un periodo de siete años con tres relevos (1754 h/relevo).

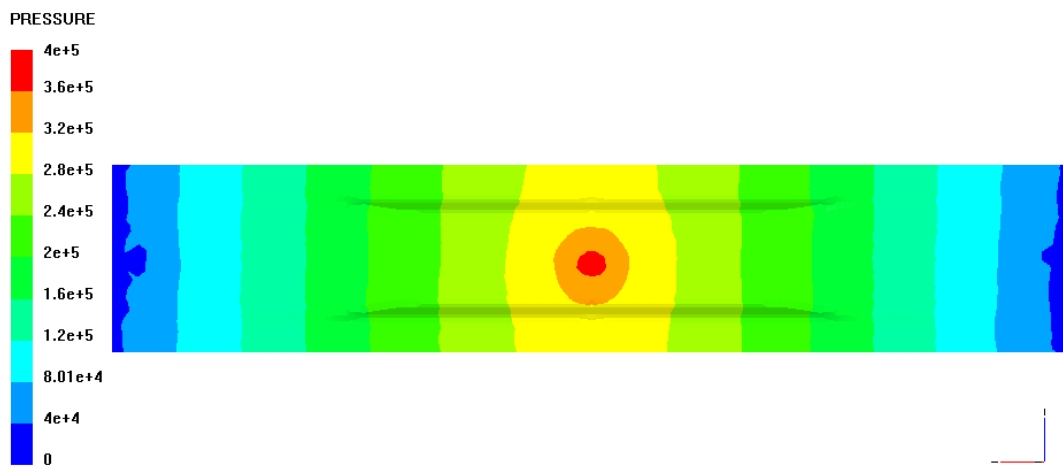
Tabla 17: Presión de inyección, tiempo de llenado y fuerza de cierre obtenidos de PAM-RTM.

Proceso	Presión de inyección [bar]	Tiempo de llenado [s]	Fuerza de cierre [t]
RTM	40	81	70
CRTM	4	10+10	150

La distribución de presión al final del llenado suscita el mismo interés que la fuerza de cierre a la hora de calcular los costes, ya que tiene una repercusión directa en el equipamiento necesario para la fabricación del componente. Como se muestra en la figura 84 la distribución de presión a lo largo de la pieza no es homogénea ni para RTM ni tampoco para CRTM, justificando así la necesidad de una prensa con un sistema de control de paralelismo en ambos casos.



a)



b)

Figura 84: Distribución de presiones [bar] para a) RTM, y b) CRTM.

Para calcular el tiempo total de ciclo del RTM y CRTM, tanto la carga de la preforma y extracción de pieza, como el cierre y apertura del molde deben sumarse al tiempo de curado. Estos tiempos han sido obtenidos del estudio de costes previo realizado [27]. Estas operaciones adicionales son las mismas para todos los procesos estudiados, pero la contribución relativa es diferente. En la Tabla 18 se resumen los tiempos de ciclo.

Tabla 18: Tiempo de cada etapa estudiada.

Proceso	Carga preforma	Cierre molde	Inyección/curado	Apertura molde	Extracción pieza	TOTAL [s]
RTM	6	2	380	2	5	395
CRTM	6	2	120	2	5	135

Coste de célula de fabricación

Basándose en el tiempo total de ciclo, y para una cadencia de 100.000 barras anti-intrusión/año de producción, la célula de RTM debería estar equipada con 3 prensas/molde y la de CRTM con

1. El hecho de que los tiempos de llenado sean largos, posibilita utilizar un único robot para la carga de la preforma y otro para la descarga. Con este dato, se calcula el área ocupada en cada proceso siendo; 195 m² para RTM, y 57 m² para CRTM. El coste de la prensa, unidad de inyección, molde, robot y el área ocupada en la planta se muestran en la tabla 19. Según los criterios establecidos por los fabricantes de prensas, el coste de la prensa de ambos procesos de RTM se calcula en función de la fuerza de cierre, pero se aplica un factor 2 al tonelaje para salvaguardar la vida útil de la prensa. Además, en aquellos casos en los que la prensa esté equipada con un control de paralelismo, adicionalmente el tonelaje se multiplicará otra vez por 2. La unidad de inyección para RTM es la más cara, mientras que para CRTM sería suficiente emplear una inyectora convencional. A pesar de que la presión interna generada en el CRTM sea mayor que en el RTM, la diferencia no es significativa, por lo que se ha asumido como un mismo coste para ambos casos. La diferencia del coste del robot, aun siendo idénticos, depende del número de prensas, ya que el control es más complejo.

Tabla 19: Coste de equipamiento para RTM y CRTM [27].

Proceso	Prensa [k€]	Sistema inyección [k€]	Molde [k€]	Robot [k€]	TOTAL [k€]
RTM	300 (×3)	300 (×3)	80 (×3)	114	2154
CRTM	700	200	80	90	1070

Coste de energía

Se ha asumido que el consumo de energía está asociado a la prensa y al sistema de calefacción del molde. El consumo de energía de la prensa depende de la fuerza de cierre y del tiempo de ciclo. Para compensar la presión interna generada en la cavidad del molde se necesita una bomba de mantenimiento. Estos dos valores característicos dependen de la fuerza máxima de cierre de la prensa y se muestran en la tabla 20 para cada proceso de fabricación. Las dimensiones del molde son 450 mm × 400 mm × 1250 mm. La energía consumida para mantener la temperatura de curado ha sido calculada asumiendo que el aislamiento es perfecto. También se ha asumido que el espesor del molde de acero (50 W/km²) es de 400 mm y está cubierto con 20 mm de material aislante. Se ha considerado que la temperatura de la planta es de 25 °C y el coeficiente de transmisión de calor por convección es de 5,8 W/km². La energía consumida en el curado de cada proceso se muestra en la tabla 20.

Tabla 20: Consumo y coste de energía. Coste energía 0,1 €/kWh.

Proceso	Prensa [kWh]	Molde/curado [kWh]
RTM	0,79	0,17
CRTM	0,91	0,08

Coste de la barra anti-intrusión

El coste final de la barra anti-intrusión, considerando los factores más significativos se resume en la tabla 21. Partiendo del CRTM como referencia, el coste de fabricación de la barra anti-intrusión es 3 veces más cara. El coste de equipamiento y utillaje, y especialmente el número de unidades, son las contribuciones más relevantes ya que representan el 75 % para RTM y el 90% del coste total para CRTM. Por otro lado, el número de prensas afecta directamente en el área de la celda.

Tabla 21: Resumen del coste de la pieza. El coste de la planta se asume que es 90 €/m²/año.

Proceso	Equipamiento e utillaje [€/pieza]	Planta [€/pieza]	Energía [€/pieza]	TOTAL [€/pieza]
RTM	2,90	0,82	0,09	3,81
CRTM	1,54	0,05	0,10	1,69

Puesto que en la tabla 21 no se tiene en cuenta la materia prima, siendo uno de los factores más críticos en el coste final, se ha calculado el coste del material de cada pieza fabricada. El valor referente a la fibra de carbono ha sido de 17 €/m² y 2,36 €/kg de resina. En la tabla 22 se muestra la contribución de cada uno. El coste asociado a la materia prima ronda el 75% para RTM y 87% para el CRTM. Sin embargo, habría que tener en cuenta que el material no se ha comprado en grandes volúmenes por lo que lastra los costes finales de la pieza. A pesar de ello, se puede ver que todavía no se llegan a alcanzar los rangos de costes establecidos para los vehículos utilitarios, siendo el material uno de los parámetros más críticos. Sin embargo, el coste de la producción se acerca a lo que podrían ser los costes asumibles en el sector de la automoción.

Tabla 22: Resumen del coste de la pieza. Equipamiento e utillaje, planta, energía y materia prima.

Proceso	Procesado [€/pieza]	Resina [€/pieza]	NCF [€/pieza]	TOTAL [€/pieza]
RTM	3,81	0,7	9	13,51
CRTM	1,69	0,7	9	11,39

6.5 Conclusiones

A continuación se describen las principales conclusiones obtenidas en este apartado:

- Se ha validado el sistema de monitorizado propuesto en el capítulo 5, ya que los criterios establecidos han coincidido con los resultados obtenidos en la pieza final.
- A la hora de obtener procesos eficientes, se ha podido ver que las prestaciones de equipamiento influyen considerablemente. En RTM, es imprescindible que la inyectora pueda trabajar con presiones elevadas (40 bar). En cambio, las prestaciones de la prensa

no son tan críticas. Analizando el CRTM, la presión de inyección no es tan crítica, ya que al inyectar en el hueco la resistencia que se le opone al fluido es menor que en el caso de RTM. Sin embargo, las prestaciones necesarias en términos de tonelaje de prensa aumentan considerablemente frente al RTM.

- Mediante la técnica *short-shot* se ha demostrado que es fundamental que la prensa disponga de un control de paralelismo, para asegurar un espesor de hueco homogéneo a lo largo de la pieza. No siendo así, se ha demostrado que la impregnación tampoco es homogénea a lo largo de la pieza.
- Se ha estimado el coste de fabricación de una barra anti-intrusión fabricada mediante RTM y CRTM. La principal conclusión es que el coste del CRTM es el menor, mientras que RTM muestra un coste de 3 veces mayor. La principal consecuencia es que para fabricar 100.000 barras anti-intrusión/año, la célula de CRTM debería estar equipada de una única prensa/molde, mientras que se necesitarían 3 para RTM. El área de la planta es directamente proporcional al número de prensas, por lo que los costes del RTM son mayores. Los resultados de los ensayos experimentales muestran las fuerzas de cierre de la prensa, requieren de prensas de 600 t para CRTM y 3 prensas de 200 t para RTM. El coste de equipamiento y utillaje, son las contribuciones más relevantes, ya que representan el 75 % para RTM y 90% del coste total para CRTM.
- Los beneficios que muestra el CRTM frente a RTM provienen del hueco. Al generar una zona con una alta permeabilidad, permite inyectar caudales grandes, a bajas presiones. Esto hace que la inyección se acelere, pudiendo aumentar la temperatura de curado, y reducir el tiempo de desmoldeo. Por lo que se puede concluir que el CRTM es un proceso prometedor para pieza de gran área y geometría simple.

Capítulo 7

Conclusiones generales

En este capítulo se recogen las conclusiones principales del trabajo, las líneas futuras que lo completarían y la difusión del trabajo realizado.

7.1 Conclusiones

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas del análisis de los diferentes apartados estudiados en esta tesis:

Fase de inyección

Para tener el control del patrón de inyección, los parámetros más importantes referentes a la fase de inyección son: el contenido de fibra inicial, el espesor del hueco y el porcentaje de volumen de resina inyectado. De hecho, la relación entre la permeabilidad del hueco y la permeabilidad de la preforma (r), controla la cantidad de resina que fluye a través del hueco. Además se ha demostrado que es fundamental que la prensa disponga de un control de paralelismo, para asegurar un espesor de hueco homogéneo a lo largo de la pieza y obtener así una impregnación de la preforma simétrica.

Fase de compresión

Las estrategias de compresión a velocidad constante muestran que el tiempo de ciclo se acorta cuando se aplican velocidades más rápidas, pero la fuerza máxima de cierre aumenta en mayor proporción y el proceso se aleja de las condiciones óptimas. Por otra parte, las estrategias de compresión con control de fuerza constante muestran que hay dos tramos de cierre divididos: el cierre del hueco y la compactación de la preforma. Con esta estrategia, cabe la posibilidad de que el tiempo de cierre varíe en función de las singularidades de la preforma, lo que genera incertidumbre cara a un proceso industrial robusto. Para

evitarlo, habría que sobredimensionar la prensa, lo que carece de sentido, ya que incidiría negativamente tanto en el coste de la prensa como en la energía consumida. Se propone una nueva estrategia de compresión de velocidad variable en la que el cierre del hueco y la compactación de la preforma se llevan a cabo con velocidades diferentes. Para la fase de cierre de hueco se ha propuesto utilizar una velocidad más rápida y para la etapa de compactación una velocidad más lenta. Se ha demostrado que se obtienen tiempos de ciclo más cortos, con la fuerza de cierre más baja. Además, la presión hidrostática del molde es más homogénea y muestra una presión menor que con las estrategias de compresión constantes. La calidad del compuesto obtenido es equivalente a la de velocidad constante. En consecuencia, se puede postular que el enfoque de velocidad de compresión variable permite un proceso CRTM más rápido con prensas de menor tonelaje, moldes más baratos y un control de paralelismo menos sofisticado, sin ninguna pérdida de calidad.

En la fase de compresión, el exceso de volumen de resina inyectado genera una presión interna mayor, lo que demuestra que la optimización de la fase de inyección es fundamental para una reducción de tiempos de ciclo y prestaciones de maquinaria.

La comparativa del CRTM con el RTM convencional y el CRTM sin hueco ha dejado en evidencia la clara ventaja del CRTM con respecto al resto de variantes.

Monitorizado de proceso

Se ha podido ver que la contracción asociada al curado modifica la señal del sensor de presión, por lo que puede servir como interpretación complementaria a otros sensores específicos para monitorizar el curado. Con esta técnica se determinan la ventana de proceso óptima para la fabricación mediante sensores de presión, ya que permite hacer el seguimiento del frente de flujo, de la presión interna y del curado.

Estudio de un componente de automoción

El CRTM muestra tiempos de ciclo más competitivos que el RTM. En cuanto a bienes de equipo, el RTM requiere inyectoras de altas presiones, sin embargo, en cuanto al CRTM, las presiones de inyección son muy bajas, por lo que posibilita el uso de inyecciones con caudales altos, y así reducir el tiempo de inyección. En cuanto al tonelaje de prensa, el CRTM requiere mayores prestaciones.

7.2 Líneas futuras

Las líneas de trabajo que han quedado abiertas y requieren de un análisis complementario se definen a continuación:

- Realizar un análisis riguroso de la influencia del volumen de resina sobre-inyectado en la fase de compresión. Analizar el incremento de fuerza de compresión en función del volumen de resina sobre-inyectado.
- En la estrategia de compresión a velocidad variable, explorar nuevos valores y proporciones de velocidades y realizar un estudio de optimización de velocidades.
- Realizar simulaciones de la fase de compresión que completen el estudio de optimización de las estrategias de compresión.
- Determinar los criterios de tiempo de desmoldeo optimizados. En las resinas reactivas no está claro cuál es el grado de conversión a partir del cual se puede desmoldear.
- Completar el estudio del curado en base a los sensores de presión, para lo que será necesario conocer la evolución de la contracción y la rigidez con el grado de curado.

7.3 Difusión

Artículos en revistas indexadas

- M. Baskaran, L. Aretxabaleta, M. Mateos, J. Aurrekoetxea. Optimization of the compression stage by adaptive velocity in Compression Resin Transfer Moulding process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (en revisión).
- M. Baskaran, L. Aretxabaleta, M. Mateos, J. Aurrekoetxea. Effect of the injection stage final flow pattern in the compression strategy of Compression Resin Transfer Moulding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (en revisión).
- M. Baskaran, L. Aretxabaleta, M. Mateos, J. Aurrekoetxea. Simulation and experimental validation of the effect of material and processing parameters on the injection stage of compression resin transfer moulding. Polymer Composites (Aceptado 2017 / DOI 10.1002/pc.24514).

Congresos

- M. Baskaran, A. Dueñas, L. Aretxabaleta, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea. Optimización del CRTM mediante técnicas de monitorizado de procesos. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2017 – San Sebastian).
- U. Argarate, E. Arregi, G. J. Acosta, M. Baskaran, J. Aurrekoetxea, L. Aretxabaleta. Caracterización del proceso CRTM aplicado al refuerzo de una puerta. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2017 – San Sebastian).

- A. Esnaola, M. Baskaran, M. Ugarte, M. Iragi, M. Sarrionandia, M. Mateos, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea. Moldes prototipo de RTM fabricados mediante impresión 3D. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2017 – San Sebastian).
- M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibil, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea, J. Acosta, U. Argarate, D. Chico. Manufacturing cost comparison of RTM, HP-RTM and CRTM for an automotive roof. ECCM16 - 16th European Conference on Composite Materials, Seville, Spain, 22-26 June 2014. Comunicación oral. <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0643.pdf>
- M. Mateos, M. Baskaran, A. Aizpuru, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea. The compression behaviour of non- crimp fabrics composites for automotive applications. ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials. Munich, Germany, 26-30th June 2016. Comunicación oral.
- J. López-Nuñez, M. Baskaran, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea. 3D inprimagailuz eginiko moldeak konpositeen fabrikaziorako. Materialen Zientzia eta Teknologia III. Kongresua, Markina-Xemein 2016. Comunicación oral.
- M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibil, M. Mateos, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea. Influencia del ligante en la permeabilidad y la compactación en tejidos biaxiales de fibra de carbono. XV. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2015 – Madrid). Comunicación oral.
- L. Aretxabaleta, M. Baskaran, A. Aizpuru, M. Mateos, J. Aurrekoetxea. Modelado del comportamiento a compresión de tejidos NCF para automoción. XV. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2015 – Madrid). Comunicación oral.
- M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibil, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea. Karbono-zuntzez osatutako preforma baten konpresioaren karakterizazio experimentalak. Materialen Zientzia eta Teknologia II. Kongresua, Donostia 2014. Comunicación oral.
- M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibila, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea. Inpregnazio azkarreko RTM-a automozio sektorerako. Materialen Zientzia eta Teknologia II. Kongresua, Donostia 2014. Comunicación oral.
- J. Aurrekoetxea , M. Baskaran, I. Ortiz de Menbibil, J.A. García, M. Sarrionandia. RTM-compresión para aplicaciones estructurales de automoción con productividades de pieza por minuto. 19. Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación (2013 - San Sebastián). Comunicación oral.
- M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibil, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea. Moldeo por transferencia de resina/compresión: Simulación de la fase de inyección. X. Congreso Nacional de Materiales Compuestos (2013 - Algeciras). Comunicación oral.

Capítulo 8

Referencias bibliográficas

- [1] P. S. Main trends and dynamic of the worldwide composites industry. JEC Gr., 2011.
- [2] Bein T, Bös J, Mayer D, Melz T. Advanced Materials in Automotive Engineering. 2012.
- [3] United Nations D of E and PS. World Population Prospects n.d.:The 2012 Revision.
- [4] Plath A. GC. Prespectivas actuales y futuras en el empleo de materiales composites en automoción, y en particular en el Grupo Volkswagen. 19 Congr. Máquinas-Herramienta y Technol. Fabr., n.d.
- [5] Esnaola A, Tena I, Aurrekoetxea J, Gallego I, Ulacia I. Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of E-glass/polyester automotive crash structures. Compos Part B Eng 2016;85:1–7.
- [6] P Feraboli, A. Masini AB. Advanced composites for the body and chassis of a production high performance car. Int J Veh Des 2007;Volume 44.
- [7] Sharma Rao N, Simha TGA, Rao KP, Kumar GV V. Carbon composites are becoming competitive and cost effective 2015.
- [8] S. M. Growth opportunities: Materials innovation will drive composites usage to new heights. High Perform. Compos., 2012, p. 6–7.
- [9] Bader MG. Selection of composite materials and manufacturing routes for cost- effective performance. Compos Part A Appl Sci Manuf 2002;33:913–34.
- [10] Sloan J. The epicenter of i3 production 2014:24–31.

-
- [11] SAFRAN. <http://www.aerotendencias.com/> n.d.
- [12] Rudd C.D., Long A.C., Kendall K.N. MCGE. Introduction to liquid composite moulding. *Liq. Mould. Technol.*, 1997, p. 1–37.
- [13] B. Räckers. Ch. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures. 1999.
- [14] Han, K., Ni, J., Lee L. and Greene JP. Analysis of a Injection/Compression liquid composite molding process. *Polym Composites* 1998.
- [15] Wirth S. GR. Experimental Analysis of Mold Filling in Compression Resin Transfer Molding. *J Reinf Plast Compos* 1998.
- [16] 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.
- [17] Bhat P, Merotte J, Simacek P, Advani SG. Process analysis of compression resin transfer molding. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2009;40:431–41.
- [18] Merotte J, Simacek P, Advani SG. Resin flow analysis with fiber preform deformation in through thickness direction during Compression Resin Transfer Molding. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2010;41:881–7.
- [19] Simacek P, Advani SG. Simulating three-dimensional flow in compression resin transfer molding process. *Rev Eur Des Éléments Finis* 2005;14:777–802.
- [20] Simacek P, Advani SG, Iobst S a. Modeling Flow in Compression Resin Transfer Molding for Manufacturing of Complex Lightweight High-Performance Automotive Parts. *J Compos Mater* 2008;42:2523–45.
- [21] Shojaei A. A numerical study of filling process through multilayer preforms in resin injection/compression molding. *Compos Sci Technol* 2006;66:1546–57.
- [22] Shojaei A. Numerical simulation of three-dimensional flow and analysis of filling process in compression resin transfer moulding. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2006;37:1434–50.
- [23] Yang B, Jin T, Li J, Bi F. Three-Dimensional Numerical Simulation of Mold Filling Process in Compression Resin Transfer Molding. *Appl Compos Mater* 2014;22:209–30.
- [24] Chang C-Y. Effect of Process Variables on the Quality of Compression Resin Transfer Molding. *J Reinf Plast Compos* 2006;25:1027–37.

- [25] Wen-Bin Young C-WC. Study on Compression Transfer Molding. *J Compos Mater* 1995;Vol 29:2180–91.
- [26] J. Aurrekoetxea, A. Agirregomezkorta, G. Aretxaga, M. Sarrionandia. Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite manufactured by vacuum-assisted compression resin transfer molding,. *J Compos Mater* 2012;46:43–49.
- [27] M. Baskaran, I. Ortiz de Mendibil M, Sarrionandia M, Aurrekoetxea J, Acosta J, Argarate U, Chico D. Manufacturing cost comparison of RTM, HP-RTM and CRTM for an automotive roof. 16TH Eur Conf Compos Mater Seville, Spain, 22-26 June 2014 n.d.:22–6.
- [28] Chang, C. Y., Hourng, L. W. and Yu CS. Analysis of Flow Phenomena During the Filling Stage of CTM. *J Reinf Plast Compos* 2004.
- [29] Chang CY. Modeling of the Filling Process during Resin Injection/Compression Molding. *Adv Compos Mater* 2007.
- [30] Chih-Yuan Chang. Simulation of Compression Effect in filling process in Compression Resin Transfer moulding. *Adv Compos Mater* 20 2011:197–211.
- [31] Vernet N, Ruiz E, Advani S, Alms JB, Aubert M, Barburski M, et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2014;61:172–84.
- [32] Kang MK, Lee WI, Hahn HT. Analysis of vacuum bag resin transfer molding process. *Compos - Part A Appl Sci Manuf* 2001;32:1553–60.
- [33] Walbran WA, Verleye B, Bickerton S, Kelly PA. Reducing setup costs : tooling force prediction in resin transfer moulding (RTM) and compression RTM of Mechanical Engineering , 2 Department of Engineering Science , n.d.:1–18.
- [34] Le Riche R, Saouab A, Bréard J. Coupled compression RTM and composite layup optimization. *Compos Sci Technol* 2003;63:2277–87.
- [35] 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.
- [36] Walbran W a., Bickerton S, Kelly P a. Measurements of normal stress distributions experienced by rigid liquid composite moulding tools. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2009;40:1119–33.
- [37] Somashekar a. a., Bickerton S, Bhattacharyya D. An experimental investigation of non-elastic

- deformation of fibrous reinforcements in composites manufacturing. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2006;37:858–67.
- [38] Bickerton S, Buntain MJ. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part B: Numerical analysis. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2007;38:1742–54.
- [39] Verleye B, Walbran W a., Bickerton S, Kelly P a. Simulation and experimental validation of force controlled compression resin transfer molding. *J Compos Mater* 2011;45:815–29.
- [40] Villière M, Guéroult S, Sobotka V, Boyard N, Bréard J, Delaunay D. Dynamic saturation curve measurement in liquid composite molding by heat transfer analysis. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015;69:255–65.
- [41] Chang C-Y. Simulation of Mold Filling in Simultaneous Resin Injection/Compression Molding. *J Reinf Plast Compos* 2006;25:1255–68.
- [42] M.J. Buntain, S. Bickerton. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part A: Experimental study. *Compos Part A* 2007;38:1729–1741.
- [43] Verleye B, Walbran WA, Bickerton S, Kelly PA. Simulation and experimental validation of force controlled compression resin transfer molding 2015.
- [44] Chang C-Y. A Numerical Study of Filling Process in Resin Injection/Compression Molding. *J Reinf Plast Compos* 2008;27:781–95.
- [45] Bickerton S, Abdullah MZ. Modeling and evaluation of the filling stage of injection/compression moulding. *Compos Sci Technol* 2003;63:1359–75.
- [46] Walbran W a., Verleye B, Bickerton S, Kelly P a. Prediction and experimental verification of normal stress distributions on mould tools during Liquid Composite Moulding. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2012;43:138–49.
- [47] Kelly P a., Umer R, Bickerton S. Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2006;37:868–73.
- [48] Pham X, Trochu F. Simulation of compression resin transfer molding to manufacture thin composite shells. *Polym Compos* 1999;20:436–59.
- [49] W.A. Walbran, S. Bickerton PAK. Simulation and experimental validation of force controlled compression resin transfer molding. *Polym Compos* 2014.

- [50] Ngo ND, Tamma KK. Non-isothermal “2-D flow/3-D thermal” developments encompassing process modelling of composites: Flow/thermal/cure formulations and validations. *Int J Numer Methods Eng* 2001;50:1559–85.
- [51] MOON KOO KANG and WOO IL LEE’. Analysis of Resin Transfer/Compression Molding Process. *Polym Composites* 1999.
- [52] Gupta a., Kelly P a., Bickerton S, Walbran W a. Simulating the effect of temperature elevation on clamping force requirements during rigid-tool Liquid Composite Moulding processes. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2012;43:2221–9.
- [53] 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.
- [54] Rodriguez-Lence F., Munoz-Esquer P., Menendez J.M ., Pardo de Vera C., Diaz S .,Guemes JA. . Smart sensors for resin flow and composite cure monitoring. *ICCM12 Proc.*, n.d.
- [55] 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.
- [56] R. Meier, S. Zaremba, F. Springl, K. Drechsler FG and CW. Online process monitoring systems. *Proceeding 11th Int. Conf. Flow Process. Compos. Mater.*, 2012.
- [57] 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.
- [58] Lawrence JM, Hughes P, Advani SG. Experimental validation of dependence map based control in liquid composite molding. *J Compos Mater* 2006;40:1137–62.
- [59] S. Konstantopoulos¹, E. Fauster RS. Monitoring the production of FRP composites. *eXPRESS Polym Lett* 2014;Vol.8, No.:823–840.
- [60] 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.
- [61] Amico S, Lekakou C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *Compos Sci Technol* 2001;61:1945–59.
- [62] 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.

- [63] Modi D, Correia N, Johnson M, Long A, Rudd C, Robitaille F. Active control of the vacuum infusion process. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2007;38:1271–87.
- [64] Sayre J, Loos AC. Resin Infusion of Triaxially Braided Preforms With Through-the-Thickness Reinforcement. *Polym Compos* 2003;24:229–36.
- [65] S. Konstantopoulos^{1*} EF, , R. Schledjewski^{1 2}. Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods. *eXPRESS Polym Lett* 2014;8:823–840.
- [66] B. Bachmann, J. Brunner, P. Tsotra, K. Masania CD. Simulation of the compression resin transfer moulding for fast curing resins. *FPCM*, 2014.
- [67] Shojaei A. Numerical simulation of three-dimensional flow and analysis of filling process in compression resin transfer moulding. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2006;37:1434–50.
- [68] Simacek P, Advani SG IS. Modeling Flow in Compression Resin Transfer Molding for Manufacturing of Complex Lightweight High-Performance Automotive. *J Compos Mater* 2008;42:2523–45.
- [69] Bachmann B, Brunner J, Tsotra P, Masania K, Dransfeld C. Simulation of the compression resin transfer moulding for fast curing resins n.d.;c:2–3.
- [70] M. Kamal SS. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure. *Polym Eng Sci* 1973;13:59–64.
- [71] R. Parnas. Preform permeability. *Resin Transf Mould Aerosp Struct* 1999:1–24.
- [72] Aretxabaleta L, Baskaran M, Aizpuru A, Mateos M, Aurrekoetxea J. Modelado del comportamiento a compresión de tejidos NCF para automoción. *Matcomp* 16, n.d., p. 1–6.
- [73] Alms JB, Correia N, Advani SG, Ruiz E. Experimental Procedures to Run Longitudinal Injections to Measure Unsaturated Permeability of LCM Reinforcements. *FPCM Collab.*, 2010.
- [74] Vilà J, González C, LLorca J. A level set approach for the analysis of flow and compaction during resin infusion in composite materials. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2014;67:299–307.
- [75] Ouagne P, Bréard J. Continuous transverse permeability of fibrous media. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2010;41:22–8.
- [76] Li L, Zhao Y, Yang J, Zhang J. An experimental investigation of compaction behavior of carbon non-crimp fabrics for liquid composite molding 2015:2960–72.

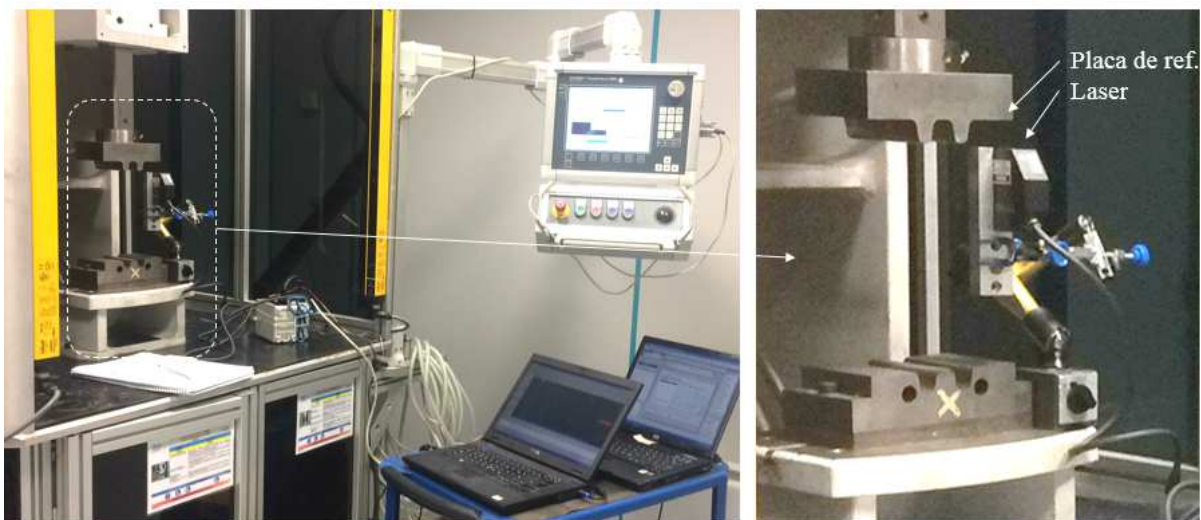
-
- [77] Bickerton S, Buntain MJ, Somashekar AA. The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms 2003;34:431–44.
- [78] Merotte J, Simacek P, Advani SG. Composites : Part A Resin flow analysis with fiber preform deformation in through thickness direction during Compression Resin Transfer Molding 2010;41:881–7.
- [79] 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.
- [80] Industrial cure monitoring and control of the RTM production of a CFRP automotive component. 15th Eur. Conf. Compos. Mater., Venice: 2012.
- [81] Jon López Núñez. Diseño de componentes de automoción en composite 2016.
- [82] Chaudhari R, Karcher M, Elsner P, Henning F. Characterization of High Pressure Rtm Processes for Manufacturing of High Performance Composites 2012;m:24–8.
- [83] Bader MG. Selection of composite materials and manufacturing routes for cost- effective performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2002;33:913–34.
- [84] M.D. Wakeman J-A. M. Design and manufacture of textile composites. 2004.
- [85] Verrey J, Wakeman MD, Michaud V, Månson J a E. Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2006;37:9–22.

Capítulo 9

Anexos

9.1 Caracterización de los cambios de velocidad del estudio de la fase de compresión

En este apartado se muestra la calibración de la prensa realizada en cuanto a aceleración y deceleraciones. La técnica de calibración empleada se define en la figura 85. El láser posicionado en la parte inferior de la prensa mide el desplazamiento del molde superior. La precisión del láser es de $0,2\ \mu\text{m}$ (High-accuracy CCD Laser Displacement Sensor LK-G3000 series).



a)

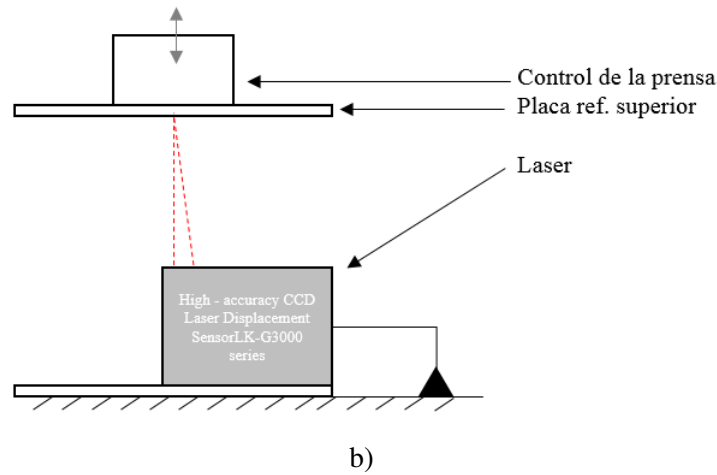


Figura 85: Calibración de la prensa: a) Fotografía de la calibración, y b) Diagrama de medición.

El desplazamiento de la placa de referencia obtenida a través del láser se compara con los datos obtenidos de la prensa. El cambio de velocidades graficadas corresponden a las estrategias de compresión de velocidad variables seleccionadas para el estudio. La figura 86 muestra la señal del láser para las consignas introducidas en la prensa. Se puede ver que las rampas de aceleración y deceleración obtenidas son altas, por lo que el cambio de velocidad se puede considerar instantáneo, ya que corresponde al 1-2 % del recorrido completo. Finalmente validando la estrategia introducida.

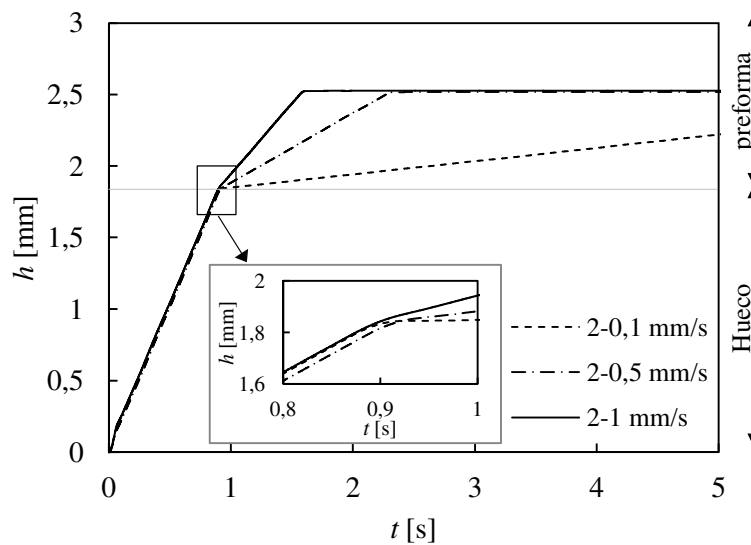


Figura 86: Señal de la prensa frente a la señal del láser.

9.2 Reproducibilidad del estudio de la fase de compresión

Para analizar la repetitividad de los ensayos realizados se repiten los ensayos a 0,5 mm/s. La desviación estándar de la fuerza pico es $\pm 0,18$, por lo que se considera una repetitividad suficientemente buena

como para dar por valido los resultados obtenidos. Sin embargo, en la fase de la relajación, la desviación estándar es de $\pm 0,42$.

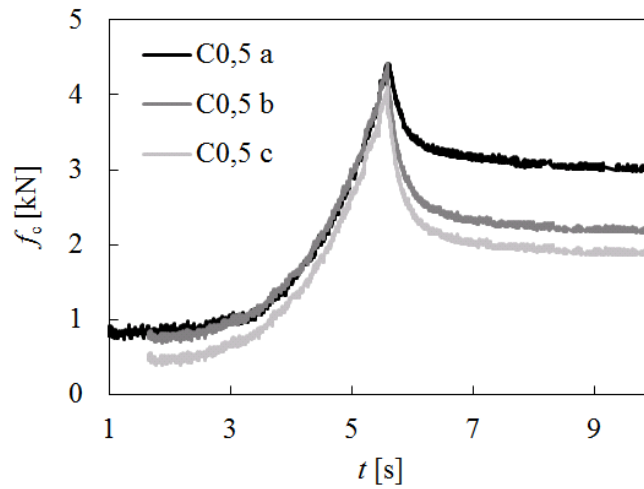


Figura 87: Calibración de la prensa: a) *Setup* de la calibración, y b) señal de la prensa frente a la señal del láser.

9.3 Correlación de la simulación de PAM-RTM (barra anti-intrusión)

Los tiempos de inyección obtenidos en las simulaciones repercuten en el análisis posterior del estudio de costes. Por ello, en este apartado se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones con los experimentales (tabla 22). Para ello se introduce la influencia de la viscosidad con el modelo reológico descrito en el apartado 2.1.2. El error producido en los tiempos de llenado de RTM es de 7% y 3% del CRTM. La razón de que el error del RTM es mayor, se puede deber a que las permeabilidades locales influyen en mayor parte que en CRTM.

Tabla 23: Comparación de tiempos de llenado.

	t_i [s] exp.	t_i [s] sim.
RTM-2-80	150	161
CRTM-1-100	55	53