

Universidad CEU Cardenal Herrera

Departamento de Ingeniería de la Edificación y Producción Industrial



**CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS
DE INFUSIÓN DE RESINA MEDIANTE
VISIÓN ARTIFICIAL**

TESIS DOCTORAL INTERNACIONAL

Presentada por: Ubaldo Pineda Castillo ©

Dirigida por: Dr. Fernando Sánchez López y Dr. Nicolás Montés Sánchez

VALENCIA
2013

TESIS DOCTORAL INTERNACIONAL

**CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE
INFUSIÓN DE RESINA MEDIANTE VISIÓN
ARTIFICIAL**

Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor por la
Universidad CEU Cardenal Herrera.

Fdo. UBALDO A. PINEDA CASTILLO

VºBº de los directores:

DR. FERNANDO SÁNCHEZ LÓPEZ

DR. NICOLÁS MONTÉS SÁNCHEZ

Valencia, 18 de Abril de 2013

TESIS DOCTORAL INTERNACIONAL

CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE INFUSIÓN DE RESINA MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL.

AUTOR: D. Ubaldo Pineda Castillo
DIRIGIDA POR: Dr. Fernando Sánchez López y Dr. Nicolás Montés Sánchez

TRIBUNAL CALIFICADOR

PRESIDENTE: **Dr. D. Juan Antonio García Manrique**
Profesor. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
Universidad Politécnica de Valencia.

VOCALES: **Dr. D. Sebastien Comas Cardona**
Professor. EADS Corporate Foundation International Chair on
Advanced Modelling of Composites Manufacturing Processes.
Ecole Centrale de Nantes, France.

Dr. D. Nuno Correia
Director of Composite Materials Unit. Institute of Mechanical
Engineering and Industrial Management (INEGI).
Universidade do Porto, Portugal.

Dr. D. Enrique Díaz
Responsable del Área de Composites.
Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS).

SECRETARIO: **Dr. D. Antonio Falcó Montesinos**
Profesor. Departamento de Ciencias Físicas, Matemáticas y de la
Computación. Universidad CEU Cardenal Herrera.

SUPLENTE: **Dr. D. Elías Cueto**
Profesor. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Universidad de Zaragoza

Dr. D. Francisco Chinesta
Professor. EADS Corporate Foundation International Chair on
Advanced Modelling of Composites Manufacturing Processes.
Ecole Centrale de Nantes, France.

DEDICATORIA

A Angela, por compartir preocupaciones y desvelos.

A mis hijos Santiago y José Manuel (RIP), sois amor, inspiración mágica.

A mis padres por sus enseñanzas y sacrificios, su impronta vive en esta obra.

A mis suegros, por lo mensurable e incommensurable.

A mis hermanos y cuñados, por la fraternidad y cooperación.

A mis profesores, por sus enseñanzas para la vida.

A la Naturaleza que nos desvela pequeñísimas pero importantes partes de sus secretos...

A la vida que transcurre ante nuestros sentidos, que en sí misma es maestra.

A quienes aprenden y desaprenden con versatilidad.

A quienes en la constancia encuentran camino.

A quienes luchan por sus sueños, incluso en la dificultad.

A quienes salen de su zona de confort física y mentalmente.

A quienes consultan su conciencia personal y colectiva, y deciden ser justos.

A quienes renuncian a ellos mismos para construir unidad.

A quienes en el éxito aún son sensibles a la realidad del mundo.

A quien construye puentes interculturales de entendimiento e igualdad.

A quienes abren la mente y expanden sus fronteras.

A quienes construyen humanidad y ciencia con gestos sencillos.

A quienes en la entrega a algo-alguien encuentran la razón de vivir.

A quienes en pequeños detalles encuentran la felicidad y la esperanza.

A quienes trabajan con la esperanza de mejorar, a sí mismos y a su entorno circundante...

A quienes encuentran en la vida y su opuesto un regalo único

... ambas un gran misterio, fuentes inagotables de inspiración.

Agradecimientos

En atención a la huella emocional-mental que supone esta experiencia de desarrollar una tesis doctoral, es prácticamente imposible llegar a la meta final, sin realizar el ejercicio de recordar y agradecer a todas las personas naturales y jurídicas que han promovido y animado con voluntad, disposición y sacrificios, su desarrollo.

Esta tesis es el resultado de múltiples esfuerzos y la suma de muchas voluntades. Por tanto, es el éxito de todas las voluntades unidas por esta empresa, de todos quienes habéis creído y favorecido la presente. Por lo que me siento como depositario de una especie de honor y responsabilidad a la vez, materializándose en conocimiento a través de esta obra.

Por el apoyo en cada momento, os doy de todo corazón, el más sentido agradecimiento: a todos mis familiares, amigos, compañeros, jefes, estudiantes, profesores y a todos quienes sin estar mencionados explícitamente aquí, os sentís parte de este proceso generador. Vuestras palabras, emociones, gestos y actitud me impulsaron a embarcarme, mantenerme y culminar la presente.

En especial a mis directores, al Dr. Fernando Sánchez López, por tener esperanza, por integrarme en la ESET-UCH, por su disposición, practicidad, y su gran capacidad resolutoria, para unir, construir puentes, mezclar voluntades y haber hecho viable económica y científicamente la realización de la misma. Su sencillez y generosidad, le engrandecen. Su tenacidad, la garantía humana y profesional ante retos de toda índole. Al Dr. Nicolás Montés, por su capacidad propositiva y vigilancia permanente del enfoque del trabajo, por sus interrogantes continuos y la pasión por aprender, por mejorar. A ambos, por su disposición, su entereza, su ánimo, ejemplo, y sobre todo por impulsarme, en los momentos más oscuros.

En Montreal, al Dr. Eduardo Ruiz por sus contribuciones, su complementariedad y apoyo. Asimismo al Dr. François Trochu. Ambos profesores de la Escuela Politécnica de la Universidad de Montreal, en Canadá, por permitir que parte de la experimentación que se aborda en esta tesis, pudiera ser realizada en los laboratorios de la Cátedra De Investigación Sobre Diseño Y Fabricación De Composites De Altas Prestaciones (CCHP). Asimismo, por facilitar la realización de dos estancias de investigación durante los veranos de 2009 y 2011. Agradezco también la colaboración de Nicolas Vernet por las simulaciones, Julián Gutiérrez por toda la literatura que dispuso para la presente y

todo lo compartido, Amir por apoyarme en la experimentación, Catherine Billote por sus consejos y caracterizaciones, F. Lebel por el debate y el coraje, Roland por la fuerza, Nadir por introducirme en el mundo de la caracterización y los nanocompuestos. Asimismo y en especial, a Farida por sus contribuciones en los trabajos de investigación, por todas sus gestiones, su actitud siempre dispuesta y su acompañamiento como anfitriona. A Coke por toda su disponibilidad y sacrificio para que la logística de las estancias fuera un problema menor.

A los Doctores, Antonio Mocholí S, Vicente Traver S. y Carlos Fernández, de la Universidad Politécnica de Valencia. También al Dr. Alberto Piñero de la Universidad de Valencia. A todos ellos, su apoyo y su confianza han contribuido en gran medida para alcanzar este logro. A todos los amigos del TSB (antiguo BET) de ITACA.

A Germán y Patricia, quienes despejaron el camino en la ruta de ida-vuelta, Armenia–Bogotá–Valencia.

En la ESET-UCH, a todos los miembros del PDI y PAS que me han apoyado e impulsado por medio de sus gestiones y su saber hacer. Especialmente, a Luis por todo el apoyo a la presente y su actitud siempre resolutiva tanto como su preocupación constante por los aspectos humanos. A José Vicente por su buen sentido del humor, y por hacer de muchas jornadas momentos especiales de la vida, tanto como por su apoyo en la creación de algunos artilugios para la experimentación.

Finalmente, y no menos importante a la Universidad CEU Cardenal Herrera, al programa de formación de personal docente y de investigación, por su apoyo económico durante los últimos cuatro años. Sin su financiación, quizá esta tesis aún se estaría incubando.

Deseo agradecer también a los evaluadores externos y miembros del tribunal, tanto como a lectores curiosos, por animarse a revisar esta tesis. A todos vosotros, deseo que la encuentren interesante y de utilidad directa, en vuestros campos.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	1
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	13
Resumen	15
Abstract	19
Prólogo	23
Capítulo 1 Estado Actual de las Tecnologías de Monitorización durante la Fabricación de Piezas-Composites mediante procesos LCM.	27
1.1 Introducción	27
1.2 Procesos LCM-RIFT.	28
1.2.1 Etapas de Fabricación.	31
1.2.1.1 Verificación y caracterización de materiales de fabricación.	32
1.2.1.1.1 Equipamiento para Caracterización de Materiales.	33
1.2.1.2 Diseño.	33
1.2.1.3 Preparación del Molde para el Procesamiento de la Pieza.	34
1.2.1.4 Llenado de Molde.	35
1.2.1.5 Curado y Post-curado.	36
1.2.1.6 Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización de la Estructura.	36
1.2.1.7 Monitorización Continuada o Periódica de la Salud de la Estructura-composite.	37
1.2.2 Principales Fenomenologías Físicas.	38
1.2.2.1 Identificación de parámetros y problemas de proceso, sensibles de monitorizar- medir. 40	
1.2.3 Revisión Tecnológica y Técnicas de Monitorización	44
1.2.3.1 Capacidades de la Técnicas de Monitorización Tradicionales de Parámetros-Clave de Proceso. 44	
1.2.3.1.1 Inspección Humana.	45
1.2.3.1.2 Sensores Electro-mecánicos.	45
1.2.3.1.3 Sensores Electro-químicos.	48

1.2.3.1.4	Sensores Termo-ópticos	49
1.2.3.1.5	Sensores Foto-eléctricos y Foto-químicos.	50
1.2.3.1.6	Sensores Termo-eléctricos.	52
1.2.3.1.7	Monitorización de Flujo de Calor y Temperatura.	52
1.2.3.1.8	Monitorización Térmica.	55
1.2.3.2	Fundamentos y Capacidades de las Técnicas de Monitorización usando Tecnologías de Visión Artificial.	55
1.2.3.2.1	Sensores Foto-eléctricos Disponibles para la Generación de Imágenes Bi y Tridimensionales, (2-3D).	56
1.2.3.2.1.1	Cámaras Multiespectrales.	57
1.2.3.2.1.2	Cámaras de Espectro Visible.	58
1.2.3.2.1.3	Cámaras de Espectro infrarrojo (IR) - Térmicas	60
1.2.3.2.1.4	Escáner 3D – Imágenes Tridimensionales.	62
1.2.3.2.2	Capacidades Reportadas de las Técnicas de VA en la Monitorización de Parámetros-Clave de Proceso durante las Etapas de Fabricación.	63
1.2.3.2.2.1	Verificación y caracterización de materiales de fabricación.	63
1.2.3.2.2.2	Diseño.	64
1.2.3.2.2.3	Preparación del procesamiento de la pieza.	64
1.2.3.2.2.4	Llenado de Molde.	65
1.2.3.2.2.5	Curado y Post-curado.	66
1.2.3.2.2.6	Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización Mecánica de la Estructura.	68
1.3	Técnicas de Monitorización Tradicionales versus Métodos basados en VA durante Procesos LCM-RIFT.	71
1.4	Motivaciones.	77
1.5	Hipótesis y Objetivos de la Tesis.	79
1.6	Hypotheses and Objectives of the Thesis.	80
Capítulo 2 Marco Computacional y Tecnológico para la Monitorización del Procesado de Composites mediante LCM-RIFT. AVPP.		83
2.1	Introducción.	83
2.2	Antecedentes.	84
2.2.1	Validaciones Experimentales.	86
2.3	Justificación.	89
2.4	Capacidades Actuales de las Herramientas Tecnológicas basadas en VA, de Apoyo a la Ejecución de las Etapas del Ciclo de Fabricación.	91
2.4.1	Diseño de Composites mediante Motores de Cálculo Numérico.	91
2.4.2	Preparación del Molde para el Procesamiento de la Pieza.	93
2.4.3	Llenado de Molde.	94
2.4.4	Curado y Post-curado.	95

2.4.5 Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización Mecánica de la Estructura. ..96

2.4.6 Análisis de la Utilidad Actual de Las Herramientas Tecnológicas De Monitorización en la Mejora de los Procesos RIFT..... 98

2.5 Definición del Sistema AVPP-RIFT..... 101

2.5.1 Capacidades y Mejoras Respecto de Herramientas Existentes. 102

2.5.2 Implementación Tecnológica y Funcionamiento del AVPP-RIFT. 105

2.5.3 Marco Computacional 107

2.5.4 Calibración del Sistema. 107

2.6 Conclusiones y Trabajos Futuros..... 110

Capítulo 3 Técnicas de Visión Artificial de Espectro Visible para el Análisis y Caracterización de la Mecánica del Flujo durante el Llenado de Moldes.

..... 113

3.1 Introducción 113

3.2 Condiciones de Experimentación. 114

3.3 Uso de Técnicas de Visión Artificial para la Caracterización de Refuerzos de Fibra. 116

3.3.1 Métodos Tradicionales de Medición de la Permeabilidad y Viabilidad de Mejoras..... 117

3.3.2 Método Experimental para la Detección y el Reconocimiento de Patrones del Frente de Flujo. 118

3.3.3 Medición de los Ejes Principales del Frente de Flujo Elíptico. 121

3.4 Uso de Técnicas de Visión Artificial en la Saturación del Frente de Flujo..... 124

3.4.1 Estudios de impregnación de resina en el frente de flujo durante la inyección. Definición de la Longitud Crítica L_s 124

3.4.2 Mediciones de la Zona de Flujo No-Saturada..... 126

3.5 Conclusiones y Trabajos Futuros..... 129

3.5.1 Hacia la Mejora de la Medición de la Medición de la Permeabilidad en Refuerzos Anisotrópicos Mediante VA. 131

Capítulo 4 Técnicas de Visión Artificial de Espectro Infrarrojo para la Monitorización de la Evolución del Curado de Piezas-Composites de Matriz Termoestable..... 135

4.1 Introducción 135

4.2 Justificación..... 137

4.3 Análisis de los Diferentes Modos de Transferencia de Calor para la Estimación del Grado de Curado (DoC)..... 139

4.4	Evaluación Experimental del Desempeño de las Técnicas Tradicionales de Medición de Flujo de Calor respecto a la Termografía, para la Estimación de Grado de Curado. Heat PAG Mold	141
4.4.1	Integración de Software y Hardware	143
4.4.2	Calibración in-situ de la Cámara Térmica	144
4.4.3	Resultados de la Experimentación.....	145
4.5	Evaluación del Curado de Piezas mediante Termografía. Influencia de la Emisividad.....	148
4.5.1	Caracterización de la Emisividad para el procesado de Composites.....	149
4.5.2	Cuidados y Operación Idónea de la Cámara IR para Mediciones Térmicas.....	152
4.6	Calibración In-situ para Habilitar la Termografía Infrarroja en la Medición Fiable de Fenómenos de Transferencia de Calor durante el Curado.	154
4.6.1	Instalación Experimental.....	155
4.6.1.1	Evolución Térmica Cualitativa mediante Histórico Termográfico del Curado.....	156
4.6.1.2	Termografía Cuantitativa del Test. Análisis Comparativo de la Respuesta de los Sensores Conductivos y Radiativos.....	157
4.6.2	Método de Calibración Experimental In-situ para Termografía Infrarroja.....	161
4.7	Evaluación de la Capacidad y Precisión de la Termografía respecto de la Técnica con Sensores Cero-dimensionales, para Estimar el Grado de Curado de Piezas-Composites.....	164
4.7.1	Materiales	164
4.7.2	Instalación Experimental	164
4.7.3	Tests Ejecutados, Datos Adquiridos y Algoritmos para Estimaciones de Grado de Curado.	165
4.7.4	Algoritmos de Estimación del DoC mediante Sensores de Flujo de Calor y Cámara Térmica infrarroja.....	166
4.7.5	Análisis Comparativo del Curado Alcanzado en Zonas de Inyección y Venteo.....	168
4.8	Hacia una Monitorización de Calidad para Controlar el Grado de Curado (DoC) en la Fabricación de Piezas de Composite.....	170
4.8.1	Método de Monitorización DoC Usando Termografía Calibrada.....	171
4.8.2	Resultados Experimentales.....	172
4.9	Conclusiones y Trabajos Futuros.....	173
Capítulo 5 Conclusiones. Discusión y Trabajos futuros.....		177
5.1	Conclusiones.....	177
5.2	Conclusions.....	180
5.3	Discusión y Trabajos futuros.....	184
5.4	Discussion and Future Work.....	185

Anexos del Capítulo 1.....	189
I. Materiales Compuestos.	189
II. Clases de Moldeos.	192
III. Procesos LCM	196
IV. Modelo Analítico de Transporte de resina en laminados de fibra, durante la fabricación de piezas-composite usando LCM-RIFT.....	199
V. Modelo Analítico de Transferencia de calor durante el curado de piezas- composite usando LCM-RIFT	200
VI. Fenomenología que gobierna el Curado de piezas-composite usando LCM- RIFT	202
VII. Modelos cinéticos de curado	206
VIII. Caracterización de la cinética de curado de resinas termoestables.	210
 Anexos del Capítulo 2.....	 213
IX. Calibración Dimensional para Moldes 2.5D.....	213
X. Cálculo de los parámetros de calibración en transformaciones 3D a 2D.	215
XI. Mallado de un molde mediante la matriz foto-sensible de las cámaras. Asociación de técnicas de visión artificial y el método de elementos finitos - FEM.	216
XII. Mallado de un molde desde la discretización del espacio con elementos finitos y su asociación con la matriz foto-sensible de las cámaras.	220
XIII. Discretización del espacio con visión artificial para geometrías 2.5D.....	223
 Referencias	 227

Lista de Figuras

Figura 1.1 Familia de Procesos LCM.....	29
Figura 1.2. Proceso de fabricación mediante Moldeo por Infusión de Resina.....	31
Figura 1.3 Interrelación entre fenómenos presentes en los procesos LCM.....	39
Figura 1.4 Relación de parámetros monitorizables del procesamiento y problemas-defectos a minimizar.....	43
Figura 1.5. Pintura cromática termo-óptica.....	49
Figura 1.6. Sensor de Flujo de calor y temperatura.....	52
Figura 1.7 Colocación del sensor conductivo de flujo de calor y temperatura [105].....	53
Figura 1.8 Sensor de Temperatura DS18S20, tecnología 1-wire	55
Figura 1.9. Clasificación de la longitud de onda, [121].	57
Figura 1.10. CCD (Charge Coupled Device).	59
Figura 1.11. Región muestreada en la imagen.....	59
Figura 2.1. Piscina a escala con los puntos de calibración marcados.....	86
Figura 2.2. Mallado-2D de la cámara (izq.). Mallado del escáner 3D (der.), el cual determina la posición de los nodos. Mallados de los modelos de la piscina a escala con puntos de calibración.....	86
Figura 2.3. Canal de distribución desplegado sobre el tejido indicando la referencia para la fijación de los canales de inyección.....	87
Figura 2.4. Etapa de llenado del molde de la piscina.....	87
Figura 2.5. Etapa de curado de la piscina.....	88
Figura 2.6 Estado Actual De la Información de Etapas del Procesamiento De Composites.....	100
Figura 2.7. Concepción de AVPP – Set de Visión Artificial para el procesamiento de piezas bajo LCM-RIFT.....	104
Figura 2.8 Set de Visión Artificial y sensores puntuales para el AVPP-LCM arriba del molde, bajo procesamiento.....	106
Figura 2.9.Sistema de Calibración [17].....	109
Figura 3.1. Materiales Consumibles en Condiciones Industriales y los Sistemas de Monitorización en base a VA.....	115
Figura 3.2. Preparación del contra molde con líneas de referencia para registrar el tiempo de llegada del flujo, ante propagaciones unidireccionales (izq.) y Figura 3.3. Molde de caracterización para la medición de permeabilidad (der.) [4], [9].	118

Figura 3.4. Círculos predefinidos para mediciones de posición del frente de flujo en propagaciones circulares [7].	118
Figura 3.5. Molde inferior mecanizado con agujeros radiales al centro para medición de la permeabilidad mediante detección del frente de flujo por sensores de resistencia eléctrica [14].	118
Figura 3.6 Imagen de referencia del molde, denotada como p_a .	119
Figura 3.7 Imagen instantánea del molde denotada como p_b .	119
Figura 3.8 Resta entre las imágenes instantáneas y referencia. $p_n = p_a - p_b $.	119
Figura 3.9 Umbralizado hasta llegar objetos de contraste 45	119
Figura 3.10 Filtrado por morfología avanzada- pequeños objetos – 6 iteraciones – cuadrado – conectividad 4/8	119
Figura 3.11 Filtrado de morfología básica con cierre apropiado– tamaño 7x7 -	119
Figura 3.12 Filtrado de morfología básico– Erosión de objetos- tamaño 3x3 - 3 iteraciones- Hexágono.	119
Figura 3.13 Filtrado por dilatación de objetos – tamaño 7x7 -. 3 iteraciones – Cuadrado	119
Figura 3.14 Filtrado de morfología avanzado con “convex hull” – conectividad 4/8.	119
Figura 3.15 Filtrado de morfología básica con gradient gradient out – tamaño 5x5 - cuadrado.	119
Figura 3.16 Relación entre parámetros principales de la elipse definidos por ecuaciones analíticas y la evolución del frente de flujo elíptico.	121
Figura 3.17 Pasos para medir los parámetros principales de la elipse mediante AVPP.	122
Figura 3.18 Evolución de los ejes principales de la elipse, ángulo de inclinación y ratio a/b	123
Figura 3.19 Impregnación retrasada en los paquetes de fibra comparada a la de otras macro-regiones.	124
Figura 3.20 Presión y zona de saturación para (a) mats de fibra escala-única y (b) mats de fibra de escala-dual, [16].	126
Figura 3.21 Zona no-saturada, estudiada en las vecindades del frente de flujo	127
Figura 3.22 Vista tri-dimensional instantánea de la elipse	127
Figura 3.23 Corte de frente de flujo usando niveles de gris. Zonas de saturación, y medir L_{us}	127
Figura 3.24 Instante 1300	128
Figura 3.25 $\theta = 0^\circ$	128
Figura 3.26 $\theta = 0^\circ$.	128
Figura 3.27 $\theta = 90^\circ$	128
Figura 3.28. $\theta = 90^\circ$	128

Figura 3.29 $\theta = 180^\circ$	128
Figura 3.30 $\theta = 180^\circ$	128
Figura 3.31 $\theta = 270^\circ$	128
Figura 3.32 $\theta = 270^\circ$	128
Figura 3.33 Gráfico de $L_{us} = F(\theta)$ para el instante 1300.	129
Figura 4.1. Instalación experimental.	142
Figura 4.2. Vista desde arriba de la instalación.	142
Figura 4.3. Configuración del experimento. Foto térmica en un instante de tiempo. ...	143
Figura 4.4. Software y Hardware como herramientas de integración para estudiar la etapa de curado de una pieza mediante Heat PAG Mold.	144
Figura 4.5. Calibración de la cámara térmica mediante regresión lineal.	144
Figura 4.6. T_{log} es la temperatura referencia (log) versus T_c temperatura que arroja el sensor conductivo y, T_A es la temperatura ambiente.	145
Figura 4.7. Temperatura IR versus temperatura mediante sensor conductivo	146
Figura 4.8. Flujo de calor conductivo versus Flujo de calor radiativo	147
Figura 4.9. Medida de la energía emitida por el molde Heat PAG mediante ambos sensores.	147
Figura 4.10. Grado de curado calculado desde mediciones basadas en dos clases de sensores.	148
Figura 4.11 Comportamiento del cuerpo negro a varias temperaturas, [2]	149
Figura 4.12. Distribución espectral de cuerpo negro, gris y no-gris, [2]	150
Figura 4.13 Medición de la emisividad de la superficie de un material, [2].	152
Figura 4.14. Componentes de la energía que llegan al sensor IR, [2].	153
Figura 4.15. Orientación de la cámara IR para evitar influencia de puntos de reflexión de fuentes de energía indeseados.	154
Figura 4.16 . Instalación para la fabricación de composite planos mediante proceso VIP. Los sensores (i) y (o) corresponden a los sensores de flujo de calor y temperatura, dispuestos cerca del inyector y del venteo.	155
Figura 4.17. (Izq.) Ubicación del molde para la fabricación del composite, el cual es monitorizado mediante una cámara térmica (A), una cámara de espectro visible (B), sensores cero-dimensionales de temperatura – Flujo de calor (C), sensores de temperatura ambiente (E). (Der.), Caja negra cerrada (F), sistema de adquisición por ordenador (D).	156
Figura 4.18. (Der.) Análisis termográfico para la calibración. (Izq.) El sensor de Flujo de Calor – Temperatura que entrega mediciones exactas. Las líneas magenta solidas son la proyección cuadrada sobre en la imagen termográfica para dar una idea de la colocación relativa de los sensores en el inyector y en el venteo.	159

Figura 4.19 Flujos de calor por contacto y diferencias de temperatura como función del tiempo. Con ambiente de $T_s \approx 22^\circ\text{C}$	159
Figura 4.20 Flujo de calor por contacto en función de las diferencias de temperatura por contacto y sin-contacto. Arriba, el comportamiento en el inyector. Abajo, el comportamiento en el venteo.....	161
Figura 4.21. Diagrama de flujo de algoritmo para calcular el flujo de calor de píxeles experimentalmente en condiciones de temperatura ambiente controladas.....	162
Figura 4.22. Error de Temperatura instantánea (Temperatura de cámara vs. Temperaturas por contacto).....	162
Figura 4.23. Factor proporcional instantáneo en función del tiempo.....	163
Figura 4.24. Algunos flujos de calor de pixel y por contacto a lo largo del molde.....	163
Figura 4.25. Instalación experimental para fabricación de las placas planas. Los sensores cero-dimensionales (C) son puestos en la vecindad del inyector y venteo, tanto arriba y debajo de la preforma de fibra.....	164
Figura 4.26. Colocación de los sensores cero-dimensionales durante el preforming para medir el calor liberado hacia arriba y hacia abajo, en un área de estudio del molde. ..	165
Figura 4.27. DoC alcanzado en el inyector y venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (2) capas /laminas de fibra de vidrio.....	169
Figura 4.28. DoC alcanzado en el inyector y el venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (4) capas /laminas de fibra de vidrio.	169
Figura 4.29. DoC alcanzado en el inyector y venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (6) capas /laminas de fibra de vidrio.....	169
Figura 4.30 Mapa final de grados de curado, DoCs en la pieza final.....	173
Figura - Anexo I.1 Preformas usualmente utilizadas	189
Figura - Anexo II.1 Moldeo por contacto a mano (hand lay-up).	193
Figura - Anexo II.2 Prepreg (izquierda). Autoclave (derecha).....	194
Figura - Anexo III.1 Esquema del proceso RTM.	197
Figura - Anexo III.2 Esquema de los procesos de infusión por vacío.....	199
Figura - Anexo VI.1. Esquema que ilustra el curado de resinas termoestables.	203
Figura - Anexo VI.2 Comportamiento típico de una pieza durante el ciclo de curado.	204
Figura - Anexo VI.3. Diagrama (TTT): Tiempo – Temperatura – Transformación. ...	204
Figura - Anexo VI.4. Reología de una matriz termoestable durante un llenado de molde y curado isotérmico.	205
Figura - Anexo VIII.1. Proceso exotérmico que describe el curado de resinas termoestables.	210
Figura - Anexo VIII.2. Principio de operación de la DSC.	211
Figura - Anexo XI.1. Elementos finitos sin agrupar píxeles (izquierda). Agrupándolos (derecha).	217

Figura - Anexo XI.2. Conversión de píxeles a elementos finitos.....	217
Figura - Anexo XI.3. Generación de elementos finitos. Columna k (izq.), columna k+1 (der.)	218
Figura - Anexo XI.4. Algoritmo de mallado con una cámara.	219
Figura - Anexo XI.5. Discretización de la escena (izquierda). Discretización del molde (derecha)	220
Figura - Anexo XII.1. Matching de objetos en una imagen	220
Figura - Anexo XII.2. Algoritmo de asociación de los píxeles con cada elemento finito.	221
Figura - Anexo XII.3. Ejemplo de la asociación de píxeles con Elementos finitos predefinidos en el molde.....	222
Figura - Anexo XII.4. Cómputo de la fracción volumétrica de cada elemento finito..	222
Figura - Anexo XIII.1. Digitalizador VIVID 910 de Konica Minolta utilizado en la experimentación.....	223
Figura - Anexo XIII.2. Definición del modelo de espesor variable.	225
Figura - Anexo XIII.3. Uso del proyector en procesos LCM.....	226

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Principales Características Técnicas de las TMT y las TMVA en procesos LCM-RIFT.	74
Tabla 1.2 Parámetros de la etapa de llenado monitorizables mediante TMT y TMVA en procesos LCM-RIFT.	75
Tabla 1.3 Parámetros de la etapa de curado y post-curado detectables mediante TMT y TMVA en procesos LCM-RIFT.	76
Tabla 3.1 Forma Elíptica obtenida mediante filtrado de bajo coste computacional.	119
Tabla 3.2 Perfil de la longitud de la zona de flujo no-saturada tomando pequeños cortes a través del frente de flujo para el instante 1300 mediante la línea verde. Es un análisis off-line.	128
Tabla 4.1. Evolución cualitativa de temperaturas mediante imágenes térmicas durante la etapa de curado de las placas cuadradas	157
Tabla 4.2. Datos de Fabricación de los tests y cálculos necesarios para las estimaciones de DoC.	166

En Anexos.

Tabla - Anexo I.1. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes.	190
Tabla - Anexo I.2 Propiedades mecánicas de las matrices, resinas más comunes.	191
Tabla - Anexo VII.1. Resumen de Modelos Cinéticos de Curado disponibles en la literatura.	209
Tabla - Anexo XI.1. Definición de los elementos finitos mediante asociación de píxeles.	218

Resumen

Los costes de producción de piezas-composites en la actualidad suelen ser elevados, especialmente debido al valor de las materias primas. En contraste, los procesos LCM pueden reducir significativamente el tiempo y el coste de procesamiento, en comparación con otros procesamientos implementados tradicionalmente como el uso de autoclave. Por ello, la fabricación de grandes piezas de altas prestaciones empleando procesos LCM, es un campo en crecimiento. Los procesos LCM se dividen en dos. Procesos de contra-molde rígido (p. ej. RTM) y procesos RIFT¹ de contra molde flexible y transparente (p. ej. VARTM², VIP³, etc.). Estos últimos son óptimos para piezas de gran envergadura. Sin embargo, los procesos RIFT todavía presentan algunos retos de fiabilidad y repetibilidad para la producción industrial [18]. Entre estos, la impregnación de la resina líquida en refuerzos fibrosos durante el preformado de la pieza y la optimización del ciclo de curado y post-curado.

En el procesado por infusión de composites es un reto determinar con fidelidad la evolución de las distintas variables que condicionan la impregnación y el curado de las piezas. El espesor y la fracción volumétrica de la pieza consolidándose tampoco se conocen con precisión, primero por el uso de una bolsa plástica como contra-molde y segundo debido a las variaciones del volumen a lo largo de la preforma cuando el vacío y la presión son aplicadas [19]. Los cantos o curvaturas no escapan a este problema. Resultando diferentes permeabilidades locales. Seguidamente, en la etapa de curado, pueden existir variaciones en el calor liberado durante la polimerización de una matriz reforzada con fibra, tanto como del grado de polimerización, considerando diferentes zonas-volúmenes locales de una misma pieza. Las cuales inducen estrés térmico que puede afectar las propiedades finales de la pieza. Por lo anterior, la determinación del grado de curado, o grado de solidificación de la pieza, resulta de gran interés, ya que la polimerización de una pieza se evidencia por los cambios en las propiedades de los materiales que la conforman: matriz-refuerzo.

¹ RIFT – Resin Infusion under Flexible Tooling. Infusión de Resina bajo Contra-molde Flexible.

² VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding por Transferencia de Resina Asistido por Vacío.

³ VIP – Vacuum Infusion Process. Proceso de Infusión por Vacío.

Para conseguir que en los procesos LCM RIFT se pueda garantizar la repetibilidad y reproducibilidad, el primer paso es disponer de las tecnologías adecuadas de medición. Es imprescindible medir eficiente y óptimamente para avanzar científicamente en el conocimiento de estos procesos. La literatura, en general muestra avances en pleno desarrollo y todavía con muchas preguntas por resolver. Se intenta explicar la fenomenología física del comportamiento de los fluidos o la termodinámica del curado en la pieza, observando mediante sensores con dimensiones de detección del orden de millones de veces más pequeños que el área-volumen de la pieza bajo observación o monitorización. Como resultado se alcanzan mediciones restringidas dimensionalmente a un sensor puntual. En esencia, estas técnicas de monitorización restringidas dimensionalmente han condicionado el enfoque de la mayoría de trabajos científicos. Además, focalizan en la medición de una variable-parámetro de proceso, durante alguna etapa de la fabricación, desconociendo su trayectoria en etapas previas o su interacción y/o variabilidad respecto de otras zonas de la pieza.

En vista de la situación actual, es imprescindible medir eficiente y óptimamente avanzando hacia el determinismo que busca la industria. Esta tesis tiene como objetivo: Definir un marco computacional único para la monitorización en base a técnicas de visión artificial. Válido y aplicable a las distintas etapas de procesos LCM-RIFT, que permita la integración de mediciones de la variabilidad de parámetros del proceso provenientes de diferentes técnicas de monitorización. De esta manera, haciendo uso del marco computacional basado en Visión Artificial. a) Analizar la mecánica de la impregnación/saturación y las formas del frente de flujo de resina, mejorando los métodos y las herramientas de monitorización y caracterización existentes. Así, proponer nuevas técnicas de medición de la zona de saturación y de la permeabilidad del refuerzo durante el llenado de moldes. b) Proponer mejoras a las técnicas de monitorización de grado de curado disponibles para piezas durante el proceso de polimerización. Extensible a piezas de grandes dimensiones.

Por tanto, en la presente tesis, se aporta una herramienta denominada AVPP⁴ para la monitorización de la pieza completa durante las etapas de fabricación de composites bajo procesos LCM-RIFT. Esta herramienta, ofrece gran resolución espacial, temporal y un marco numérico común (modelo 2D o 3D) para el análisis y proyección bidimensional o tridimensional, de la evolución de parámetros-clave durante el proceso. Adicionalmente, mediante AVPP se aporta: a) Una técnica de detección espacial del frente de flujo y estimación de su zona de saturación. b) Una propuesta para mejoras en

⁴ *Artificial Vision Processing Package for RIFT processes. Set para Procesamiento de Composites basado en Visión Artificial.*

la estimación de la permeabilidad de refuerzos fibrosos durante el procesado de la pieza. c) Se evalúa la habilidad de la termografía infrarroja para medir la transferencia de calor durante procesos exotérmicos programados mediante Heat PAG Mold⁵. Se evidencia que las cámaras IR requieren, bien de una calibración apropiada o del conocimiento de la evolución de la emisividad durante el curado de la resina, a fin de obtener repetibilidad y veracidad en las mediciones de temperatura. La emisividad es un parámetro que requiere de un esfuerzo tecnológico no contemplado en esta investigación. Así, por medio de un método de calibración in-situ es posible medir el flujo de calor bi-dimensional mediante cámaras térmicas IR, libre de la emisividad. Por tanto, se compara la precisión de la técnica termográfica respecto de la técnica con sensores cero-dimensionales. Y finalmente, d) en base a termografía calibrada se estima el grado de curado bidimensional o mapa de curado del composite.

Como trabajos futuros, con el uso de la cámara térmica se abre una nueva e interesante vía para la estimación del grado de curado de piezas de gran envergadura. Se puede asociar el grado de curado a una característica física del material, esto es la medida de emisividad a través de la cámara IR. Este parámetro no depende de calibraciones previas, está asociada directamente al cambio de las propiedades de los materiales cuando estos pasan de estado líquido a estado sólido. En el futuro, los métodos basados en la medición de la emisividad, podrían constituir un set de técnicas fiables para cuantificar y controlar el proceso de curado de una pieza-composite.

⁵ *Generador Artificial de Flujo de Calor Programable basado en célula peltier, para simular repetitivamente la cinética de curado de una pequeña pieza durante su fabricación*

Abstract

Currently, production costs linked to the manufacture of composite parts are high, due to the value of raw materials. In contrast, LCM processes can significantly reduce the processing time and costs compared to other procedures that are traditionally employed using an autoclave. For this reason, the manufacture of large, high-performance parts through LCM processes is a field of growing interest. There are two kinds of LCM processes. One is the rigid counter-mould process (e.g. RTM⁶), and the other, the RIFT⁷ process, is a transparent, flexible counter-mould process (e.g. VARTM⁸, VIP⁹, etc.). This latter is profitable for fewer, large pieces and is focused in this thesis. However, these LCM-RIFT processes are currently facing some challenges in terms of reliability and repeatability for industrial production, which need to be resolved for them to be used on a large scale in the industry. These include impregnation of the liquid resin into fibrous reinforcements. Then there is the repeatability [20] during preforming of the part and optimization of the curing cycle, and post-curing.

In processing composites by infusion, it is a challenge to accurately determine the evolution of the different variables that affect the impregnation and the curing of the parts. On establishing the part's thickness and volume fraction, these are not known precisely either, firstly due to the use of a plastic bag as counter-mould and secondly due to variations in the volume throughout the preform when the vacuum and pressure are applied. The edges or bends are not immune to this problem. These lead to different local permeabilities. Next, in the curing stage, there may be variations in the heat released during polymerization of a fibre-reinforced matrix, as well as the extent of polymerization, considering different local volume zones for the same part. These heat variations induce thermal stresses that might affect the mechanical final properties of the composite part. Therefore, a part must be subjected to an optimum heat cycle. However, obtaining optimum post-curing depends on the extent of polymerization-solidification achieved in the curing stage. The latter must be determined in order to

⁶ RTM – Resin Transfer Moulding.

⁷ RIFT – Resin Infusion under Flexible Tooling.

⁸ VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding.

⁹ VIP – Vacuum Infusion Process.

estimate the amount of heat required to give the part the greatest polymerization possible without degrading it.

In order to ensure that the RIFT LCM processes are repeatable and reproducible, the first step is to have suitable measurement technology. It is essential to make efficient, optimal measurements to make scientific progress regarding knowledge of these processes. The literature generally shows advances still under development with many questions still to be resolved. An attempt is being made to explain the physical phenomenology of the behaviour of fluids or thermodynamics in curing the part, making observations by means of sensors that can detect sizes millions of times smaller than the volume/area of the part being observed or monitored. As a result, measurements are made that are dimensionally restricted to one point sensor. In essence, these dimensionally restricted monitoring techniques have affected the focus of most scientific work. Furthermore, they concentrate on measuring one process variable/parameter during the manufacture stage, ignoring its evolution in previous stages or its interaction and/or variability with respect to other areas of the part.

In view of the current situation regarding previous monitoring methods in manufacturing composites with LCM-RIFT processes, it is essential to measure optimal and efficiently for moving towards determinism that is looking for the composites industry. Then, this thesis seeks the main following objective: To define a single computational framework for monitoring, based on artificial vision techniques. This should be valid and applicable to the different stages of the LCM-RIFT processes, allowing for integration of the measurements of variability in the process parameters through different monitoring techniques. In this way, making use of the computational framework based on Artificial Vision, it is possible through this thesis: a) Analyze the mechanics of impregnation/saturation and the resin flow front shapes, improving the existing monitoring and characterisation methods and tools. As a result, we may propose new techniques for measuring the saturation and permeability of the reinforcement when filling the mould. b) Put forward improvements to the techniques for monitoring the degree of cure available for parts during the polymerization process. This should be applicable to large parts.

Therefore, in this doctoral thesis, it provides a tool named AVPP¹⁰ for monitoring the entire composite structure during the manufacturing stages under-RIFT LCM processes. This tool offers high spatial resolution, temporal and a common numerical framework (2D or 3D model) for analysis and two-dimensional or three-dimensional projection of

¹⁰ *Artificial Visión Processing Package for RIFT processes.*

the evolution of key-parameters in the process. Additionally, by the use of AVPP is achieved: a) A spatial detection technique of resin flow front and estimation of its saturation zone. b) A proposal for improving traditional methods of estimating permeability of fibrous reinforcement during manufacture of the composite part. c) It is evaluates the ability of infrared thermography to measure the heat transfer during exothermic processes programmed by Heat PAG Mold. The latter experimentation evidenced that the IR camera require either a suitable calibration or knowledge of the emissivity evolution during curing of the resin in order to obtain repeatability and accuracy in the temperature measurements. Emissivity is a parameter that requires a technological effort not considered in this research. Thus, it proposes an in-situ calibration technique to enable the IR camera can measure the bi-dimensional heat flux (emissivity-free) released by the part under process. Then there is compared the accuracy of the thermographic technique with the zero-dimensional heat flux sensor. And finally, d) bidimensional degree of cure or map of degree of cure of the composite part is estimated based on the calibrated thermography, previously.

As future works, by using the IR camera an exciting new path opens up. The degree of cure can be associated with a physical characteristic of the material: emissivity measured through itself. This parameter is not dependent on previous calibrations, but is associated directly with the change in properties of materials when they go from a liquid state to a solid state. In future, methods based on measuring emissivity may provide a set of reliable techniques for quantifying and controlling the curing process of a composite part.

Prólogo

El proceso de realización de una tesis doctoral constantemente es un verdadero enfrentamiento del candidato consigo mismo y con lo que este es capaz de aprender-desaprender, proponer-hacer-deshacer-medir-demostrar, debatir-concluir-aprender-sintetizar-publicar-compartir-avanzar, además de ser el ejercicio de auto-superación personal, de emprendimiento continuo para sortear las dificultades de toda índole, al tomar una u otra decisión para ir adelante con sus planteamientos. Es un proceso creativo-activo-solidario. Quizá en la vida de una persona seducida por menesteres intelectuales-académicos, es uno de los procesos más difíciles de superar, ya que las investigaciones han de estar acompañadas de vanguardia y originalidad en el área de conocimiento del candidato, por lo que hoy día con muchos más medios que en el pasado, la velocidad y el sistema de certificaciones, méritos y trámites burocráticos impone los condicionantes, que sitúan este proceso sujeto a un entramado de formalización social y económica muchísimo más complejo. A grandes rasgos, una tesis doctoral, en general, ha de materializarse en una obra escrita, en la cual convergen múltiples esfuerzos humanos e institucionales. Se plasma en ella, el conocimiento más fresco y original en una temática de interés científico, la mayoría de veces con la finalidad de contribuir en la resolución-entendimiento de problemas de toda índole poniendo a prueba los saberes del momento a la luz de todo el rango interdisciplinario de las ciencias. En ella, también se compendian las experiencias científicas, nuevos métodos, descripción de mejoras a caminos ya explorados o caminos simplemente inexplorados, con sus discusiones y sus conclusiones sobre la confirmación o no de una o múltiples hipótesis de partida. Todo lo anterior, significa embarcarse en una “aventura” con múltiples caminos y peligros. Esas “aventuras de exploración”, se acometen durante un cierto período de tiempo, que pueden ser tres, cuatro, varios años, e incluso a veces se prolongan a una vida entera de dedicación; por lo que pueden llegar a representar proyectos de vida.

Este documento, intenta por tanto, compendiar todas las experiencias científicas fructíferas, vividas durante los últimos años, todas ellas desencadenadas por una causa o quizá por múltiples estímulos-motivaciones, en realidad nada breves de explicar. A groso modo, fruto de la necesidad de resolver inquietudes personales y quizá más allá de ello, la necesidad de buscar caminos para responder con mayor criterio y con

métodos objetivos-fiables ante los desafíos que nos presenta nuestra sociedad, esa misma necesidad que llevo al hombre a cruzar el “charco” hace cerca de cinco siglos o a viajar a la luna, o que nos ha llevado a desarrollar la civilización occidental. Ese proceso de pregunta-respuesta y vuelta a empezar, ante los retos que plantea nuestra realidad humana, genera uno o múltiples torrentes de sentimientos, de sensaciones, de satisfacción-insatisfacción, de búsqueda constante, de aprender a aprender y de aprender a desaprender que experimenta el ser que observa el mundo, razona y profundiza-investiga y que es como la vida ante sus múltiples caminos, muchas veces con limitados recursos y múltiples soluciones en el tiempo, pero muy pocas con el rigor de la precisión y objetividad, más bien con la urgencia de la supervivencia. Labor científica del investigador en estado puro que nos enfrenta a un mundo, donde la rapidez en los procesos parece ser el común por imposición del mercado, muchas veces prescindiendo de la precisión y la objetividad. Este panorama nos enfrenta a grandes desafíos, que considero pasan por mejorar la conciencia colectiva y ética de la colaboración. Cada vez es menos aconsejable emprender camino individualmente, como la mayoría de las veces lo muestra la historia de la ciencia y lo premian muchos sistemas educativos. Es más aún lo cree mucha gente. Los medios muestran el éxito como el logro individual, la mayoría de veces. Quizá sea necesario revisar la manera de enseñar el éxito en nuestra sociedad. Llegados a este punto, esta tesis es un producto y éxito a la vez, de la generosidad múltiple, de todos quienes hemos participado de su desarrollo.

Finalizaba el año 2008, cuando recibí la generosa invitación por parte del Dr. Fernando Sánchez L. de integrarme en su grupo de investigación para contribuir en el estudio, experimental y/o numérico, de las técnicas de procesamiento de piezas de composite. Por su parte, el Dr. Nicolás Móntes S. adelantaba sus trabajos de investigación basados en técnicas computacionales para el diseño, la optimización y el control de procesos LCM. Desde aquella época, ya vislumbrábamos la importancia de las técnicas de monitorización óptimas, a fin de validar las técnicas computacionales. Por mi parte, me encontraba colaborando ya en la ESET desde principios del año 2007, en diversas tareas técnico-didácticas, desde el Laboratorio de Tecnologías del CEU. Y para aquel momento, la experiencia reciente que había logrado acumular se focalizaba, más que en composites, en la programación y creación de tests de verificación para controladores de tráfico vehicular y en general, sobre equipamiento vial, sensores para sistemas de control de tráfico vehicular y automatización. En mencionada temática, ya había realizado mis primeros trabajos de investigación. Por lo que miraba los composites como quien mira “los toros desde la barrera”. No obstante, transcurrido un tiempo hasta nuestros días, se ha avanzado de menos a más, teniendo en mente el aprovechamiento de cada oportunidad para profundizar en el conocimiento del mundo de los composites

y las posibilidades de la visión artificial, con sus problemáticas asociadas, sus retos y a su vez, la identificación de oportunidades.

Por tanto, a través de esta obra, se pretende aportar en el acercamiento de dos mundos, que la literatura científica busca juntar, pero se queda la mayoría de veces en una representación parcial condicionada por las restricciones espaciales y dimensionales de las técnicas de monitorización. He aquí un campo interesante que plantea retos significativos: la unión del mundo real (procesamiento de la pieza) y el virtual (simulación, predicción y visión artificial), mediante algún tipo de entidad que otorgue información integral al diseñador u operador. En la práctica, esto significa el establecimiento de vínculos, entre lo real y lo virtual, a través de la medición con sus sensores y/o métodos de monitorización de campo-completo, tanto como la fusión y el procesamiento de información disponible, proveniente de tecnologías emergentes, que abren nuevos caminos y expanden o rompen las fronteras, impuestas involuntariamente por condicionamiento de métodos e instrumentos tradicionales.

Avanzar en este camino implicará equiparar, paso a paso, la realidad y la virtualidad de los procesos de fabricación.

Capítulo 1

Estado Actual de las Tecnologías de Monitorización durante la Fabricación de Piezas-Composites mediante procesos LCM.

1.1 Introducción

Esta revisión de la literatura técnica y científica, tiene como propósito posicionar conceptualmente la contribución original de esta tesis a partir del conocimiento existente en el ámbito del procesamiento de composites y las técnicas o herramientas de monitorización y/o métodos de metrología existentes, para alcanzar productos competitivos en la industria de los *materiales compuestos*¹¹.

Los costes de producción de piezas-composites en la actualidad suelen ser elevados, especialmente debido al valor de las materias primas. En contraste, los procesos LCM pueden reducir significativamente el tiempo y el coste de procesamiento, en comparación con otros procesamientos implementados tradicionalmente, como el uso de autoclave. Sin embargo, en los últimos años, debido a las variaciones en el precio del petróleo, el precio final de las matrices poliméricas ha incrementado [3]. De esta manera, el coste de la fabricación de composites puede llegar a ser prohibitivo. Justo hoy más que nunca, los costes de producción en esta industria son un factor crítico en su competitividad, [21], [22].

¹¹ Ampliar en la sección de Anexos del Capítulo 1– Materiales Compuestos.

Como alternativa a procesamientos en autoclave, los procesos de fabricación LCM usados para piezas-composites de altas prestaciones, pueden reducir significativamente el tiempo y el coste de procesamiento. Además, supone ventajas al considerar, algunos de los siguientes criterios de fabricación, como son: el peso global, la cantidad de piezas, flexibilidad y versatilidad del proceso y la calidad o acabado de la superficie de la pieza final, entre otros [23]. Paralelamente, se presenta una coyuntura interesante para los procesos LCM, que probablemente disparará su crecimiento a raíz de la adopción de normativas en diversos países para controlar las emisiones de estireno. Especialmente la adoptada en 2011, sobre esta materia, por la *United States Department of Health and Human Services DHHS* [3]. Eso significa potencialmente, que muchas de las aplicaciones que hoy se fabrican con moldeos manuales, se muden a LCM-RIFT, por el enorme potencial y retos aún por resolver, esta tesis aborda en especial los procesos RIFT.

Esta revisión, se divide en tres partes principales. En primer lugar, se definen los procesos LCM-RIFT con sus etapas, a través de las principales fenomenologías físicas que estos suelen presentar, identificando los parámetros y problemas sensibles de monitorizar.

En segundo lugar, se realiza una revisión exhaustiva de la tecnología de sensorización y sus capacidades actuales para monitorizar el procesamiento de piezas-composites durante procesos LCM-RIFT, discurriendo hacia un paralelo comparativo entre las capacidades de las *técnicas tradicionales* y las que se basan en *tecnologías de visión artificial*. En particular, parte de la revisión se focaliza en las técnicas basadas en visión artificial (VA) que ya se están usando para monitorizar-medir, durante las etapas que conforman el ciclo de la fabricación de piezas-composites.

En tercer lugar, se presentan tres cuadros que compendian el estado actual de las técnicas de monitorización y metrología en procesos LCM-RIFT. Se pone de manifiesto las carencias de las técnicas actuales y las posibilidades de mejoramiento que pueden aportar tecnologías emergentes, y especialmente no-intrusivas en el procesamiento de composites.

1.2 Procesos LCM-RIFT.

Para el procesamiento de piezas de materiales compuestos, existen dos clases de moldeos¹² según [24], que pueden ser a molde abierto o, a molde cerrado, dentro o fuera

¹² Ampliar en la sección de Anexos del Capítulo 1– Clases de Moldeos.

del autoclave. Los procesamientos modernos para fabricación de piezas de altas prestaciones se basan en aplicaciones de molde cerrado y son conocidos genéricamente como procesos LCM¹³ (Ver Figura 1.1). Estos procesos han sido catalogados de diversas maneras en la literatura, sin embargo, en esta tesis el criterio de catalogación se hace por el tipo de contra-molde, el cual puede ser rígido, semi-rígido o flexible, a su vez, transparente, translúcido u opaco. En adelante, se focaliza en procesos RIFT¹⁴ [25]. Estos últimos requieren de contra-moldes flexibles transparentes o translúcidos.

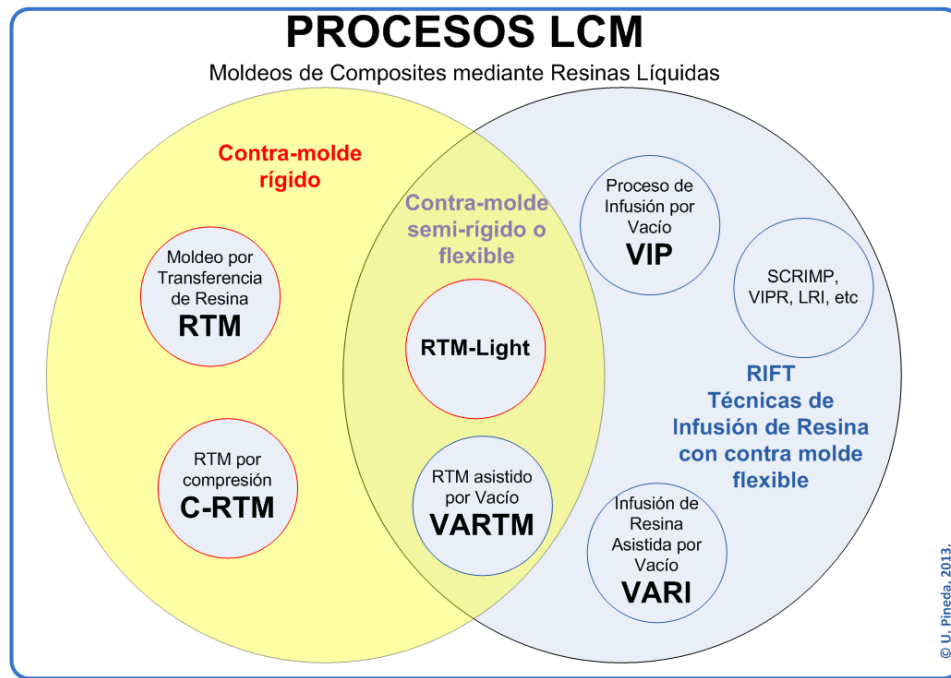


Figura 1.1 Familia de Procesos LCM

Los procesos de conformado por transferencia de resina, conocidos comúnmente como **LCM-RIFT** (ver Figura 1.1), consisten en la fabricación de piezas de materiales compuestos de matriz polimérica (resina termoestable) con refuerzo de fibra (las más usadas son fibras de vidrio y carbono). Debido a que estos procesos requieren contra-moldes flexibles (film plástico) el coste habitualmente es reducido respecto de procesos que requieren de contra-moldes rígidos o semi-rígidos. Con la finalidad de obtener una pieza-composite final, estos procesos han de satisfacer varios pasos o etapas (p.ej. ver Figura 1.2). Las principales etapas de los procesos LCM-RIFT son: diseño, preparación, llenado [26], curado y post-curado [27], desmoldeado y verificación de la calidad y/o caracterización de la estructura-composite. Estas a su vez, pueden sub-dividirse en sub-fases, que no se describen en esta tesis.

¹³ Ampliar en la sección de Anexos del Capítulo 1– Procesos LCM (Liquid Composite Moulding).

¹⁴ Infusión de Resina bajo contra-molde flexible – RIFT, Resin Infusion Flexible Tooling.

Una característica común a todos los procesos RIFT es la inyección de una resina¹⁵ termoestable-líquida dentro de una cavidad ocupada por fibras o materiales de otra naturaleza que preforman la estructura del composite. Dicha cavidad o molde puede cambiar su configuración. Para estudiar las peculiaridades de los moldeos existentes en LCM, incluso ir más allá de los mostrados en la Figura 1.1, se recomienda la lectura de las siguientes referencias [28], [29], [26]. Incluso, reportan una reciente sub-catalogación realizada a los procesos de infusión de resina de contra molde flexible, en [25].

Los procesos RIFT que se muestran en la Figura 1.1 son procesos de infusión de resina que se ejecutan comúnmente pre-formando la pieza diseñada, a partir de dos cuerpos como molde: uno inferior y otro superior. De esta manera, el aire atrapado en dicha cavidad (formada por el molde y contra-molde flexible) es evacuado mediante presión de vacío¹⁶. En esta tesis, en especial se utilizan procesos VIP (ver Figura 1.1). El material flexible (film plástico) y transparente [6] del contra-molde alcanza un fuerte contacto térmico con los materiales dispuestos dentro del molde, debido a la presión de vacío utilizada. Ambos semi-moldes, compactan la preforma de fibra (materiales secos) de la pieza a fabricar. A continuación, la presión de vacío (atmosférica) permite conducir la resina termo-estable¹⁷ hacia la preforma compactada [30]. A partir de ese momento, se espera el tiempo necesario, a fin de completar la etapa de llenado del molde. Posteriormente, con el molde lleno, evoluciona la reacción química que provoca la mezcla resina y catalizador. Los enlaces químicos de la polimerización se aceleran al pasar el tiempo y la viscosidad incrementa.

Físicamente, significa que la resina termo-estable ya está en la etapa de curado dentro del molde [31]. Consecuentemente, el molde libera calor al ambiente mientras el preformado de la pieza y la resina termo-estable se convierten en una sólida unidad rígida, siguiendo el molde inicial (esta parte se denomina cura o curado de la pieza). Para conseguir el estado sólido-rígido, los materiales inmersos en la consolidación de la pieza, pasan por varias fases durante el curado. Ellos van experimentando transformaciones en el siguiente orden: líquido, como-viscoso, como-vidrio, como-plástico-vidrioso, como-plástico-elástico y finalmente como-sólido. El post-curado que

¹⁵ Puede ser: epoxi, viniléster, poliéster, etc. Ha de estar en estado líquido-de-viscosidad-óptima, activada mediante algún tipo de acelerador-catalizador. Además puede haberse mezclado con algún inhibidor.

¹⁶ Es la presión atmosférica que internacionalmente es definida como 1.01325 bar, la cual equivale a 1 atm. Las presiones típicas en los procesos LCM pueden ir desde, -1atm (-1000 mbar aprox.) para un vacío "bruto" hasta 7atm en un curado por autoclave a un composite de matriz termoestable.

se ejecuta después del curado, es fundamental ya que lleva los materiales de la pieza de la fase como-sólido a la fase de como-sólido-rígido. El post-curado es un procedimiento a llevar a cabo durante la etapa de curado de la pieza, con la finalidad de aportar al composite la máxima dureza y rigidez, de dos maneras diferentes: a) siguiendo instrucciones fijadas por el fabricante de la matriz termoestable o b) aplicando la dosis de calor óptima conociendo el grado de polimerización alcanzado durante el curado ordinario, procedimiento que se lleva a cabo en un horno. Finalmente, la pieza estará lista para el desmoldeado. Y a partir de ahí, vendrá la verificación de la calidad, posibles caracterizaciones de la estructura o monitorización de la salud de la misma. La Figura 1.2 presenta las etapas del Proceso por Infusión de Resina (VIP), desde el diseño a la evaluación de la pieza final. Este proceso presenta una gran habilidad para producir componentes de gran envergadura con una buena relación calidad/precio, para series limitadas [18].

En la Figura 1.2, se recorren todas y cada una de las etapas que suelen ser comunes a todos los procesos LCM-RIFT. Así, se pueden intuir, múltiples fuentes de problemas y defectos en la pieza final, tal como se aborda en la siguiente sección.

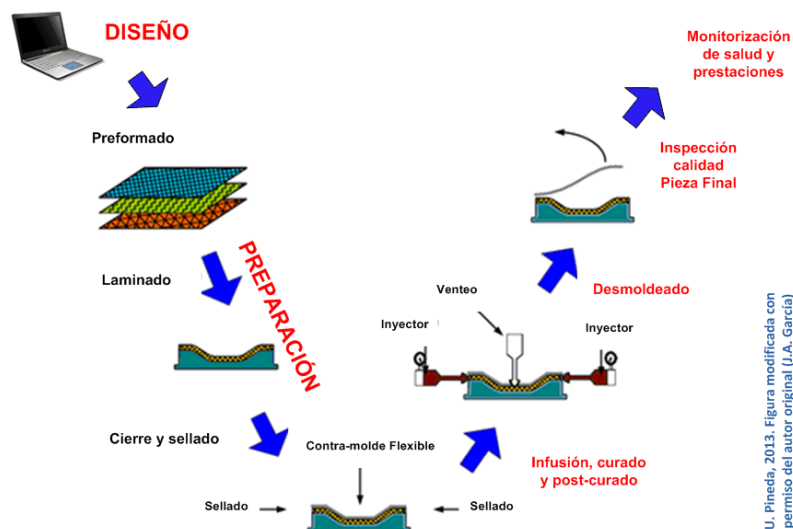


Figura 1.2. Proceso de fabricación mediante Moldeo por Infusión de Resina.

1.2.1 Etapas de Fabricación.

Los procesos RIFT han sido divididos en la literatura en múltiples etapas. En esta tesis particularmente se dividen en siete etapas principales, sensibles de monitorizar con la tecnología y metrología disponible en la actualidad. Estas son, *verificación y caracterización de materiales de fabricación, diseño, preparación del procesamiento de*

la pieza, llenado de molde, curado y post-curado, desmoldeado y finalmente verificación de la calidad y caracterización de la estructura. Adicionalmente, aunque aquí se aborda tangencialmente, se podría tener en cuenta en esta enumeración de etapas, la *inspección continua o periódica de la salud de la estructura*. Ya que este tipo de información, puede ayudar a mejorar los procesamientos posteriores de un diseño.

1.2.1.1 Verificación y caracterización de materiales de fabricación.

Esta etapa no siempre se desarrolla a nivel industrial. Pues requiere de equipamiento especializado para caracterización de materiales, el cual se menciona más adelante en la sección 1.2.1.1.1, como también de recurso humano formado para tal fin. Es una etapa que muchas veces se ejecuta mediante muestreo retrospectivo, aunque cada vez se aplica más y más, para verificar las propiedades esperadas de los materiales antes de la fabricación, mediante instrumentos de laboratorio. Por ejemplo, los análisis reológicos aplicados a una muestra de resina, entregan la viscosidad de partida de un lote de resina a ser utilizado en una fabricación. Este tipo de mediciones previas, permite inyectar el polímero con la viscosidad adecuada, con la finalidad de que no se desencadenen polimerizaciones antes de llenar el molde, completamente. En este sentido, los análisis calorimétricos también aportan información previa interesante, que si bien no siempre presentan utilidad cara a predicciones mecánicas de las piezas, al menos, confirman el estado adecuado de los materiales para ser procesados en una fabricación.

El fenómeno de transferencia de calor en fabricación de composites se analiza usualmente de acuerdo a dos fases, usualmente desacopladas. La primera de ellas, el comportamiento exotérmico de la resina es analizado fuera del proceso de fabricación, bajo condiciones de laboratorio usando la bien conocida técnica DSC (Differential Scanning Calorimeter), [32], [33]. La resina que se caracteriza en la DSC también es llamada “resina limpia” (en Inglés “neat resin”), [34]. En la segunda fase el comportamiento exotérmico de la resina en el proceso de fabricación. Los operarios usualmente esperan que la resina limpia tenga un comportamiento similar, si la pieza en fabricación se encuentra bajo condiciones controladas, como en la DSC. Esto último no siempre se cumple.

Adicionalmente, los tejidos y las configuraciones de laminados que estos pueden conformar, suelen ser estudiados, mediante caracterización de sus propiedades mecánicas principalmente. No obstante, la manera como se mueve el flujo en ellos ante inyecciones unidireccionales, radiales, entre otras, es motivo de múltiples

investigaciones. Estas asocian, por ejemplo, frente de flujo y permeabilidad [35], [36], formas del frente de flujo y ángulo característico u orientación [37], [38], del refuerzo estructural. El ángulo característico es de suma importancia, en relación a estructuras-composite, que deban desempeñarse mecánicamente de una manera o de otra. En este sentido, una equivocación en la colocación del preformado puede producir resultados nefastos para las prestaciones finales del componente.

En general, todos los materiales inmersos en una fabricación, tales como: desmoldeantes, tuberías, matriz (resina), material del molde, núcleos, refuerzos, entre otros, son sensibles de caracterización. Existen muchas características a ser estudiadas en los mencionados materiales, por lo mismo, esta etapa en si misma presenta un campo abierto a la investigación y la creación de equipamientos novedosos, tanto como fusión de antiguas técnicas como en la referencia [39]. Se avanza buscando utilidad e integración.

1.2.1.1.1 Equipamiento para Caracterización de Materiales.

Esta sección es complementaria a la sección 1.2.3.2.2.1. Para la caracterización del grado de curado de reacciones de curado de resinas termoestables, o de pequeños composites, usualmente son usados métodos térmicos, como DTA (Differential Thermal Analysis), DSC (Differential Scanning Calorimetry), MDSC (Modulated DSC), o también métodos termo-mecánicos, como: DMTA (Differential Mechanical Thermal Analysis). Una técnica complementaria para resinas foto-sensibles o curadas por luz ultravioleta es el Photo-DMA (Photodynamic Mechanical Analysis), [40].

1.2.1.2 Diseño.

El objetivo principal de la etapa de diseño es hoy día, proveer de inicio a fin, el diseño de una pieza mediante una solución de prototipado virtual [25], [41]. La cual, ha de permitir o facilitar el procesamiento de piezas de alta calidad, más rápido y a menor coste ofreciendo la versatilidad de comparar diversos escenarios de procesabilidad, [42]. Esta etapa busca minimizar los procesamientos de “prueba /error”, a la vez que se puedan predecir los defectos de la pieza final y sus prestaciones mecánicas.

Desde la aparición de los primeros programas de simulación en composites, integrados básicamente por motores de cálculo y bases de datos de parámetros obtenidos desde la experimentación, se evidenció la importancia del desarrollo de caracterizaciones exactas de los materiales, así obtener modelos cada vez más exactos. Con el advenimiento de

modelados 3D, diversos programas informáticos de diseño de procesamientos LCM, tanto académicos como LIMS [43], o comerciales, como SYSPLY, PAM-RTM [44] y PAM-FORM, incluso CATIA (que puede conectar con PAM), pueden proveer también soluciones para composites estructurales. En general, estos integran potentes algoritmos de análisis numérico como motores de cálculo y muchos de ellos se pueden encontrar en la literatura. Estos, permiten a los diseñadores determinar y optimizar procesos, aunque también como plantean en [25], para procesos RIFT aún existen varios retos por superar en este sentido.

1.2.1.3 Preparación del Molde para el Procesamiento de la Pieza.

En esencia, la etapa de preparación del procesamiento, apunta a dejar listo el molde y la preforma de pieza a consolidar, preparada para la inyección de la matriz termoestable en estado líquido. Comprende las siguientes tareas, principalmente:

- Limpieza del molde.
- Protección de zonas para fijación de materiales de sellado (Por ejemplo, masilla taky tape).
- Fijación de plantillas o accesorios que asistan el procesamiento: cintas de papel, plantillas de madera, entre otros.
- Aplicación del agente desmoldeante.
- Si se quiere que la superficie externa de la pieza desmoldeada, su acabado sea de algún color, se aplica algún gel coat y a continuación se deja curar en horno industrial.
- Sacar del horno.
- Planificar las plantillas de corte de los tejidos y la inter-configuración del laminado de tejidos de fibra (conocido como draping, el cual define también la orientación de la fibra según sea el resultado estructural que se quiera lograr).
- Corte de láminas de fibra, aplicación de adhesivo para fijación de fibras (fiber sizing) y laminado (cut and layup).

- Apilado de láminas de tejidos y colocación de costillas si es requerido por el diseño. Todas las anteriores tareas, definen el pre-formado de la pieza.
- Puesta del Peel-ply. Capa textil para pelar en el desmoldeado, que se pone para dar acabado suave y liso a la superficie del composite. No hace falta en todos los procesamientos.
- Puesta de puertas (inyectores y venteos) de entrada y salida de fluidos (resina y aire). Colocación de tuberías (define la estrategia de llenado del molde).
- Cobertura del molde con el film plástico, como contra-molde flexible.
- Sellado del molde.
- Vaciado del molde, extracción del aire. Así, se compactan a presión atmosférica todos los materiales puestos en el molde, vía de consolidar una sola pieza.

Cada una de las anteriores tareas es de capital importancia para el éxito la siguiente etapa y sin lugar a dudas, para la pieza final y sus prestaciones.

1.2.1.4 Llenado de Molde.

Llenar el molde es dentro del procesamiento, una oportunidad crucial para evitar que la mayoría de defectos se formen en esta etapa y disminuyan las posibilidades de éxito del mismo. El objetivo principal es llenar por completo el molde, procurando tomar las medidas necesarias para evitar que aparezcan los nada deseados problemas de llenado. Además, conforme el flujo se propaga en la preforma se dificulta el control de las variables inmersas, en esta etapa. Para una ejecución exitosa del llenado, se utilizan criterios de expertos en la selección de los puntos de inyección y venteos óptimos. Por ejemplo, pueden aparecer: efectos de borde o canales preferentes de flujo de resina (race tracking), zonas secas (dry spots), lavado de fibra (fiber washing), inclusiones, espesor no-uniforme, burbujas de aire transportadas en el frente de flujo de resina, burbujas en la resina producidas por componentes volátiles (gases), y finalmente escapes o moldes mal sellados, incrementos de la viscosidad prematuros al llenado completo del molde. Hasta hace muy poco tiempo, se pensaba tan solo en llenar el molde lo más rápido posible, a cualquier precio, sin pensar en la calidad del llenado y su impacto en el producto final. Sin embargo, recientemente han aparecido resultados de investigación, que demuestran el compromiso entre los mecanismos hidrodinámicos y los reológicos [7], [45]. Estos recomiendan, ejecutar llenados óptimos, mediante compactación de

fibras y presiones del frente de avance apropiadas, lo que comportará mejoras en la mecánica de impregnación de fibras, minimización de la porosidad y los problemas colaterales. Consecuentemente, se obtendrá la maximización de las propiedades mecánicas finales de la pieza.

Para estudiar ampliamente, el llenado de moldes y algunos consejos de cómo hacer frente a sus problemáticas, se recomienda ver las referencias [45], [46], [47]. Además ampliar en la sección de anexos IV, la cual que define el modelo bastante validado para el transporte de fluidos en medios porosos y en el capítulo 3, donde se tratará la impregnación y permeabilidad del refuerzo, tanto como su importancia en el proceso. Además, para monitorizar el caudal o la presión durante el llenado del molde, ver la sección 1.2.3.1.2 más adelante.

1.2.1.5 Curado y Post-curado.

La etapa de curado de la pieza, es dentro del procesamiento una oportunidad crucial para evitar, o al menos minimizar la aparición de defectos, debidos particularmente a mecanismos viscoelásticos y de transferencia de calor, inadecuados; los cuales, disminuyen las posibilidades de éxito del procesamiento y de sus resultados. El objetivo principal es curar por completo la pieza obteniendo la máxima rigidez posible, procurando tomar las medidas necesarias para evitar que aparezcan los nada deseados problemas asociados a curados no-óptimos. Por ejemplo, pueden aparecer: delaminaciones, contracciones, deformaciones, alabeos, malos acabados superficiales, curados incompletos, tensiones superficiales, grietas, curados no-uniformes debidos a porosidades y ciclos de curado no-óptimos. Para estudiar ampliamente, el curado de moldes y algunos consejos de cómo hacer frente a sus problemáticas, se recomienda ver las referencias [32], [46], [48], también ver los anexos en los anexos del capítulo 1, anexos V, VI, VII, VIII.

1.2.1.6 Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización de la Estructura.

Antes de verificar las propiedades de la pieza, haciendo uso de un marco de procesamiento tradicional, esta sería la última etapa. Se ejecuta, más o menos el siguiente procedimiento, antes de ejecutar el desmoldeado de la pieza:

- Se verifica que la pieza ha finalizado la etapa anterior. Curado y post-curado. De no ser así, someter la pieza a tensiones y deformaciones, puede resultar contraproducente para la misma, en servicio.
- Cortar la presión de vacío.
- Remover el film transparente que actúa como contra-molde.
- Extraer con la ayuda de “palancas” y “gatos” la pieza finalizada, dejando el semi-molde, libre de pieza consolidada.
- Limpiar la superficie del semi-molde rígido.
- Inspeccionar Visualmente de la pieza desmoldeada.

A nivel de verificación de la calidad y caracterización. La detección de daños en composites, es de suma importancia para verificar el éxito del procesamiento de fabricación y las prestaciones de la pieza en servicio. Los daños pueden ser, tales como grietas de la matriz, fracturas de fibra, delaminaciones, malas adhesiones, inclusiones, entre otras.

Los tests para detección de daños pueden ser divididos en dos tipos: destructivos y no destructivos. Los test destructivos pueden incluir métodos de laboratorio para testear fallos de muestras, tales como: ante tensiones (tensile), de resistencia a compresiones y fracturas, entre otras. Mediante técnicas de seccionado, de-laminado y fractografía de muestras (todos destructivos) se pueden analizar los daños en composites. Sin embargo, actualmente, se están haciendo cada vez más populares las técnicas no-destructivas, las cuales están basadas principalmente en: emisión acústica, termografía, ultrasonidos, radiografías por rayos X, entre otras técnicas emergentes.

1.2.1.7 Monitorización Continuada o Periódica de la Salud de la Estructura-composite.

En todas las aplicaciones donde son usadas piezas de composites, tales como, estructuras aeroespaciales, automóviles y marítimas, la detección temprana de daños en la pieza-en-servicio es lo deseable. De esta manera, se mejora la seguridad y la fiabilidad de la estructura o del sistema en servicio. La detección de daños se lleva a cabo mediante una cierta variedad de sensores, los cuales pueden a su vez monitorizar continuamente la salud de la estructura y las condiciones ambiente, siendo activados por

alguno de los parámetros que cruce los umbrales prefijados según criterios de salud. Los sensores de pequeño tamaño (microscópicos deseablemente), livianos y que puedan permanecer operativos, aún embebidos dentro de la estructura, son los preferidos. Pudiéndose realizar tests de corta duración o continuadamente. Empero, los sensores relativamente grandes respecto del espesor de la estructura, podrían generarle efectos mecánicos adversos. Varios tipos de sensores son usados comúnmente para este tipo de trabajo: partículas piezoeléctricas, sensores de emisión acústica y fibras ópticas, [49]. Cada tipo de sensores ofrecen beneficios y limitaciones, [50].

Este tipo de técnicas de monitorización se aplican por ejemplo en tests de durabilidad de la pieza, y para diagnóstico de la integridad estructural, según [51], donde reportan el uso de FBG (Fiber Bragg Grating). Este tipo de monitorización de la pieza-en-servicio, plantea restricciones a todos los métodos de inspección mediante técnicas no-destructivas (NDT), por lo que de momento, las técnicas de sensorización más apropiadas y funcionales, son las intrusivas. No obstante este campo, es aún una línea de investigación abierta a la exploración mediante la amplia gama de sensores que pueden ser usados en composites y que más adelante se describen, más ampliamente.

1.2.2 Principales Fenomenologías Físicas.

En el transcurso del procesamiento de piezas-composites pueden presentarse diversos cambios fenomenológicos. Los investigadores, han publicado principalmente sobre las fenomenologías físicas (hidrodinámicas, transferencia de calor, reológicas y mecánicas) y químicas (polimerización). Estas, en general impactan positiva o negativamente la calidad final de la pieza, bien desde el punto de vista estético y/o a nivel de prestaciones del composite en servicio. En este sentido, la evolución temporal de la micro-estructura determina en gran medida las propiedades mecánicas de la pieza final [52]. Es decir, la evolución del entramado fenomenológico define el éxito del procesamiento y su producto final. Avanzar en el conocimiento de dichas fenomenologías (ver Figura 1.3), desde su clasificación, cualificación, caracterización y diversos métodos de cuantificación o medición, al parecer es el camino que sigue la comunidad científica que estudia los mecanismos micro y macroscópicos que atañen a este tipo de procesos. No obstante, persiste en la actualidad la inquietud, acerca del estado de aprovechamiento de las capacidades de la tecnología y técnicas de monitorización disponibles para los procesos RIFT. Inquietud extensible a procesos LCM.

Fenómenos Reológicos-Térmicos: La facilidad con la que fluye la resina en la preforma depende además de la permeabilidad, de la viscosidad. De hecho, es práctica habitual en

la industria, disminuir la viscosidad de la resina calentándola, así facilitar la fluidez de la misma, tal como en [53]. Calentar la resina facilita la convección térmica mediante transferencia de calor por conducción a través de la preforma y por tanto, ayuda en la mejora de los mecanismos de impregnación.

Fenómenos Mecánicos-Químicos: Especialmente han sido estudiados los siguientes problemas, las contracciones, las deformaciones del composite. Futuros problemas mecánicos, pueden presentarse debidos a polimerizaciones no-óptimas. Lo cual, lleva al composite a rigideces heterogéneas y por tanto, variabilidad mecánica. Además, desmoldear una pieza que ha polimerizado incompletamente, propicia la aparición de deformaciones mecánicas (alabeos, cracking, etc.) [48], potencialmente nefastas para su desempeño.

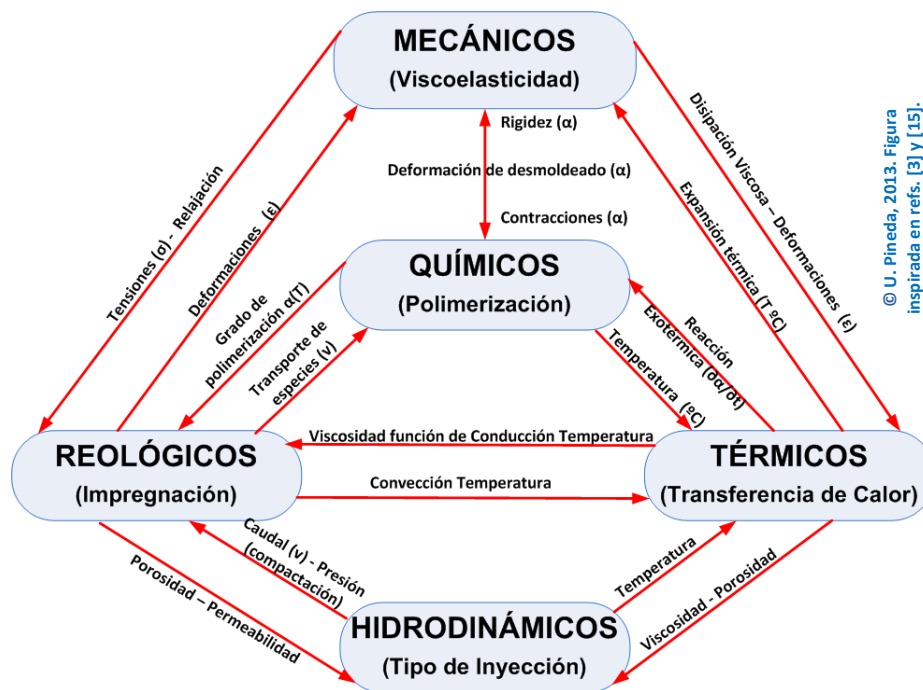


Figura 1.3 Interrelación entre fenómenos presentes en los procesos LCM.

Fenómenos Térmicos-Químicos: Someter el composite de matriz-fibra a ciclos térmicos óptimos, propicia la aceleración de la polimerización en tasas óptimas. Por tanto, la temperatura del composite, no ha de sobre-pasar la temperatura de trabajo de la matriz termoestable, con la finalidad de no degradarla.

Fenómenos Reológicos-Químicos: El transporte y la impregnación del refuerzo, mediante la resina termoestable, se han de realizar óptimamente, con la finalidad de que la resina activada no llegue al punto de gel, antes de alcanzar el llenado completo, y óptimo del composite. Especial cuidado se ha de tener, ya que una vez la resina

termoestable alcanza su punto de gel, su viscosidad crece exponencialmente hasta el punto que se dificulta el movimiento del flujo de resina. El fenómeno de la polimerización es evidente y con este, incrementa la aceleración de los enlaces químicos, produciendo cambios en la temperatura.

Fenómenos Hidrodinámicos-Térmicos: incrementar la temperatura de la resina termoestable, ayuda en el movimiento del flujo de impregnación, compatibilizando con las fuerzas viscosas y capilares. La configuración óptima, del tipo de inyección (presión- temperatura), favorece la impregnación y por tanto, la minimización de la porosidad.

Fenómenos Reológicos-Hidrodinámicos: En función de la velocidad del frente de flujo, actuarán las fuerzas capilares o viscosas [45], favoreciendo o no, la impregnación y por tanto, la potencial aparición de porosidades. En un escenario, donde la permeabilidad también cambia en atención a los cambios locales, debidos al contra molde flexible.

Fenómenos Reológicos-Mecánicos: Los problemas de impregnación, se reflejan en la aparición de porosidades, zonas secas entre otras. Este tipo de problemas que emergen durante el llenado de la pieza, se evidencian cuando se producen tensiones de deformación – relajación en el composite. Los alabeos, micro-roturas y demás problemas mecánicos aparecen como respuesta a inadecuados acoplamientos de este par de fenomenologías.

Fenómenos Térmicos-Mecánicos: La polimerización del composite incrementa naturalmente su temperatura, la cual interactúa con el molde. El molde ha de estar preparado, para los cambios térmicos, a fin de atenuar la disipación viscosa, sin afectar la pieza final. Las dilataciones del molde, pueden generarle al componente problemas dimensionales y deformaciones. Adicionalmente, temperaturas heterogéneas a lo largo del espesor del laminado, pueden generar delaminaciones y roturas.

1.2.2.1 Identificación de parámetros y problemas de proceso, sensibles de monitorizar-medir.

Para observar en perspectiva, los principales retos que tienen hoy día los procesos RIFT, como son la fiabilidad y la repetibilidad [18], tanto como la disminución de costes de producción alcanzando calidades competitivas; contar con herramientas de diseño y monitorización óptimas y vinculadas puede favorecer gradualmente la optimización de la fabricación. Dicho escenario significa, definitivamente dejar atrás paradigmas de

optimización tradicional mediante técnicas de prueba-error o la dependencia procedente del “background del experto”.

De esta manera, resulta útil pensar en los diferentes pasos que se tienen que ejecutar, para producir una pieza. Desde la caracterización de materiales y diseño virtual a la optimización de la fabricación, así producir un composite de excelentes prestaciones mecánicas. Al observar la Figura 1.4, se pueden ver e inferir algunas *variables, parámetros, indicadores e incluso índices estadísticos* que se deberían de conocer a lo largo del procesamiento, bien para controlarlo activamente respecto del diseño o para controlarlo pasivamente aprovechando la información, que permita ajustar los modelos numéricos de referencia. En la Figura 1.4, se ponen de manifiesto, las múltiples relaciones que pueden llegar a existir entre los parámetros pre-definidos por diseño de proceso, los parámetros asociados a estos, la fenomenología física, los defectos o problemas del proceso (deseablemente monitorizables), y consecuentemente el impacto en las propiedades mecánicas del componente, reconociendo que dicho esquema representa un conocimiento incompleto. De acuerdo a dicho entramado, es comprensible que las propiedades mecánicas del composite sean afectadas por el tipo de procesamiento de la pieza, como lo indica la referencia [15]. Significa esto, que sea bastante importante seleccionar óptimamente parámetros de proceso, tal que las variables principales del mismo, es decir, los defectos o problemas, tales como, curados incompletos, zonas secas, etc., resulten minimizados. Se puede observar también que los defectos o problemas pueden emerger en cualquier etapa de la fabricación y dependen específicamente de la fenomenología física que presentan los materiales y/o de la rigurosidad en la manipulación de los mismos durante el proceso. Mencionada fenomenología se puede llegar a controlar mediante parámetros, variables e indicadores del proceso definidos en el diseño, ante la dificultad de medir en tiempo real las prestaciones mecánicas de la pieza en consolidación y la complejidad en las interacciones que se muestran en la Figura 1.4. Mencionada complejidad, probablemente, ha ocasionado ineficacia en la evaluación de los modelos numéricos para alcanzar el procesamiento óptimo que apunta a las mejores propiedades mecánicas del composite. Para lo último, hacen falta técnicas y herramientas óptimas y eficientes de monitorización y metrología, con la finalidad de evaluar las variables de proceso, los parámetros de diseño y todos los índices que aporten utilidad en el análisis del procesamiento completo.

Las variaciones respecto de las estimaciones, que tienen lugar durante la fabricación de piezas-composite, incluyen cambios de orientación y/o desplazamientos de las láminas de fibra, calentamientos, enfriamientos, cambios de presión, cambios de posición del

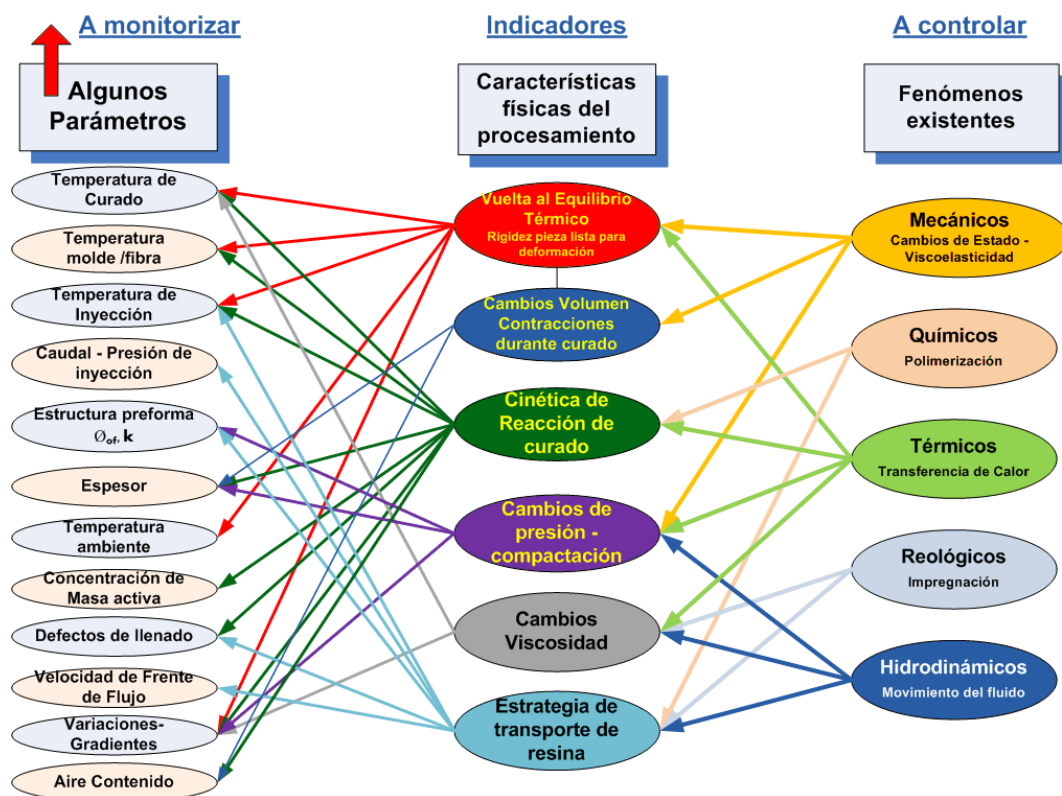
fluido, entre otros. Cada uno de ellos puede influir en las prestaciones del componente final, de diferentes maneras. Insuficiente calor puede resultar en una temperatura baja e inadecuada de transición vítrea y como consecuencia deformaciones de la misma bajo estrés. Insuficiente presión o flujo puede generar altos niveles de porosidad o grandes zonas secas [40].

Por todo lo anterior, para estudiar o controlar algunos aspectos de las etapas de fabricación de piezas de material compuesto de matriz termoestable, han sido utilizados multitud de sensores de tipo intrusivo y no intrusivo. La literatura acerca de la sensorización utilizada en este tipo de procesos, tanto en enfoques científicos como industriales comprende ambos tipos de sensores, destacando los sensores que no comprometen la integridad de la pieza final.

Ante la dificultad de medir directamente la evolución de las propiedades mecánicas de los materiales inmersos en el proceso. Se definen por tanto como parámetros de proceso, toda cantidad física, medible, mediante algún tipo de sensor capaz de monitorizar genéricamente la evolución de alguno de los cambios físicos relativos a alguna de las fenomenologías que se presentan en un pequeño volumen o en el conjunto de los materiales en procesamiento, y que consolidarán una pieza. *Como las propiedades mecánicas en primera instancia, son función del tipo del procesamiento y/o la rigurosidad ejecutada durante las etapas, se requiere de la conjunción de múltiples métodos de medición-monitorización, de caracterizaciones de pequeñas muestras, como la fusión de todo tipo de datos, para inferir la evolución de las variables o propiedades primarias de la pieza, en cualquier momento.* De hecho, la literatura refleja en la referencia [54], la utilidad de estos métodos de inferencia como aplicación a diferentes herramientas para el control del proceso de fabricación en tiempo real (RT), controladores para supervisar, controladores adaptativos basados en conocimiento; por ejemplo, sistemas expertos, controladores de razonamiento cualitativo, lógica difusa, redes neuronales y modelos analíticos. Aunque en aquella época hace alusión fundamentalmente, a técnicas de sensorización exclusivamente intrusivas, restringidas al conocimiento local-puntual.

Por ello, todas y cada uno de los parámetros de proceso, se convierten en parámetros de ecuaciones complejas, que modelan todos y cada uno de los potenciales **problemas y defectos** que pueden surgir en el procesamiento de piezas-composites. De esta manera, son múltiples los **parámetros, indicadores e índices estadísticos** que pueden aparecer, y que en sí mismos, son elementos interesantes e imprescindibles de análisis, para inferir-medir y por tanto explicar las variables principales a minimizar del procesamiento de

composites: *los problemas y defectos*. Para ayudar en esta clase de análisis, en la literatura, se pueden encontrar por ejemplo, criterios de evaluación del llenado de la pieza (ubicación óptima de válvulas a fin de evitar zonas secas y race-tracking), [55], [56]. Los criterios de curado, que implican verificación de la temperatura superficial homogénea, viscosidad, formulación de la resina variable conforme avanza la inyección, a fin de evitar tensiones y dotar la pieza de mejores propiedades mecánicas, [56], [57]. Por último, los criterios asociados a la velocidad del frente de flujo (caudal constante o presión constante, se han de controlar desde la boquilla o los canales de inyección a fin de evitar macro/micro burbujas impregnando los hilos de fibra con orientación adecuada) [45], [58]. En [55] definen la distancia al venteo como criterio para minimizar las zonas secas durante el llenado. En [56] es la continuación de [55] incluyendo la homogeneidad del curado como criterio. En [45] definen cual tiene que ser la velocidad del frente de avance para minimizar la formación de macro/micro burbujas.



© U. Pineda, 2013. Figura inspirada en refs. [3] y [15].

Figura 1.4 Relación de parámetros monitorizables del procesamiento y problemas-defectos a minimizar.

De esta manera, en investigaciones recientes [59], [60], [61], han focalizado sus esfuerzos, para comprender la fenomenología asociada a los procesos de fabricación y motivan el desarrollo de herramientas tecnológicas. Intentan integrar aún

restringidamente la monitorización, el diseño, la simulación y la controlabilidad de mencionados procesos, a escala de laboratorio.

En el procesamiento de composites, ejemplo de parámetros de proceso, medibles mediante sensores comerciales o desarrollados a escala-laboratorio, pueden ser: la temperatura, cambios en rangos de frecuencias de radiación, variaciones de frecuencia, variaciones de capacitancia o conductancia eléctrica, cambios de voltaje, cambios en la velocidad de transmisión de ondas a diversas longitudes de onda, cambios en el índice de refracción entre otros. Analizadas independientemente, una a una, probablemente sus evoluciones no explican las problemáticas y/o defectos, ni su relación con la reducción en la calidad mecánica de las piezas.

1.2.3 Revisión Tecnológica y Técnicas de Monitorización

En las secciones sub-siguientes se presentan las técnicas y tecnologías, bien intrusivas y no-intrusivas utilizadas en LCM, indistintamente. Esto es, sin hacer una clasificación rigurosa de este tipo de atributo, ya que interesa más analizar, para qué, por qué, con qué, cómo, cuándo usar una tecnología, técnica u otra. Esto se define como las capacidades de medición-monitorización alcanzadas por los métodos tradicionales, en contraste con los métodos que usan visión artificial.

1.2.3.1 Capacidades de la Técnicas de Monitorización Tradicionales de Parámetros-Clave de Proceso.

Hablar de instrumentación para la monitorización, conduce a hablar de sensores y por ende de los tipos de transducción, buscando destacar-relacionar la fenomenología física asociada, más que el nombre comercial que recibe el sensor. En este capítulo resulta útil, clasificar los sensores por el tipo de transducción, buscando desarrollar y ofrecer una revisión comprensible y que apunte a la utilidad respecto de la fenomenología presente en los procesos RIFT. La cuantificación de un fenómeno físico mediante un sensor-transductor, depende en especial del entendimiento óptimo de la física que acompaña el fenómeno. Entender que variable física es conveniente medir, ayuda a elegir óptima y eficientemente un tipo de transductor u otro. Observar el nombre que habitualmente adopta un tipo de sensor, la mayoría de veces no dice mucho de sus prestaciones, salvo algunos casos. Comprensivamente dice mucho más su tipo de transducción, ya que ayuda también a analizar qué tipo de conceptos físicos han sido ligados para medir experimentalmente la fenomenología. Es por ello, que en la presente memoria, se considera conveniente este tipo de clasificación.

1.2.3.1.1 Inspección Humana.

Tradicionalmente los procesos LCM-RIFT, han estado vigilados por operadores-humanos. La visión que se puede tener acerca de cualquier etapa del procesamiento de una pieza, siempre ha sido bastante corta-miopia. Ya que el ojo humano, ante el tedio y el cansancio, se permite no observar más lo que está ocurriendo. Las tecnologías de sensores y dispositivos de adquisición que existen en el mercado, ofrecen por el contrario la posibilidad de hacer adquisiciones sistemáticas. Observar estos procesos, llevó a ciertas personas a convertirse en expertos, eruditos en estas temáticas. La información que puede alcanzar un experto de procesamiento de composites, es una información poco dinámica y con una posibilidad de diseminación muy baja.

Por su puesto, sobre todo en el procesamiento de piezas grandes, es imposible para un operador-experto, vigilar todas las zonas que conforman una pieza. De la misma manera, apoyarse en herramientas de inspección y proyección, por ejemplo de las líneas de fijación de las láminas de fibra, da al experto muchísimo margen de mejorar el procesamiento, que si lo hiciera mediante métodos tradicionales. Normalmente para las etapas más críticas (p. ej., el llenado del molde, curado) se requiere más personal que uno. Sin embargo, para la etapa de curado, tomando lecturas de temperaturas discretas, discontinuas y sin regularidad, lo más probable es que se desconozca la dinámica de la polimerización en otras zonas.

1.2.3.1.2 Sensores Electro-mecánicos.

Entre los transductores electro-mecánicos, se destacan los sensores acústicos sensibles a ondas de ultrasonidos (más allá de los sonidos audibles por humanos, esto es aproximadamente más allá de 20khz). Esta técnica de detección se aprovecha de la esencia física de las ondas acústicas en mencionado espectro, siendo este un fenómeno transitorio que transmite energía a través del espacio-aire (propagación de onda electromagnética) o de algún material (propagación de ondas mecánicas). Justamente se basa en la medición de la atenuación de la señal en el medio de transmisión. En procesos LCM, los métodos basados en ultrasonidos principalmente, se basan en la detección de cambios mediante parámetros que evalúan la propagación de las mismas.

Existen variantes de aplicación de ultrasonidos en LCM. La primera variante se refiere a transferir ultrasonidos a través de una longitud conocida, quedando definida por la separación entre emisor y receptor. Las ondas viajarán desde una zona hasta otra, realizando inspecciones longitudinales a la pieza. Sin embargo, esta misma técnica es

posible ejecutándola transversalmente, aquí es importante conocer el espesor a través del cual viajará la onda. En ambos casos, es importante tener en cuenta la cantidad de materiales por los que ha de viajar la onda. La segunda variante hace alusión a ultrasonidos transferidos a través de guías-de-onda embebidas en la pieza. La tercera variante usa ultrasonidos como interferómetro de la señal de luz que se está transmitiendo a través de fibras ópticas Fabry-Perot embebidas en una pieza durante su curado. En las tres variantes, los parámetros claves de medida son el tiempo de vuelo, la velocidad de transmisión y la atenuación. Cualquier cambio registrado en alguno de ellos, puede advertir cambios físicos en la pieza y por tanto muchos investigadores han planteado útiles correlaciones, que permiten evaluar parámetros comentados más adelante. Recientemente, en [62], publican una variante más de métodos por ultrasonidos, en este, emisor y receptor están acoplados al aire. Sin embargo, permiten evaluar el curado y la viscosidad de la pieza, de manera no-intrusiva, lo cual se resalta como un avance interesante del estado del arte. En la actualidad, los investigadores intentan fusionar las ventajas de diversos métodos de monitorización, con la finalidad de superar las desventajas de los mismos. De esta manera, en el trabajo, [63], los ultrasonidos se fusionan con técnicas de termografía lockin, obteniendo una original y útil técnica denominada vibro-termografía.

Las técnicas de sensorización acústicas comienzan a hacerse un lugar en estructuras de aeronavegación, especialmente para ejecutar la vigilancia del procesamiento de una pieza-composite y de su salud como estructura [64]. Los sensores acústicos funcionan según el principio de que cualquier cambio físico en el entorno que rodea a un sensor repercutirá como una variación local de la impedancia acústica. Por lo tanto, el paso de un fluido (aire o resina), la presencia de burbujas de aire y el grado de curado de la resina, pueden ser detectados por la propagación de ondas acústicas caracterizadas en el molde. Estos sensores presentan buena resistencia a altas temperaturas y son robustos frente a interferencias electromagnéticas [65]. Es una tecnología en evolución, lo que no impide que fabricantes e investigadores de diversos campos del conocimiento, como en composites, se estén interesando abundantemente, [66]. No obstante, esta tecnología aún no se considera suficientemente madura para estudiar la dinámica de impregnación de refuerzos de fibra en procesos RTM [3], aunque resulta bastante útil para NDT, en detección de defectos, en salud de estructuras y para monitorización del curado. El grado de curado de piezas ha podido ser medido mediante este tipo de sensores, constatándose ya que el tiempo de vuelo de la onda emitida decrementa mientras el grado de curado incrementa. También han podido ser medidos diversos aparentes valores de módulos elásticos (de Young, longitudinal, y de deformación). Mencionadas capacidades de detección y/o medida vía correlación han sido incluidas en una de las

más completas revisiones hasta ahora, aunque ya desactualizada, sobre técnicas de monitorización en LCM, [40].

Aunque también han sido utilizados los Transformadores de Desplazamiento Lineal - LVDT (Linear Voltage Displacement Transform) para monitorizar pequeños desplazamientos y/o vibraciones locales ante tests mecánicos, [67], [68], tanto como espesores y su correlación con los cambios de presión. Un LVDT (Transformador Diferencia de Variación Lineal) es un tipo de transformador eléctrico para medir desplazamientos lineales. A medida que se mueve el núcleo, el *voltaje diferencial* inducido en el secundario varía.

Mediciones de caudal y presión. Los sensores de presión, usualmente aprovechan la deformación mecánica de membranas o de materiales piezoeléctricos, mientras que los de caudal o caudalímetros, aprovechan variaciones de voltaje ante campos magnéticos inducidos, diferenciales de presión, y/o cambios de frecuencia (doppler) o variaciones del tiempo de vuelo (ultrasonidos) al evaluar dos puntos de una tubería. Entre los anteriores, se destacan los piezoeléctricos, que generan un voltaje cuando son deformados o sometidos a tensiones mecánicas, además que pueden ser usados tanto para caudal como para presión. De igual manera, al ser sometidos a una polarización por campo eléctrico (un voltaje), estos materiales se deforman sufriendo el efecto contrario.

Monitorizar el caudal o gasto volumétrico de resina, la presión de inyección, tanto como, la presión en diversas zonas de la pieza [69], [70], o la concentración de la matriz a inyectar (%Resina + %Catalizador + %Inhibidor + %Otros aditivos), resulta bastante útil. Por ejemplo, son varios los eventos clave que los sensores de presión pueden identificar durante el procesamiento de un pieza, por ejemplo: la llegada de la resina al venteo (se presenta un pico brusco de presión en el venteo), la expansión térmica de la pieza se relaciona al pico exotérmico (se presenta un pico brusco de presión en la cavidad) y el comienzo de la retirada del punto de gel (se asocia a una disminución de la presión en la cavidad). También, para identificar efectos de borde, también llamados racetracking, y evitar la creación de zonas secas [69], [70]. Este tipo de sensores industriales, son duraderos y de bajo coste. Son totalmente apropiados para obtener datos relevantes de los fenómenos estudiados durante la etapa de llenado y la impregnación del refuerzo fibroso, [3].

Además, los sensores de presión en la inyección, venteo y/o distribuidos a lo largo del molde, junto a termocuplas también distribuidas en diversas zonas de la pieza, son los instrumentos más frecuentemente instalados a escala industrial y laboratorios para ayudar en el control de etapas de impregnación y curado, en diversos procesos LCM,

según [64]. Este tipo de sensor, usualmente consta de un diafragma con un medidor de deformación que correlaciona, deformación y presión.

Para profundizar en detalles sobre este tipo de sensores, se pueden ver las referencias [40], [71], [72]. Una aplicación, en [3].

1.2.3.1.3 Sensores Electro-químicos.

Los sensores dieléctricos han sido usados en [73], [74], [75], [76], [77], [78]. Adecuados para el control de calidad y la producción industrial, estos se han distinguido por su capacidad para monitorizar la viscosidad de resinas en proceso de polimerización. Se ha demostrado que la conductividad iónica de un líquido está relacionada con su viscosidad dinámica [79], [80]. Esta relación existe porque el mecanismo de difusión de iones y dipolos eléctricos en un fluido es similar al mecanismo de difusión de impulso en el mismo fluido (la ley de Stokes). Los fabricantes de este tipo de sensores, correlacionan la conductividad iónica y la viscosidad de la resina, adoptando los términos <<viscosidad iónica>> para definir este fenómeno [81]. Además, utilizar el punto de inflexión de la curva de logaritmo de la <<viscosidad iónica>> (o el pico máximo de la derivada del logaritmo de la curva de la <<viscosidad iónica>>) para anticipar el punto de gel para diferentes sistemas resina. Estas curvas también permiten determinar otros eventos tales como, presencia de resina, viscosidad mínima y el punto de desmoldeado (después del curado).

Cabe señalar que estos sensores son costosos, ya que han de estar en contacto directo y preferiblemente embebidos con la pieza de material compuesto, para ser funcionales. Por lo tanto, esta tecnología se considera intrusiva, que puede ser una debilidad en algunas situaciones donde se requiera excelente acabado de superficie y maximizar prestaciones de la pieza. Además, en el caso de refuerzos de carbono que son conductores eléctricos, este tipo de sensores no es adecuado, [82]. Además, como todas las técnicas de supervisión basadas en cambios eléctricos, generados por el fenómeno bajo observación, la dielectrometría es a menudo vulnerable al ruido electromagnético que se presenta típicamente en entornos industriales [83]. Este tipo de sensor, a pesar de dichas restricciones, podría ser interesante para validar técnicas menos restrictivas, ya que cuenta con muy buena relación respuesta versus cambios en propiedades poliméricas.

AGC (Arrival-Gel-Cure) descrito en [84], basa su funcionamiento en principio galvánico o de célula voltáica, consta de una varilla con núcleo, ambos materiales

disimiles. El voltaje incrementa al detectar presencia de resina, no obstante se desvanece dicha señal, cuando ha curado la pieza. En [85], [86] mediante alambres conductores monitorizan el llenado de un molde y evidencian cambios reológicos, por variación de la conductividad eléctrica. En [87], presentan el sistema de detección SMARTweave™, el cual indica presencia o ausencia de resina en alguna localidad mediante medición de resistencia eléctrica entre dos electrodos en esa posición. La parrilla de sensores está compuesta de filamentos (alambres metálicos, fibras de carbono, o fibras de aramida con revestimiento-metálico) que se cruzan entre planos que no se interceptan para producir espacios de sensorización. Mediante mediciones de voltaje de dichos espacios de sensorización, se puede alcanzar una indicación del estado de curado en función del tiempo, tal como en [84], muestreando múltiples lugares. Además el tipo de sensores presentados en [88] tienen el mismo concepto que en [87], siendo usados para hacer control del proceso. Actualmente son comercializados por varias compañías, no obstante destaca Netzsch™ [75], [89], distribuyendo varios tipos de sensores y equipamiento de adquisición para estos menesteres.

1.2.3.1.4 Sensores Termo-ópticos

Dentro de este tipo de transducción también se encuentran las pinturas cromáticas. Estas tienen la habilidad de cambiar de color, es decir sus propiedades ópticas ante cambios de temperatura. Por tanto, se pueden usar en combinación con cámaras de espectro visible o mediante inspección humana. Cada color, representa una temperatura. Resulta útil, ya que los colores están calibrados a determinados valores térmicos.



Figura 1.5. Pintura cromática termo-óptica¹⁸.

¹⁸ Visitar <http://www.stardustcolors.co.uk>

1.2.3.1.5 Sensores Foto-eléctricos y Foto-químicos.

Han de estar embebidos en el molde, siendo técnicas intrusivas. Los sensores de fibra óptica tradicionales responden a perturbaciones físicas actuando a lo largo de la longitud entera de la fibra, [40]. Por ello, pueden resultar útiles para la correlación de cambios físicos en fenomenologías asociadas a procesamientos LCM, con parámetros alcanzados mediante técnicas de atenuación de la intensidad de la iluminación, interferometría (Fabry-Perot, Mach-Zender, o Michelson) o reflectometría óptica en el dominio del tiempo –OTDR (Optic Time Domain Reflectometer).

La literatura científica reporta la disponibilidad de diversos sensores de fibra óptica. Por ejemplo, los basados en modulación de la intensidad del rayo de luz transmitido a lo largo de la fibra-sensor (espectroscopia de transmisión [90], espectroscopia de onda evanescente [91;92] para la estimación del frente de flujo mediante la ley de la reflexión de Fresnel, [93], y variaciones del índice de refracción durante la polimerización de un material [94]) o basados en modulación del índice de refracción [95], [96], OFBG-Optical Fiber Bragg Grating, [97]. En especial, las OFBG ofrecen la ventaja de codificar o seleccionar el tipo de modulación del índice de refracción, de la o las longitudes de onda a transmitir, a lo largo de la fibra, grabando dentro del núcleo de la fibra óptica estándar un grating (una especie de anillos-rejilla con diversas disposiciones). Lo cual supera el inconveniente que tienen los métodos basados en modulación de la intensidad del rayo, ya que debido a pérdidas de luz asociadas a cualquier micro-rotura, o micro-flexión en las fibras puede comprometer la intensidad de luz resultante, consecuentemente no están libres de error. En este sentido, las OFBG ofrecen un método más robusto ante el error, reflejando tan solo un ancho de banda estrecho que proviene fielmente de cambios en temperatura, deformaciones y propiedades físicas según parámetros (en especial periodicidad) del grating en la fibra, relativas a la resina. Los parámetros que pueden ser medidos mediante una fibra óptica bragg grating, son temperatura vibración, presión, y aceleración, según [40].

Dentro de los métodos foto-químicos, se encuentran los que están basados en la emisión de energía fluorescente. Se basan en un material mezclado con la matriz líquida del composite, el cual se convierte en marcador fluorescente cuya intensidad o desprendimiento de fotones incrementa por la acción de un rayo de luz-laser de energía constante a través de la fibra óptica, en una pieza en proceso de polimerización. Además mediante este método se pueden detectar cambios reológicos y químicos [40], como son los cambios de viscosidad y la polimerización, respectivamente. Han sido utilizados, sensores de onda evanescente para inspeccionar el llenado de la cavidad de un molde

(va marcando fluorescencia longitudinal como avanza el frente de flujo), según referencia [98], y la evolución de la polimerización de la resina termoestable, según [99].

Sin embargo, los sensores basados en fibra óptica, en general no tienen la capacidad de evaluar el grado de curado localmente, pues la detección arroja un valor global, relativo bien a una longitud o a un pequeño trozo en interacción con la matriz. No obstante, esta opción es atractiva en los procesos de LCM clásicos, tales como RTM, donde el perfil de curado varía a través de la pieza en consolidación en cualquier momento [64]; esto último, ante la imposibilidad de usar sensores no-intrusivos (por el contra molde rígido). En general, los sensores de fibra óptica son sensores intrusivos y se mencionan regularmente en la literatura para la detección de eventos termoquímicos, y termomecánicos. Según varios autores, para controlar el curado de piezas de matriz polimérica mediante este tipo de sensores, coinciden en el aprovechamiento de su señal resultante, acoplándola a sistemas expertos, que permitan relacionar ya sea, la fluorescencia molecular de la resina, y/o su viscosidad con el grado de curado [99], [100], [101], [102].

En [90], hacen una revisión sobre sensores de fibra óptica como sensores de presencia/ausencia de flujo, para monitorización del flujo de resina en procesos de llenado de moldes asistidos por vacío. Reportan tres modos de detección del flujo de resina. El primero, mediante fibra óptica desnuda (por cambios en la transmisión de la intensidad del haz de luz justo cuando pasa por la pequeña longitud de la fibra óptica, preparada). El segundo modo, mediante fibra bragg grating como sensor-de-flujo, embebido en la cavidad (por variación en el desplazamiento de la longitud de onda con el tiempo cuando detecta resina). Y el tercer y último modo, mediante fibra bragg grating como sensor de flujo sin empotramiento del FBG, el cual favorece la multi-localización de sensores de fibra óptica dentro del molde usando tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing). La tecnología WDM permite múltiples OFBG en una sola fibra a diferentes longitudes de onda. Sin embargo, reportan en [3] la incapacidad de monitorizar problemas de impregnación mediante fibra óptica. En efecto, este tipo de sensor puede estimar la posición del frente de la resina durante el llenado del molde, en función de la proporción superficial del sensor cubierta por el fluido-polímero-líquido. No obstante, está restringida a una medida estrictamente local y direccional a la progresión del frente de resina [98].

Las fibras ópticas tienen dimensiones similares a los hilos de fibra típicamente utilizados en la fabricación de refuerzos de fibra. Por tanto, este tipo de sensores

intrusivos no debería perturbar el flujo del polímero en la cavidad [98], significativamente. De hecho, se pueden dejar en el interior de piezas con la finalidad de ejecutar seguimiento de la integridad o salud de las estructuras durante su vida útil [49], [103], [104].

1.2.3.1.6 Sensores Termo-eléctricos.

Los métodos intrusivos para medir fenómenos de transferencia de calor tienen algunas desventajas: usualmente, este tipo de sensores deben ser embebidos en el molde o al menos, puestos en contacto físico sobre la superficie del molde flexible. Esta forma de uso de los sensores conductivos puede afectar la transferencia de calor en las diferentes zonas donde los sensores son colocados. Además de esto, el sensor intrusivo causa un costo adicional ya que este debe ser embebido en el molde y dispuesto en red distribuida con la finalidad de incrementar la resolución espacial. Por ejemplo, los sensores de temperatura [40], termocuplas, micro-termocuplas [93], RTD (Resistance Temperature Detectors – Detectores de Temperatura Resistivos), son sensores que pueden situarse intrusivamente, [32], entre el laminado de fibra o puestos sobre la superficie del molde asegurando su acoplamiento térmico al mismo. Los sensores que se encuentran integrados en una DSC, suelen ser conductivos.

1.2.3.1.7 Monitorización de Flujo de Calor y Temperatura.

Físicamente, el flujo de calor o flujo térmico, algunas veces también hace alusión a la densidad del flujo de calor o la intensidad o tasa de flujo de calor, que es un flujo de energía por unidad de área, por unidad de tiempo. En el sistema internacional de unidades (SI), se mide en W/m^2 .

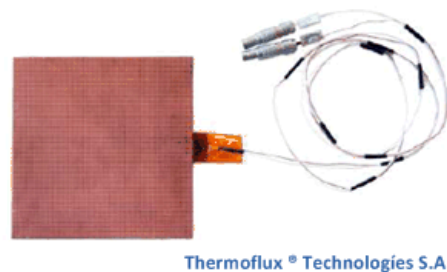
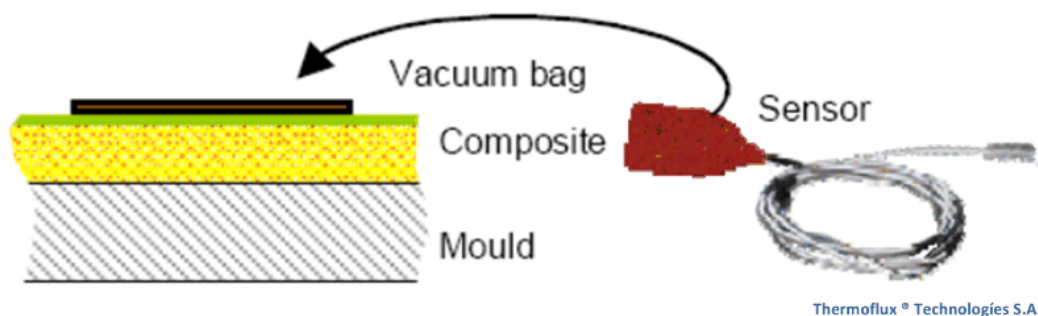


Figura 1.6. Sensor de Flujo de calor y temperatura.

El flujo de calor, tiene una dirección y una magnitud, así que es una cantidad vectorial. Para definir el flujo de calor en cierto punto del espacio, se toma el caso donde el

tamaño de una superficie está limitado y este llega a ser pequeño infinitesimalmente. La medición del flujo de calor es a menudo hecha mediante la medición de la diferencia de temperaturas sobre una pieza material (muestra), con conductividad térmica conocida.

Los sensores de flujo de calor se hacen tradicionalmente de termocuplas conectadas en serie en cada lado de una placa plana delgada. La conductividad térmica y calor específico de este tipo de sensores debe ser conocido y deben estar lo más próximos posible al objeto a medir, ya que el principio de medición es por conducción térmica. Por lo tanto, el flujo de calor viene dado por la diferencia de temperatura entre las dos caras del sensor multiplicado por un coeficiente obtenido mediante calibración instrumental del sensor. Con dicho principio físico, recientemente, una nueva gama de sensores de flujo de calor (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$), no intrusivos (Thermoflux [®] Technologies SA – ver Figura 1.6) hizo su aparición en el mercado. Estos sensores pueden ser puestos en una pared del molde, no hace falta que estén embebidos entre las fibras. Tal como lo muestra la Figura 1.7 y lo refleja la patente [105]. Este se asocia a un software que permite generar reglas para definir el inicio y final del ciclo de curado de una pieza. Son adecuados para moldes con contra-molde de pared flexible, aunque también existe un desarrollo de sensor en [106], que puede ser mecanizado en el molde rígido a fin de monitorizar el calor y la temperatura de la matriz. En [107], aparece otra patente que utiliza sensores de flujo de calor y temperatura in-situ para controlar el grado de curado de composites.



Thermoflux [®] Technologies S.A.

Figura 1.7 Colocación del sensor conductivo de flujo de calor y temperatura [105]

Este tipo de sensor de bastante sensibilidad y en los últimos años ha sido referenciado como muy prometedor para la automatización industrial en procesos LCM, ya que puede reconocer la ocurrencia de eventos específicos termo-cinéticos, tales como el paso del frente de resina en las proximidades del sensor debido a los cambios de la conductividad térmica¹⁹, la evolución de curado de la resina, el pico exotérmico de la reacción de polimerización y el final del curado de las piezas-composites, el cual puede

¹⁹ Se puede mejorar la sensibilidad, calentando la resina 1 o 2 $^{\circ}C$, previo a la inyección.

ser utilizado como criterio para empezar el desmoldeado de la pieza. Con este fin, la velocidad de la reacción de curado de la resina termoestable, $d\alpha/dt$, en un momento dado t es típicamente considerada proporcional a la variación de flujo de calor dH/dt generada por la reacción en ese mismo instante de tiempo, tal como lo afirmaron en [108]. De hecho, es el principio de medición de la técnica de caracterización para el estudio de la cinética de curado de resinas mediante DSC. Por consiguiente, la evolución general de esta reacción $\alpha(t)$ en cualquier instante de tiempo t puede ser aproximada mediante la adquisición del flujo de calor liberado \dot{H} , como se muestra en la ecuación (1.1):

$$DoC = (1/H_{Total}) * \int_{t_i}^{t_f} \dot{H} * dt \quad (1.1)$$

Donde H_{total} es la entalpía total de la reacción de curado del polímero estudiado.

Este método de medición del DoC es fundamental en la aplicación de la técnica DSC (Differential Scanning Calorimetry), para el estudio de la cinética de la reacción [109], midiendo el flujo de calor versus el tiempo bajo un programa de temperatura controlada. Dicho método recibe especial atención para la estimación del curado desde que los investigadores Perry y Lee lo publicaron en la referencia [33]. Las caracterizaciones obtenidas mediante DSC son ampliamente usadas en modelos químico reológicos del proceso de curado de resinas. En 1997 la técnica DSC no estaba muy extendida, de hecho comercialmente habían pocas unidades disponibles y el uso de sensores de flujo de calor para monitorización de curado en moldes realmente no había sido muy difundido, [110].

Los sensores de flujo de calor también han sido usados para caracterizar algunas propiedades de los materiales compuestos. Por ejemplo, se ha utilizado para caracterizar la conductividad térmica λ de ciertos materiales, [111]. Midiendo la conductividad térmica λ del refuerzo impregnado, durante el curado, se puede medir por inferencia el grado de curado, α , de la resina [112] y el módulo de elasticidad (E) [113]. Para caracterizar in situ, la contracción volumétrica de la resina termoestable como función del grado de polimerización [114], [115]. Y también para validación de un modelo cinético en un molde industrial, [32].

Algunos autores han utilizado esta tecnología con el propósito de ejecutar control, de la formación de composites bajo autoclave, [33].

1.2.3.1.8 Monitorización Térmica.

En procesos LCM se usan tradicionalmente sensores térmicos. Son situados habitualmente donde define el experto. La literatura sobre monitorización de composites, referencia el uso de termo-cuplas en [19], [93], [116], termistores, termocuplas IR y pintura cromática. Particularmente, se usan para monitorizar la temperatura del equipamiento, del molde, de la resina, del laboratorio, entre otros. Así mismo, son habituales para seguir los cambios térmicos debidos a la reacción exotérmica de la etapa de curado. Aunque en la etapa de llenado, al generar diferencias de temperatura entre el molde y la inyección de la matriz termoestable, pueden llegar a detectar discretamente el frente de flujo, siempre dependiente de la distribución de los sensores sobre el molde. En esta tesis se abordan de manera tangencial, a pesar de haber sido instrumental en multitud de trabajos científicos.

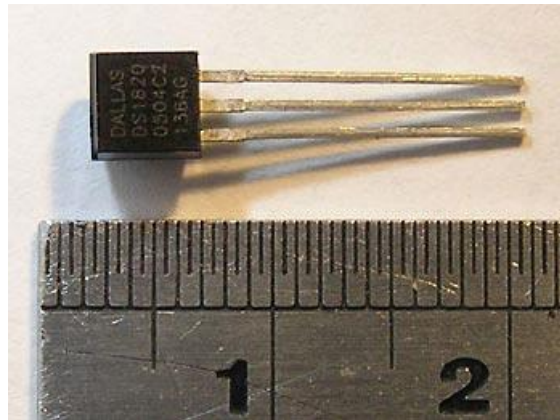


Figura 1.8 Sensor de Temperatura DS18S20, tecnología 1-wire²⁰

Para las mediciones de temperatura local que se realizan en los tests experimentales de esta tesis, se desarrolló un sistema de adquisición personalizado de temperatura en red, basado en la tecnología de alta precisión, 1-Wire Digital Thermometer, cuya base tecnológica son el encapsulado DS18S20, de la casa Maxim Integrated® [117], ver Figura 1.8. Su desarrollo fue inspirado según los consejos técnicos de la compañía logic IO®, ya que el sensor inteligente puede ser conectado directamente al autómeta tipo RTCU. Para ver más detalles del desarrollo, ver las siguientes referencias [118], [119].

1.2.3.2 Fundamentos y Capacidades de las Técnicas de Monitorización usando Tecnologías de Visión Artificial.

²⁰ <http://martybugs.net/electronics/tempsensor/>

La monitorización y metrología basada en VA²¹, y los dispositivos asociados a dichos propósitos, en particular, son tecnologías que se basan en la información que hay en una escena. Dicha información es adquirida mediante diversas clases de sensores y/o instrumentación de captura, dependiente de la banda de espectro electromagnético, a detectar. Esta combinación tecnológica de dispositivos y procesamiento de señal-información, es hoy día ampliamente utilizada en la industria para la inspección de calidad y en multitud de aplicaciones, tales como: cámaras de vigilancia, webcams, robótica, etc., [120].

La literatura reporta algunas razones por las que esta clase de tecnología de detección no está tan extendida en los laboratorios, ni en las industrias, tales como, la transparencia del contra molde o las limitaciones en la accesibilidad del campo de visión de la cámara, ante geometrías complejas. Hasta ahora, esto ha representado una dificultad para el uso de cámaras digitales. Sin embargo, actualmente el uso de sistemas de visión artificial en procesos LCM-RIFT, muestra una tendencia de crecimiento. Es significativo, el creciente número de aplicaciones que aparecen publicadas en la literatura técnica y científica. Se puede constatar dicha tendencia en los siguientes sub-apartados.

1.2.3.2.1 Sensores Foto-eléctricos Disponibles para la Generación de Imágenes Bi y Tridimensionales, (2-3D).

Las cámaras a usar en el desarrollo de técnicas de visión artificial, son sensibles a alguna banda de frecuencias o de longitudes de onda, suscritas dentro del espectro electromagnético que enseña la Figura 1.9.

Para adquirir imágenes fuera del rango del espectro visible, existen otra clase de cámaras, las cuales permiten ver cosas que el ojo humano no puede ver. En mencionado impedimento radica hoy día, principalmente, la utilidad de cámaras térmicas y cámaras multiespectrales.

²¹ VA – *Visión Artificial*

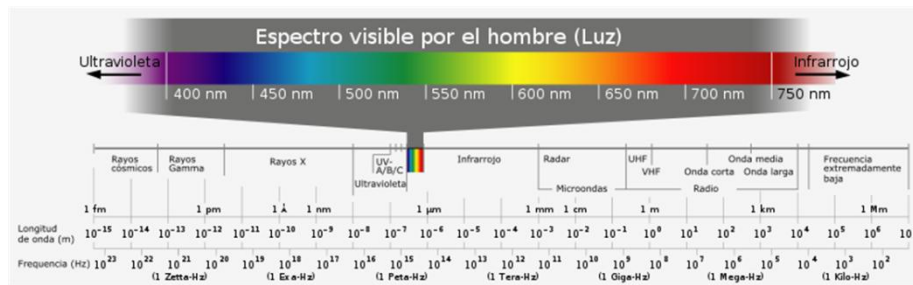


Figura 1.9. Clasificación de la longitud de onda, [121].

En esta tesis, los estudios desarrollados se basan en cámaras para la adquisición de imágenes en el espectro visible y en la región del infrarrojo para imágenes térmicas o de grandes-longitudes de onda (LWIR²²). Sin embargo, en esta revisión se hace alusión también, a las tecnologías multispectrales, ya que engloban todo el espectro de inspección.

1.2.3.2.1.1 Cámaras Multispectrales.

En años recientes, los sistemas de cámaras multispectrales han sido madurados desde instrumentos científicos a aplicaciones industriales, [122]. Las cámaras multispectrales capturan imágenes de la escena a varias bandas de frecuencias o longitudes de onda específicas, simultáneamente, a lo largo del espectro electromagnético. Dichas longitudes de onda pueden ser separadas por filtros o por el uso de instrumentos que son sensitivos a bandas o longitudes de onda especificadas, en particular. Pudiendo incluso personalizar adquisiciones de frecuencias desde el ultravioleta, visible y más allá del visible, tal como el infrarrojo, ver Figura 1.9. Dichas imágenes multispectrales pueden permitir la extracción de información adicional e interesante, por ejemplo en aplicaciones que requieren la detección de colores rojos, verdes y azules. Estos métodos fueron desarrollados originalmente para imágenes del espacio.

Las imágenes multispectrales son la principal clase de imágenes adquiridas por radiómetros de monitorización remota (RS). Al dividir el espectro en muchas bandas, multi-espectral es lo opuesto a pancromático. Este último graba integralmente la intensidad total de la radiación que cae sobre cada pixel. Usualmente, los satélites poseen tres o más radiómetros. Cada uno adquiere una imagen digital, en una pequeña banda del espectro visible, que van desde $0,7\mu\text{m}$ a $0,4\mu\text{m}$, llamada región roja-verde-azul (RGB), y va hacia longitudes de onda infrarrojas de $0,7\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ o más, clasificados como infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR), e infrarrojo lejano

²² Long-Wavelength InfraRed - LWIR

(FIR) o térmico. Existen una amplia gama de cámaras y modelos que cubren todo el espectro de interés, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo de onda larga ($0,33\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$). Por lo que su alto grado de personalización es una ventaja asociada en procesamiento de imágenes. Estas cámaras generan una imagen multi-espectral, pudiendo resolver aplicaciones colorimétricas tanto en aplicaciones industriales como científicas. En este sentido, comparando con los sistemas de imágenes basados en filtros, las cámaras de espectro configurable proporcionan alta resolución espacial y espectral, selección flexible de las longitudes de onda por software y una amplia cobertura espectral desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por el espectro visible. Asimismo, la ventaja operativa de un sistema hiper-espectral sobre los sistemas convencionales de visión térmica o intensificada, es la capacidad muy superior de resolución espectral que permite al usuario un mejor y más rápido reconocimiento de formas. Las imágenes hiper-espectrales, también conocidas como de monitorización química, proporcionan a investigadores oportunidades únicas para llevar a cabo análisis espectrales en vuelo y/o estacionarios, [123].

Las áreas de aplicación para las cámaras hiper-espectrales son muy numerosas, variando desde la creación en laboratorio de bibliotecas de imágenes hiper-espectrales en distintos campos de investigación, hasta la teledetección [124], calidad y seguridad alimentaria [125], defensa, seguridad perimetral o fronteriza, evaluación y gestión de amenazas, localización y rescate [126], o minería. Para saber más sobre sistemas multiespectrales, se sugiere la referencia [122].

1.2.3.2.1.2 Cámaras de Espectro Visible.

Las cámaras habitualmente destinadas a aplicaciones de visión artificial hasta ahora, habían sido las cámaras que trabajan en lo que se conoce como el espectro visible (ver Figura 1.9). En otras palabras, ven lo que el ojo humano sería capaz de ver. Esto es debido a que los sensores alojados en el CCD son sensibles a las longitudes de onda visibles por el hombre. En particular, el espectro visible está situado en el rango de los $450\text{-}750\text{ nm}$ ($0,45\text{-}0,75\mu\text{m}$).

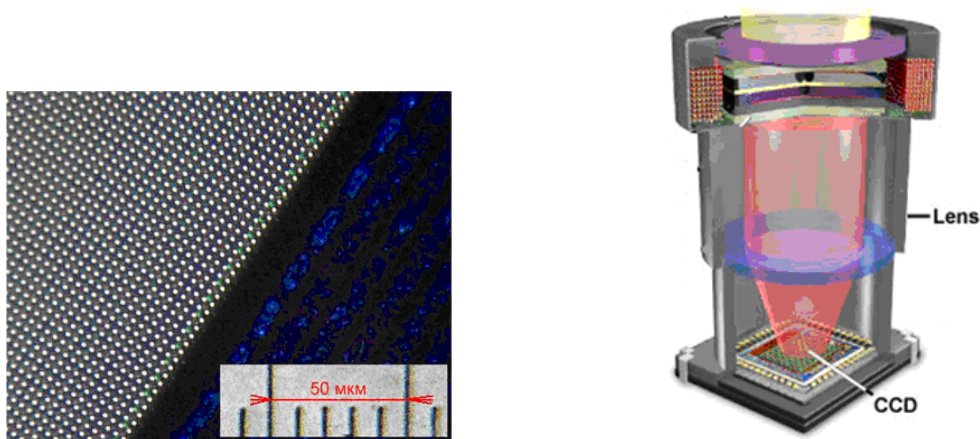
Las cámaras en particular son dispositivos que muestrean la cantidad de luz que hay en una escena. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en la industria para la inspección de calidad, así como en multitud de aplicaciones, cámaras de vigilancia, Web-cams, robótica, etc., [120]. Las cámaras contienen un chip compuesto por una matriz de sensores lumínicos que utilizan la tecnología de semiconductores. La matriz aglutinadora de estos sensores es conocida como CCD (Charge Coupled Device), como

en la Figura 1.10 (Izq.). En la cámara, la luz entra a través de una lente u óptica donde el CCD actúa como detector lumínico, ver Figura 1.10 (derecha).

El conjunto CCD y lente, realiza una discretización de la escena, Ω , donde el valor analógico obtenido en cada uno de ellos corresponde a la cantidad de luz detectada en la escena, Ω_p , es decir:

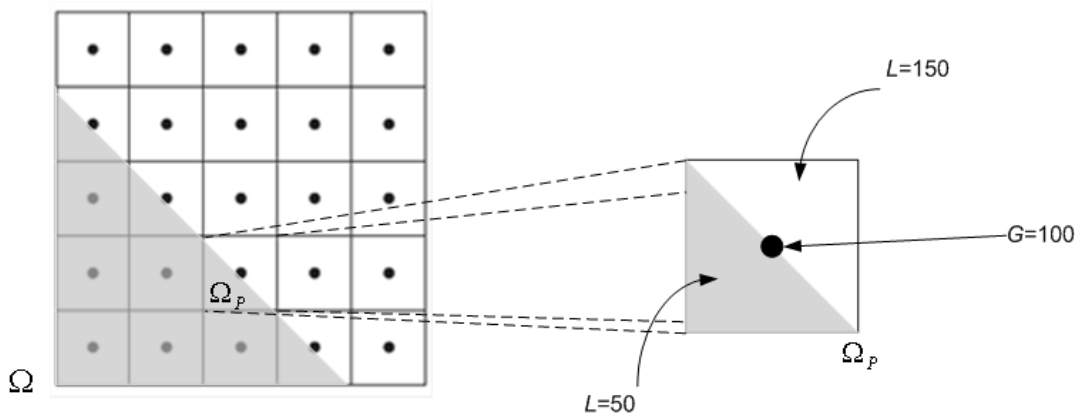
$$G = \int_{\Omega_p} L \tag{1.2}$$

Siendo L , la cantidad de luz alojada en la región Ω_p , y G , un valor analógico proporcional a ese nivel de iluminación. Ese valor analógico es digitalizado, generalmente en las cámaras B/N entre el intervalo [0...255], donde, la matriz de niveles de grises resultante se envía al PC quedando lista para su procesamiento.



Ref. [6]

Figura 1.10. CCD (Charge Coupled Device).



Ref. [6]

Figura 1.11. Región muestreada en la imagen

Si el sistema de visión esta muestreando objetos 2D, este puede ser medido simplemente mediante los parámetros de la cámara, colocando esta en paralelo, como en la Figura 1.11. En el caso de que la cámara requiera muestrear escenas 3D, se hace necesario el uso de dispositivos adicionales que nos permitan calibrar la zona muestreada por cada píxel sobre la escena. Para este propósito existen numerosas técnicas, a combinar con la cámara como por ejemplo, luz estructurada, mediante láser, o utilizando patrones conocidos colocados en la escena, [6].

1.2.3.2.1.3 Cámaras de Espectro infrarrojo (IR) - Térmicas

La termografía infrarroja es un tipo de tecnología que permite generar imágenes estáticas o dinámicas de los fenómenos de transferencia de calor presentes en la escena bajo estudio mediante cámaras dotadas con sensores capaces de captar señales del espectro infrarrojo, particularmente micro-bolómetros²³. De esta manera, el elemento activo en una FPA²⁴, es un resistor con una capacidad térmica muy pequeña y un gran coeficiente térmico de resistencia (TCR-Temperatura Coefficient of Resistance), y por tanto, un cambio rápido y significativo de la resistencia se evidencia cuando el detector es calentado por alguna radiación incidente, [120]. Las FPA's basadas en micro-bolómetros dejan atrás FPAs conformadas por detectores basados en otros principios, por ejemplo ferroeléctricos y piroeléctricos, especialmente debido a la necesidad de refrigeración y dificultades de aplicabilidad en ambientes con temperaturas elevadas. Para conocer más sobre esta tecnología de FPA's y el comportamiento de sus elementos, se sugiere revisar la referencia [120].

Esta potente tecnología ofrece la capacidad de medir calor y temperatura, incluso en escenas completamente oscuras, lo cual permite ver más allá de lo que podemos ver, humanamente. Para hacerse una idea rápida sobre algunas aplicaciones prácticas y sencillas acerca de dónde y porqué ejecutar mediciones infrarrojas mediante cámaras térmicas, se sugiere revisar el artículo [127]. Si lo que se quiere es poner a prueba la termografía infrarroja, buscando acometer nuevos retos, se sugiere como punto de partida las referencias [2], [128] y [129]. En este sentido, la literatura sobre aplicaciones y fundamentos sobre termografía va en aumento en los últimos años, debido a su gran utilidad y aplicabilidad.

Como se mencionó anteriormente, las cámaras de espectro infrarrojo están conformadas por sensores diferentes a los sensores que se usan en cámaras de espectro visible. No

²³ Un micro-bolómetro es un detector infrarrojo-IR-termistor dentro de un FPA

²⁴ FPA- Focal Plane Array (Matriz del Plano Focal).

obstante, las FPA's, son matrices de sensores térmicos que generan imágenes térmicas compuestas de píxeles. Así pues, a la hora de obtener una discretización del espacio mediante estas cámaras, o analizar las imágenes, se pueden utilizar la mayoría de las mismas metodologías indicadas para cámaras en el espectro visible, como se podrá constatar en el desarrollo de esta tesis.

En termografía se aprovecha la propiedad que tienen todos los materiales de absorber o emitir ondas electromagnéticas o fotones continuamente, incrementando o disminuyendo sus niveles de energía molecular. La intensidad y las longitudes de onda de emisión de las superficies de los cuerpos dependen del mapa de temperatura absoluta del material, la cual es capturada por las actuales FPA's. Generalmente, la transferencia de calor radiada por una superficie es proporcional a la diferencia en temperatura elevada a la cuarta potencia, [130]. Los detectores térmicos convierten la radiación incidente, en valores de temperatura. Por ello, es evidente la ventaja de los métodos de radiación térmica, ya que no tienen contacto con el objeto a medir. Además, todas las superficies emiten radiación con una distribución de intensidad y de longitudes de onda, que pueden ser relacionadas con las temperaturas de la superficie. El advenimiento de radiómetros infrarrojos de alta-velocidad ha hecho inspeccionar campos completos de temperaturas, para enfoques dinámicos o estáticos, para la determinación de la distribución del flujo de calor [131].

Sin embargo, uno de los retos que lleva consigo, las técnicas termográficas, es la frecuente dependencia del conocimiento de las propiedades de radiación térmica de la superficie bajo inspección. Dichas propiedades han sido sujeto de mucho estudio, para múltiples materiales. En especial, la emisividad de muchos materiales aparece tabulada en la referencia, [132]. En la práctica las propiedades radiativas de una superficie pueden cambiar con el tiempo. Un método que es independiente del conocimiento de la emisividad de la superficie es la termometría láser, libre de emisividad, [133]. En esta técnica dos láseres de alta potencia operan y modulan a diferentes frecuencias, estos son usados para irradiar una superficie. Las temperaturas pueden ser determinadas desde la ratio de la radiancia térmica, [134]. Sin embargo, a nivel industrial no aparece evidencia de que se esté usando masivamente. De hecho, a nivel comercial, las compañías continúan ofreciendo termografía dependiente de la emisividad.

La monitorización de la temperatura y de los mecanismos de transferencia de calor en las piezas bajo procesamientos LCM, juega un papel fundamental en la calidad final de la pieza. No solo es un parámetro a controlar en el ambiente, sino que además, la matriz termoestable varía su viscosidad a la vez que avanza la polimerización de la pieza,

mostrando una fuerte dependencia con la temperatura. Este fenómeno ha sido bastante estudiado mediante mediciones locales, haciendo uso de sensores cero-dimensionales.

1.2.3.2.1.4 Escáner 3D – Imágenes Tridimensionales.

Hoy en día, la adquisición y procesamiento de imágenes 3D, parece estar alcanzando un desarrollo de largo alcance, comparativamente a tiempos recientes. Las medidas ópticas sin contacto, de forma rápida tienen una importancia significativa en la producción industrial, incluida la inspección de las tolerancias (p. ej. espesores) y la integridad (piezas), la visión de un robot en el montaje automático, la inspección de superficies e ingeniería inversa. Son igualmente importantes para la vigilancia de las áreas protegidas, el reconocimiento y la navegación de objetos 3D. Las mediciones tridimensionales de forma óptica, entregan la geometría absoluta 3D de los objetos, que son en gran medida independientes de la reflectividad de la superficie del mismo, de la distancia a los objetos desde el sensor, y de las condiciones de iluminación. De esta manera, los sensores ópticos 3D pueden entregar las dimensiones de un objeto en escala real, las cuales son de rotación, traslación, con iluminación-invariante, [135].

No hay duda, de que hay un esfuerzo mucho mayor en visión 3D en comparación con la visión 2D convencional. Aunque, en imagen proyectiva estándar, por ejemplo, por medio de cámaras CCD, la información de profundidad a partir de escenas 3D se pierde, un observador humano no pierde la interpretación 3D, como en televisión y en cine. Por lo general, el observador no tiene dificultad en el reconocimiento de las escenas 3D proyectadas en interacción con él. Se hace evidente que la percepción humana 3D es como un sistema de aprendizaje que depende en gran medida de un conocimiento a priori, y es capaz de explotar, por ejemplo, la “estructura desde el movimiento” y la “forma desde la sombra”. En una forma óptima, la percepción de profundidad humana está soportada por las dos facilidades 3D del sistema visual: por estereovisión y por la adaptación de enfoque-automático. En el pasado, la falta de conocimiento sobre el sistema visual humano y su potencial natural pudo haber obstaculizado el desarrollo y uso de sistemas de medición ópticos 3D.

El progreso de la automatización industrial y la demanda creciente para la calidad del producto, conducen a mediciones 3D de objetos, más rápidas, exactas y sin contacto. Las técnicas de imagen tridimensional, básicamente pueden adquirir tres tipos de radiación para la realización de mediciones remotas del objeto: Micro-ondas ($\lambda=3-30\text{mm}$, esto es, 10-100GHz), ondas de luz ($\lambda=0,5-1\mu\text{m}$, esto es, 300-600THz) y ultrasonidos ($\lambda=0,1-1\text{mm}$, esto es, 0,3-3MHz). La información adquirida puede ser

procesada para detectar la profundidad mediante las siguientes técnicas: por triangulación²⁵, mediante la medición del ángulo geométrico; por interferometría mediante la medición del tiempo de vuelo; y finalmente, por tiempo de vuelo mediante medición de la modulación óptica del tiempo de vuelo. La técnica de reconstrucción 3D, usada en esta tesis es por triangulación activa, mediante laser y cámara, en espectro de luz visible.

Sin embargo, es una tecnología que continua teniendo retos importantes, pues enfrenta dificultades tales como, poco conocimiento de sus características y limitaciones. Además de mantener problemas, para los que se esperan nuevas propuestas de solución. Estos son falta de rapidez y precisión en la adquisición del mapa de profundidad para volúmenes de gran envergadura, en ambientes naturales. Adicionalmente, mediante termografía los investigadores intentan aproximarse a reconstrucciones tridimensionales que asocien temperatura y volumen, tal como en [136]. También en [137], se intentan mejorar las mediciones de profundidad de campo fusionando múltiples adquisiciones con ángulos conocidos respecto del objeto.

En el anexo XIII más adelante, se puede ampliar la información sobre la utilidad de escáneres 3D, para la discretización y metrologías 3D, en moldes 2.5D.

1.2.3.2.2 Capacidades Reportadas de las Técnicas de VA en la Monitorización de Parámetros-Clave de Proceso durante las Etapas de Fabricación.

1.2.3.2.2.1 Verificación y caracterización de materiales de fabricación.

En [138] miden algunas características de las nano-fibras tales como, distribución de su diámetro o distribución del poro inter-fibra, usando un sistema basado en visión artificial. Dichas mediciones están desacopladas del proceso de fabricación.

En general existen métodos de caracterización estandarizados para los tejidos, para las matrices poliméricas (resinas), los núcleos y todos aquellos materiales que puedan participar en una estructura composite. Sin embargo, los métodos llevados a cabo actualmente y que integran procedimientos de visión artificial no están tan extendidos

²⁵ Activa o pasiva. Es activa cuando se utiliza un laser para realizar la triangulación de referencia. Es pasiva cuando se utiliza estereovisión, la cual se basa en la extracción de información 3D desde la posición relativa de objetos o pixeles en las imágenes.

como los métodos tradicionales de caracterización de materiales, mencionados en la sección 1.2.1.1 más atrás.

1.2.3.2.2.2 Diseño.

Los sistemas basados en VA pueden ayudar muchísimo, para hacer más efectivas las soluciones virtuales, es decir, modelos más cercanos y conectados a la realidad experimental, en contraste con lo que publican en [139], donde resaltan los métodos de medición de campo-completo (2D) para la validación de modelos, la verificación de condiciones de contorno y las asunciones, como identificación de parámetros del diseño, entre otros. Por ejemplo, en la referencia [17], se puede observar como a través de tecnologías de VA, especialmente mediante un escáner 3D se obtiene la malla de discretización del molde a procesar o modelo 3D del mismo. Con dicho modelo y el método publicado en [140], se pueden diseñar los canales óptimos de entrada de resina a lo largo de la pieza a procesar, garantizando homogeneidad del frente de flujo al venteo.

1.2.3.2.2.3 Preparación del procesamiento de la pieza.

En la referencia [141] miden parámetros asociados a la anisotropía del refuerzo, por ejemplo, el ángulo de orientación de la fibra en la etapa de preformado de la pieza con láminas de fibra sobre el molde; en su conclusión resaltan el papel de la metrología a fin de aumentar la calidad en la fijación de los refuerzos reduciendo su variación, lo cual aporta medios para la automatización de esta etapa usando sistemas de visión artificial. En la referencia [142], presentan un método basado en múltiples cámaras térmicas para inspeccionar-detectar en tiempo real, defectos en general que afectan la calidad del laminado de la pieza, tales como re-bordes, solapamientos y empalmes incorrectos, arrugas, así como malas adherencias e inclusiones o cualquier otro tipo de anomalías en la fijación de las láminas durante el preformado de la pieza, generando así la activación de alarmas u otras señales de control. También, la referencia [17], publica el funcionamiento descriptivo preliminar del AVP y sus contribuciones en la preparación de la fabricación: así, un escáner láser (cámara de espectro visible y un laser) mallan el molde (se obtiene la malla). Mediante el uso de esta malla, una herramienta de optimización propuesta en uno de nuestros trabajos anteriores, se usa como referencia para calcular los canales de distribución óptimos, [140], [143], [144], con la finalidad de minimizar el tiempo de llenado de la pieza. Para trasladar el resultado al molde, mediante proyección de canales óptimos vía video-proyector y técnicas de VA se asiste a los operarios la fijación-colocación óptima de los canales en el molde real para

ayudarles en esta tarea. Existen también en el mercado, sistemas para proyección láser sobre superficies de trabajo, que permiten trasladar el posicionamiento y/o guías de corte para el laminado de piezas de gran envergadura mediante proyección de patrones de corte, el laminado diseñado para cada pieza, [145]. Para ampliar información, ver su página web: <http://www.lap-laser.com>.

1.2.3.2.2.4 Llenado de Molde.

Mediante la monitorización y metrología basada en visión artificial de espectro visible durante la inyección del molde, se pueden monitorizar-medir múltiples parámetros. Por ejemplo, en moldes experimentales mediante detección por VA se pueden lograr llenados con frentes de flujo homogéneos, a la vez que se eliminan agrupamientos de aire, porosidades o zonas secas, mediante la actuación de un brazo o estructuras robóticas controladas por ordenador, las cuales aplican calor localmente en la zona de interés para modificar la viscosidad (μ) como en [53], o modifican la permeabilidad en [146] y [147]. En [148], una reciente publicación, consiguen re-direccionar el frente de flujo con un sistema neumático que levanta o presiona el contra-molde flexible así modifican la permeabilidad localmente; la monitorización es mediante visión artificial. Otros investigadores también han informado de métodos basados en visión artificial para re-direccionar el movimiento del frente de flujo de resina utilizando apertura y cierre de venteos cercanos al frente de flujo [59], [149] y [61]. En [19], miden las variaciones de espesor de un punto en el tiempo, por ejemplo, en el centro de una pieza rectangular mediante VA. Este último trabajo contrasta con el propuesto en [60] donde, dos cámaras previamente calibradas se usan para medir las variaciones de espesor superficial, producidas en los procesos VI debidos a los cambios de presión local. En [150] desarrollan una técnica para la estimación de la permeabilidad local usando una preforma isotrópica. Ante la variación de la permeabilidad en función del laminado y el proceso de fabricación a usar, la permeabilidad también es estimada simultáneamente con el experimento, en la referencia [151]; para ello usan VA y conectan con el software de simulación LIMS [43]. Los artículos [8] y [152], exponen técnicas experimentales basadas en VA para la estimación de la longitud crítica de impregnación (L_s) como indicador para el control de la velocidad del frente de flujo óptimo, a fin de reducir la porosidad bi-modal que plantean las referencias [3] y [45], particularmente. En este sentido en el trabajo [153], publican un método basado en análisis de imágenes visibles a micro-escala (μ PIV – Micro Particle Image Velocimetry), para investigar campos de velocidad en la vecindad de un frente de flujo. Adicionalmente, en [8], se ofrece un método de medición online durante la fabricación, de las componentes principales de la

elipse, que se forma cuando un fluido trasiega láminas de fibra anisotrópica: eje mayor (a), eje menor (b) y la orientación (θ_c) de la elipse, la cual puede determinar una medición adelantada de la dirección de las fibras, tan apreciada en la inspección de calidad del componente final. En el artículo [60], proponen un método para la estimación dinámica de las variaciones en la fracción volumétrica de fibra y las variaciones en la permeabilidad de todas las zonas de la pieza, partiendo de la medición del espesor de la pieza durante el llenado y el post-llenado, mediante la técnica de estéreo-fotogrametría. En la referencia [154], proponen un método para medir las variaciones de posición del frente de flujo. También, suelen medir el tiempo de llegada del frente de flujo a puntos de referencia sobre el molde, como en la referencia [155], quienes también estudian la saturación del frente de flujo mediante el cálculo de un índice de crecimiento de área penetrada por la resina, que no es más que la zona de impregnación, comentada anteriormente.

En estos trabajos [59], [61], [60], la cámara se usa como detector de presencia, tal como una matriz de sensores, donde la variable vigilada es la presencia de flujo. Finalmente, en [61] establecen una correspondencia aproximada entre los píxeles de la cámara y los nodos de la malla utilizada en la simulación on-line, “Proxy simulator”, del sistema de control, estableciendo antecedente en la relación entre simulación y realidad. También, es posible monitorizar la medida de la temperatura del molde durante el procesamiento, mediante termografía, tal como lo publican las siguientes referencias [13], [17]..

1.2.3.2.2.5 Curado y Post-curado.

Se pretende recoger aquí, una revisión tan solo de las referencias que aplican monitorización no-intrusiva y/o enfoques basados en técnicas de VA, para monitorizar, medir el grado de curado.

De esta manera, en la referencia [94], proponen un método para correlacionar el grado de polimerización de una resina con las variaciones que sufre el índice de refracción de la misma, evidenciándose esto cuando un haz de luz generado desde un laser refleja a un punto diferente del sensor de una cámara digital. Para monitorizar el ángulo utilizan una cámara de espectro visible. Este método ha sido probado para muestras de resinas, más no para piezas-composites.

La referencia [156], propone un nuevo método para visualizar la composición química y la cinética de reacción de algunas gotas de resina mediante la técnica denominada, “imagen multi-espectral en NIR (Near InfraRed – Infrarrojo próximo)”, sin embargo no

plantean la aplicación de su método a piezas composite. Este trabajo valida un espectrómetro de imagen NIR con todas las ventajas de un espectrómetro convencional. En el artículo [157], demuestran para un proceso exotérmico, tal como es el curado de resinas termo-estables, que el uso de un radiómetro de banda-singular para determinar con veracidad la temperatura puede llevar a resultados incorrectos, debido a que la resina en el proceso de curado, cambia de emisividad, por lo que proponen un método basado en radiometría de cuatro-bandas, que permite conocer los cambios en está durante el proceso de curado y por tanto pueden llegar a mediciones veraces de temperatura. En [158], monitorizan reacciones cinéticas de foto-polimerización inducida mediante pirómetro óptico y validan las mediciones realizadas usando comparación con FT-RTIR²⁶, la cual es una espectroscopia de varias bandas. Sin embargo, ejecutan experimentos para muestras pequeñas, limitadas a las dimensiones del sensor o sensores. En [159], tan solo comparan espectrometría de infrarrojo cercano (detectando con transformada de Fourier señales de rango espectral NIR) con mediciones basadas en DSC, para estudiar el curado de resinas, sin embargo, es un estudio que involucra muestras pequeñas, no estructuras-composites. En la patente [160], alcanzan un desarrollo optimizado para monitorizar la energía que lanzan al ambiente las estructuras composites, basado en cámaras IR. En cualquier caso no llegan a publicar los métodos, ni algoritmos utilizados.

En [62], presentan una técnica en base a ultrasonidos acoplados al aire, que resulta concordar con resultados obtenidos mediante ultrasonidos acoplados con algún tipo de agente (agua, algún gel, etc.), para monitorizar vía no-intrusiva el proceso de curado de matrices poliméricas; en este miden satisfactoriamente la viscosidad de la muestra logrando monitorizar, por ejemplo, cambios en las propiedades viscoelásticas de la resina, como el tiempo de gel (gelificación) o la vitrificación. En [161], desarrollan un sistema basado en ultrasonidos, también para monitorizar el curado de parches de reparación en aviones, obteniendo resultados cualitativos que permite crear reglas del tipo: inicio de curado, finalización del curado, pero poco más; la utilidad del sistema es validada mediante pruebas mecánicas a-posteriori. Hay otros trabajos que usan ultrasonidos, por ejemplo [162], que muestran la existencia de una tendencia, que sin embargo después de algunos años no se ha visto reflejada en uso masivo, en la industria. Además, la técnica por ultrasonidos también ha sido combinada mediante el uso de sensores embebidos como en el caso de [162], [163]. En [164], construyen un sensor basado en reflexiones infrarrojas atenuadas mediante un prisma puesto en la pared superior de una estructura composite en proceso de curado, donde un algoritmo basado

²⁶ *Fourier Transform - Real Time Infrared Spectroscopy. Transformada de Fourier de Espectroscopia Infrarroja en Tiempo Real. La técnica RTIR aparece referenciada en [158]*

en transformada de Fourier, detecta los rangos espectrales del infrarrojo medio (MIR-Mid InfraRed) y los convierte en un índice de grado de curado. Dichas mediciones son usadas en un controlador de curado con retroalimentación asistida por un modelo, el cual determina la temperatura óptima de procesamiento.

1.2.3.2.2.6 Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización Mecánica de la Estructura.

Particularmente, una aplicación termográfica multidisciplinaria fue propuesta en [165], ellos combinaron termografía de cristal líquido²⁷, caracterización de materiales y mecánica de fracturas para desarrollar un kit de NDT para testear botes de recreo fabricados de composite. La ventaja de este sistema, es que se basa principalmente en luz visible, de hecho, las cámaras usadas son de espectro visible, y por tanto la detección es independiente de la emisividad de la superficie, lo que se traduce en menor coste directamente [166], pues las cámaras termográficas son mucho más caras que las de espectro visible.

La evaluación no-destructiva NDT, de pequeñas muestras de estructura-composite mediante termografía infrarroja, pueden ser ejecutadas de dos maneras: a través de la termografía pulsada, o la termografía pulsada-modulada (lock-in thermography), ambas conocidas como termografía activa. Dichas técnicas son capaces de revelar heterogeneidades en los materiales, que pueden presentarse tanto durante procesos de fabricación, como en servicio. De esta manera, la termografía pulsada-modulada, puede ser asociada a características específicas de los materiales, tales como: densidad, porosidad, dureza, difusividad térmica, etc.; también a modificaciones de las mismas, debido al envejecimiento o tratamientos especiales, de acuerdo a la referencia [167], ya que cada material puede ser asociado a un valor de ángulo de fase que puede ser asumido como un parámetro característico, del mismo. También ha sido utilizada la técnica de imagen por microscopía electrónica, con la finalidad de determinar el tamaño, la distribución y la orientación de fibras o partículas en pequeñas muestras de composites. Así como identificar y caracterizar defectos (porosidad, malas adhesiones, flexiones de fibra) en el composite. En fractografía, se usa a fin de determinar el modo de fallo en un composite completo, una matriz, o en el refuerzo. Además para obtener información acerca del grado de adhesión entre la matriz y el refuerzo, o entre las capas. [168] .

²⁷ *Los cristales líquidos termo-cromáticos (TLC) son materiales que cambian su color reflejado como una función de la temperatura cuando es iluminado por una luz blanca. Por tanto, reflejan luz visible a diferentes longitudes de onda. Ver Figura 1.5*

Después del trabajo [165], vinieron investigaciones basadas en termografía. Los trabajos [169] y [170], proponen el uso de pulsos de calentamiento a pasos, como fuente de calor y termografía como técnica de visualización-inspección para incrementar la capacidad de medición de la profundidad de defectos en piezas de composite gruesas, básicamente delaminaciones e inclusiones. En [171], utilizan μ -CT (Tomografía micro-computarizada), una tecnología emergente basada en visión artificial, que permite estudiar con muy buena resolución y fiabilidad, el composite desmoldeado, particularmente la lámina de fibra de vidrio dentro de este; así, caracterizar la estructura geométrica de los hilos del refuerzo embebido en la matriz polimérica; información de bastante interés para complementar la información de modelos de simulación. El trabajo [63], combina dos métodos de termografía activa: la termografía y la interferometría pulsada; estas, producen una nueva técnica denominada “deformografía” (comercialmente en Inglés: shearography [172]), la cual permite estudiar las propiedades térmicas y mecánicas de las piezas finales de composite, logrando mediante la fusión de ambas fuentes de datos, un tipo de inspección no-destructiva aplicable a piezas-completas reales de gran envergadura, arrojando detecciones tales como defectos a diferentes profundidades, malas adhesiones entre el núcleo de panal de abeja o espuma y la resina, impactos, poros, etc. Lo último, permite avanzar en un método de clasificación de tipos de defectos mediante técnicas de visión artificial (procesamiento de imágenes). En [173], investigan mediante termografía pulsada acoplada a un modelo de transferencia de calor, la porosidad de piezas-muestras de lino/epoxi, donde publican la siguiente tendencia: a mayor porosidad, mayor difusividad promedio, es decir, cuando incrementa la porosidad tiende a incrementar la dispersión de la difusividad térmica estimada. Para la detección de defectos también la literatura menciona la vibro-termografía o termografía pulsada mediante excitación por ultrasonidos [174], [175]; este tipo de técnicas, siempre relaciona procesamiento de imágenes y/o algún modelo referencia para la detección o estudio de los defectos típicos: grietas, malas adhesiones, o delaminaciones. En la referencia [176], concluyen que mediante la termografía pulsada se pueden detectar inclusiones, burbujas de aire, daños de impactos, adhesiones de mala calidad, y delaminaciones en estructuras de composite. Adicionalmente, mediante termografía lock-in (modulación de ondas de calor a través de la pieza) se puede suministrar información sobre el espesor de adhesivos y pinturas aplicadas, apilamiento de fibras, así como estudiar la influencia de tratamientos en la superficie del molde respecto a la adhesión. El artículo [177], resume en general algunas aplicaciones de la termografía infrarroja activa para inspección no-destructiva (NDT) hasta el año 2007, siendo utilizada especialmente para inclusiones, esto es la detección de objetos extraños (tales como trozos de film plástico dejado sobre las capas de las láminas de

fibra pre-impregnadas o sobre la superficie de la pieza), detección de distribuciones de resina anormales, medición de la porosidad, confirmación de la orientación de las capas de fibra, y detección de zonas secas. En mantenimiento, los tests incluyen detección de daños por impacto, agua atrapada, delaminaciones, y la validación de parches en reparaciones. En el artículo [178], realizan una revisión de la literatura hasta el año 2000, acerca del uso de la imagen térmica obtenida a partir de composites desmoldeados; ya en aquella época se observaba la gran ventaja que ofrece la termografía para suministrar información térmica de superficies de gran envergadura, así como la facilidad para interpretar dichos resultados. Sin embargo, comentan que a pesar de que a nivel macroscópico la termografía ya viene siendo bastante utilizada, en microscopía térmica hay todo un camino por explorar.

Paralelamente, el potencial de la termografía infrarroja para la inspección no-destructiva, ha sido reconocido desde hace muchos años. Sin embargo, no fue hasta la década pasada cuando las técnicas NDT basadas en termografía llegaron a ser populares y primordiales. Previo a eso, la termografía fue principalmente un método cualitativo adjunto a tecnologías tradicionales de NDT, o para aplicaciones de mantenimiento preventivo o predictivo. La termografía es una técnica que despierta gran interés, en especial en fabricación de composites se ha consolidado como un método de inspección no-destructivo²⁸ (NDT). Actualmente, NDT es usado en variedad de aplicaciones. La aparición y más entusiasta aceptación de técnicas termográficas para NDT, llegó desde la comunidad de composites espaciales [179], [180]. A partir de entonces, numerosas compañías han implementado el testado de pieza bajo análisis termográfico, a menudo reemplazando ultrasonidos y radiografías, para aplicaciones en fabricación o en servicio. Un interesante estado del arte sobre las técnicas NDT en composites basadas en termografía, se encuentra en la referencia [177].

En [181], la autora propone un método para estimar la orientación 3D de las fibras desde imágenes en volumen a escala de grises, obtenidas mediante micro-tomografía de rayos X, a partir de un composite basado en fibras de madera. En [182], proponen los algoritmos matemáticos que son aplicados a micro-estructuras de composite, para obtener imágenes mediante TC²⁹. En [183], también determinan la orientación de la fibra en estructuras de composite utilizando sensorización por ultrasonidos y procesamiento de señales dispersas, es decir, son las analizadas señales dispersas y no las reflejadas directamente al receptor, conformando la imagen por ordenador. En el artículo [139], el autor ofrece un vistazo general hasta 2004, acerca de las características

²⁸ NDT - Non-Destructive Testing. Test No-Destructivos.

²⁹ TC - Tomografía Computarizada.

principales de las técnicas de medición de campo-completo, es decir, técnicas de medición bi-dimensional (2D) para materiales compuestos y caracterización de estructuras, considerando parámetros tales como desplazamientos, tensiones o temperatura.

Finalmente, en [169], [176], reportan que las cámaras térmicas, o técnicas de visión infrarroja han sido empleadas para NDT (Non-Destructive Testing), ensayos no-destructivos en piezas finales a fin de testear sus propiedades mecánicas.

1.3 Técnicas de Monitorización Tradicionales versus Métodos basados en VA durante Procesos LCM-RIFT.

En procesos LCM, se pueden realizar mediciones de múltiples parámetros, tal como lo deja reflejado la amplia literatura científica existente. Sin embargo, continúa siendo bastante genérica, no especializada, no tiene en cuenta las especificidades de cada técnica de fabricación (ver Figura 1.1). La literatura refleja la existencia de técnicas de medición para múltiples variables, sin precisar tipos de procesamiento, por ejemplo: mediciones de presión y sonido, acústicas, de flujo, de velocidad, de viscosidad, de tensión superficial, temperatura, de conductividad térmica, flujo de calor, de fuerza, de tensión, de torque, de densidad de masa y peso, entre otras, han sido reportadas en manuales, [71]. En especial, los procesos RIFT favorecen o desfavorecen la implementación de ciertas técnicas de monitorización. En este sentido, realmente hay un espacio a estructurar o acoplar dentro de la literatura. Este, focaliza en las técnicas de sensorización óptimas y efectivas para cada sub-grupo de procesos (RIFT). Se puede entender que este es un conocimiento, en desarrollo. Con este fin, se realiza el resumen de algunos tipos de transducción y la utilidad o capacidad operativa de cada técnica de monitorización.

Los sensores de la Tabla 1.2 y Tabla 1.3, proporcionan al operador información necesaria sobre el progreso de diferentes variables y parámetros, tales como temperatura, flujo de calor, presión, velocidad y grado de conversión, entre otras. Mirando esas tablas, puede verse con más detalle las capacidades de monitorización que actualmente ofrecen los sensores utilizados alguna vez en procesos LCM-RIFT, a la vez que se pueden vislumbrar capacidades que no han sido exploradas, mediante el uso de nuevas técnicas de fusión de datos, [184]. Además, se puede observar que la mayoría de parámetros se miden indirectamente al proceso de cambios fenomenológicos de la micro-estructura del material (p. ej. formación de porosidad, grado final de curado, desconexión entre etapas, etc.). Esto es relevante, ya que la evolución temporal de la

micro-estructura de matriz/ fibra determina en gran medida las propiedades mecánicas de la pieza producida, [52]. En este sentido, el desarrollo de monitorización y metrología de referencia asociada a la fenomenología de procesamiento y consolidación de una pieza, es imprescindible para establecer métodos comparativos que permitan avanzar hacia metrología y monitorización de referencia, estructurada para este tipo de procesos.

Los sensores identificados que permiten ejecutar diversos métodos de monitorización durante fabricaciones LCM-RIFT, se resumen en la Tabla 1.1, Tabla 1.2 y Tabla 1.3. Presentan en especial las siguientes convenciones. Básicamente pueden tener una u otra **situación**, o ambas, respecto de la pieza-composite: ser intrusivos (I) y/ o no-intrusivos (N), como puede constatarse en la Tabla 1.1. Pueden proporcionar cuatro tipos de **inspección**: local (L), superficial (S) o volumétrica (V); en el caso de volumen la inspección aporta una medición global a través de un espesor. Requerir **contacto** físico (✓) o no (✗), con el molde o pieza en proceso. Pueden requerir algún tipo de agente de **acoplamiento** (✓) a la zona a ser monitorizada, o no (✗), a fin de ejercer un mayor contacto (como geles, adhesivos, etc.) para favorecer la transmisión de señales entre la pieza y el sensor; o que puede requerir calibración (CAL). Pueden tener la capacidad de **re-uso** (✓), es decir, re-utilización o no (✗). Su **frecuencia de muestreo** puede ser alta (A) o baja (B). La técnica de **moldeo**, puede ser abierta para procesos tradicionales (A) y/o cerrada (C) para procesos RIFT. Para ejecutar una **monitorización eficiente**, la fijación de cada método de sensorización puede ser: en red distribuida (R.D.), un mapa (MA) o Ronda. La **cantidad apropiada** de sensores a usar, define el número de sensores o detecciones por área, con la finalidad de hacer un excelente mapeo superficial para la reconstrucción de fenómenos físicos asociados a la representación bi-dimensional de la pieza.

Este número va a depender del criterio del experto y del rigor que se quiera dar a las mediciones, para alcanzar resoluciones aceptables. En este cuadro asumiremos *un sensor por cada dm^2* , como una buena resolución. El tipo de **conexión** de los sensores, pueden ser cableados (C) o inalámbricos (NC). Pueden ejecutar monitorizaciones de cierta **dimensión**, cero-dimensionales (0D) en el caso de un punto, una dimensión (1D) en el caso de una línea, dos-dimensiones (2D) en el caso de una imagen-superficial y tres-dimensiones (3D) en el caso de un volumen. El **emplazamiento** puede ser: fijación entre las láminas de fibra (IF), fijación superficial sin mecanizado de molde (SM), fijación puntual-orificio con mecanizado de molde (OM), fijación al aire en el campo de visión del molde (CV). Además, muchos de los sensores requieren de emparejamiento

con emisores, por lo que, con la finalidad de reducir costes, la capacidad de **multiplexación** (✓) o no (✗), por parte del método es muy importante.

Esto significa, usar un emisor para “estimular” varios sensores a través de la pieza en consolidación. Finalmente, pueden ofrecer una **resolución** dependiente del tipo de monitorización eficiente, por ejemplo, una red distribuida de sensores (RD) o de una o múltiples matrices de píxeles (MP), para el caso de utilización de cámaras digitales. En todas las convenciones, las cuales aparecen acompañadas de un signo de interrogación (?), significa que dicha característica puede no ofrecer los datos más fiables sobre la pieza, o que dicha configuración del método de detección puede presentar problemas de fiabilidad.

Adicionalmente, en la Tabla 1.2 y Tabla 1.3, para cada pareja método-sensor se examinan sus capacidades de detección en procesos LCM-RIFT, particularmente en las etapas de llenado y curado. En esta tesis, profundizaremos en el uso de transductores fotoeléctricos y termoeléctricos. En la Tabla 1.2 y la Tabla 1.3, se busca especialmente profundizar en la evaluación de los parámetros señalados puestos en rojo.

Tipo de Transducción		Métodos para monitorizar piezas durante procesos LCM-RIFT																						
		Técnicas de Monitorización Tradicional -TMT						Técnicas de M. Avanzadas TMVA																
SENSORES	Electro-Mecánicos			Electro-químicos			Termo-ópticos			Foto-químicos			Termo-eléctricos			Humano			Foto-eléctricos					
	Acústico < 20KHz	Ultra-sonidos >> 20KHz	LVDI	Piezo-eléctricos	Voltaje	G, R, Z	Dielectro-metros	Plintura cromática	Fluorescencia	Termocuplas	Termistores	Flujo de Calor	Operario	Camara Visible	Camara Visible + Laser	Fibra Óptica	Camara NIR	Camara MIR +prisma	Camara LWIR	Termo-cuplas IR				
Principales Características Técnicas																								
ESPECIFICACIONES																								
<i>Situación</i>	N	I/N	N	I/N	I	I/N	N?	I	I/N	I/N	N	I/N	N	N	I	N	N?	N	N	N				
<i>Inspección</i>	S	V/S/L	L	L	L	V/L	S/L	S/L	L	L	L	S/L	S	L/S	L	S	L	S	S	L				
<i>Contacto</i>	✓/x	✓/x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓/x	x	x	✓	x	✓/x	x	x	x				
<i>Acoplamiento</i>	✓/x	✓/x	✓	x	✓	✓/x	✓	✓	x	x	✓	✓?	CAL	CAL	✓	CAL	CAL	CAL	CAL	x				
<i>Re-uso</i>	✓	✓	✓	✓/x	x	✓/x	✓	x	✓/x	✓/x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓				
<i>F.Muestreo</i>	A	A	A	A	A	A	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A				
<i>Moldeo</i>	A/C	A/C	C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C	A/C				
<i>Monitor. eficiente</i>	RD	MA	RD	RD	RD	RD	MA	MA	R.D.	R.D.	R.D.	Ronda	RD	RD	RD	MA	RD	MA	RD	RD				
<i>Cantidad apropiada</i>	1s/dm ²	Scan	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	1s/dm ²	?	1s/2m ²	1s/2m ²	1s/dm ²	1s/2m ²	1s/2m ²	1s/2m ²	1s/2m ²	Scan				
<i>Conexión</i>	C	C	C	C	C	C	NC	NC	C/NC	C/NC	C/NC	NC	C	C	C	C	C	C	C	C/NC				
<i>Dimensión</i>	0.1,2D	0.1,2,3D	0D	0D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2,3D	0.1,2,3D	0.1,2,3D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D	0.1,2D				
<i>Emplazamiento</i>	IF/OM /CV	IF/OM /CV	SM	IF/OM	IF/OM	IF/OM	CV	CV	IF/OM /SM	IF/OM /SM	IF?/OM /SM	SM/CV	CV	CV	IF	CV	SM/CV	CV	CV	CV				
<i>Multiplexación</i>	✓?	✓?	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	✓?	x	x	x				
<i>Resolución Especial</i>	RD	MA	RD	RD	RD	RD	MA	MA	RD	RD	RD	RD	RD	RD	RD	MA	RD	MA	RD	RD				

© U.Pineda , 2013.

Tabla 1.1 Principales Características Técnicas de las TMT³⁰ y las TMVA³¹ en procesos LCM-RIFT.

³⁰ TMT – Técnicas de Monitorización Tradicionales.

³¹ TMVA– Técnicas de Monitorización basadas en Visión Artificial.

Métodos para monitorizar piezas durante procesos LCM-RIFT																					
Tipo de Transducción	Técnicas de Monitorización Tradicional - TMT										Técnicas de M. Avanzadas TMVA										
	Electro-Mecánicas			Electro-químicas			Termo-ópticos		Foto-químicos		Termo-eléctricos			Foto-eléctricos							
	Acústico < 20Khz	Ultrasonidos >> 20Khz	LVDI	Piezo-eléctricos	Voltaje	G. R. Z	Dielectro-metros	Pintra-cromática	Fluorescencia	Termocuplas	Termistores	Flujo de Calor	Humano	Camara Visible	Camara Visible + Laser	Fibra Optica	Camara NIR	Camara MIR +prisma	Camara LWIR	Termo-cuplas IR	
Capacidades durante la Etapa de Llenado																					
PARAMETROS																					
Posición FF(x,y)	✓?	✓?	✓	✓?	✓?	✓	✓	✓	✓?	✓	✓	✓	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Presencia FF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
t_{ff}	✓?	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Porosidad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Racetracking	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lavado	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zonas secas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
L_s	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
μ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
K (Perm)	✓?	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ΔV_{ff} , ∇V_{ff}	✓?	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V_{ff}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
θ fibra	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Δe_r , ∇e	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Caudal -Presion	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ΔP_r , ∇P	✓?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Inclusiones	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ΔT_r , ∇T	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

© U.Pineda , 2013.

Tabla 1.2 Parámetros de la etapa de llenado monitorizables mediante TMT³² y TMVA³³ en procesos LCM-RIFT.

³² TMT – Técnicas de Monitorización Tradicionales.

³³ TMVA– Técnicas de Monitorización basadas en Visión Artificial.

Métodos para monitorizar piezas durante procesos LCM-RIFT																													
Tipo de Transducción		Técnicas de Monitorización Tradicional -TMT													Técnicas de M. Avanzadas TMVA														
		Electro-Mecánicos			Piezo-electricos			Electro-químicos			Termo-ópticos			Foto-químicos			Termo-eléctricos			Foto-eléctricos									
		Acústico < 20Khz	Ultra-sonidos >> 20Khz	LVDI	Piezo-electricos			Electro-químicos			Termo-ópticos			Foto-químicos			Termo-eléctricos			Humano	Camara Visible	Camara Visible + Laser	Fibra Optica	Camara NIR	Camara MIR +prisma	Camara LWIR	Termo-cuplas	IR	
Capacidades durante la Etapa de Curado y Post-curado																													
PARAMETROS		Doppler. Además se suelen combinar con piezoelctricos embebidos o al aire.	NDT, Salud estructural, modelado 3D, etc		Funcionan en asocio a fuentes acústicas, normalmente. Pueden influir en propiedades mecánicas de la pieza			AGC (Amryal - Gel-Cure), SMART (Sensors Mounted As Roving Threds)	SMARWeave®	Post-curado y salud estructural		Se suele usar, mezclada con la resina y luego se ha de polarizar con luz laser			Al ser embebidas, pueden llegar a generar problemas mecánicos en las piezas finales			Permite evaluar los cambios de emisividad, a medida que cambia el curado				Laser + cámara. La inspección de curado se basa en los cambios que presenta el índice de refracción durante el curado. Se pueden obtener modelos 3D con esta instrumentación			Post-curado y salud estructural. Fibra Bragg grating e interferometría. Se			Contra molde transparente, salud estructural	
μ_{min}		✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Punto de Gel		✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
α_f		✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
α_n		✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$\Delta e_i, \nabla e$		✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$\Delta T_i, \nabla T$		✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$\Delta P_i, \nabla P$		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modulos elásticos		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<u>Observaciones u otras Aplicaciones</u>																													

© U.Pineda , 2013.

Tabla 1.3 Parámetros de la etapa de curado y post-curado detectables mediante TMT³⁴ y TMVA³⁵ en procesos LCM-RIFT.

³⁴ TMT – Técnicas de Monitorización Tradicionales.
³⁵ TMVA– Técnicas de Monitorización basadas en Visión Artificial.
 76

1.4 Motivaciones.

Los costes de producción en la industria de composites son un factor crítico en su competitividad, [21], especialmente debido al aumento del valor de las materias primas [3], [185].

Es un campo de interés creciente, la fabricación de grandes piezas de altas prestaciones mediante procesos LCM [19], [23], [186], [187], [188], [189], [190], [191]. Estos procesos pueden reducir significativamente el tiempo y el coste de procesamiento, en comparación con otros procesamientos implementados tradicionalmente como el uso de autoclave.

Los procesos LCM se dividen en dos. Procesos de contra-molde rígido (p. ej. RTM³⁶), rentables para piezas pequeñas y grandes tiradas. Y, en procesos RIFT³⁷ de contra-molde flexible y transparente (p. ej. VARTM³⁸, VIP³⁹, etc.) rentable para piezas de gran envergadura y pocas tiradas. A pesar de que los procesos de contra-molde flexible (bolsa de plástico) no son de reciente creación, en tiempos recientes están experimentando un interés creciente, siendo objeto de profundas investigaciones. Estos procesos LCM-RIFT se enfrentan actualmente a algunos retos de fiabilidad para la producción industrial [18], que requieren ser resueltos para ser utilizados de forma masiva en la industria. Entre estos, la impregnación de la resina líquida en refuerzos fibrosos, especialmente para la industria aeronáutica [3], [189], [190], [191], [18]. También, la repetibilidad [20], durante el preformado de la pieza y la optimización del ciclo de curado, post-curado [48].

En el procesado por infusión de composites es un reto determinar con fidelidad la evolución de las distintas variables que condicionan la impregnación y el curado de las piezas. El espesor y la fracción volumétrica de la pieza consolidándose tampoco se conocen con precisión, primero por el uso de una bolsa plástica como contra-molde y segundo debido a las variaciones del volumen a lo largo de la preforma cuando el vacío y la presión son aplicadas [19]. El uso de una bolsa de plástico como contra-molde también genera problemas durante el llenado ya que arroja diferentes permeabilidades locales. Los cantos o curvaturas no escapan a este problema. En piezas de gran envergadura, asegurar la misma presión local y/o compactación de fibra en todos los sitios, no está al alcance de las técnicas actuales, por lo que la controlabilidad del flujo

³⁶ RTM – Resin Transfer Moulding. Moldeo por Transferencia de Resina.

³⁷ RIFT – Resin Infusion under Flexible Tooling. Infusión de Resina bajo Contra-molde Flexible.

³⁸ VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding por Transferencia de Resina Asistido por Vacío.

³⁹ VIP – Vacuum Infusion Process. Proceso de Infusión por Vacío.

durante su llenado es compleja. Seguidamente, en la etapa de curado, pueden existir variaciones en el calor liberado durante la polimerización de una matriz reforzada con fibra, tanto como del grado de polimerización, considerando diferentes zonas-volumenes locales de una misma pieza. Durante el post-curado una pieza se ha de someter a un ciclo de calor óptimo, etapa que se suele ejecutar en horno industrial. Sin embargo, obtener un post-curado óptimo depende del grado de polimerización-solidificación alcanzado en la etapa de curado. Este último debe ser determinado con el objetivo de estimar la dosis de calor necesaria para llevar la pieza a la máxima polimerización posible, sin degradarla.

El comportamiento esperado del proceso de fabricación de una pieza-composite, usualmente es previsto o planificado haciendo uso de programas de simulación que basan su funcionamiento en modelos numéricos cuyos parámetros de entrada suelen ser resultados de las caracterizaciones de los materiales a usar. Cada parámetro de caracterización es alcanzado mediante diferentes métodos, con sus propias tecnologías de medición, desacoplados unos resultados de otros, combinando diversas fuentes de error, debidas principalmente a los instrumentos de medida y a las dimensiones manejadas en las muestras, [39]. Dichas caracterizaciones suelen ser off-line a la fabricación, en condiciones de laboratorio, muy cuidadas. Sin embargo, la realidad del proceso de fabricación enfrenta multiplicidad de factores que afectan a su variabilidad. Las manipulaciones inadecuadas de los materiales y/o procedimientos de preparación incorrectos, así como fallos humanos [34], [192]. Suponen, errores potencialmente desconocidos y garrafales en las prestaciones del componente final, [40].

Para conseguir que en los procesos LCM RIFT se pueda garantizar la repetibilidad y reproducibilidad, el primer paso es disponer de las tecnologías adecuadas de medición. Es imprescindible medir eficiente y óptimamente para avanzar científicamente en el conocimiento de estos procesos. La literatura, en general muestra avances en pleno desarrollo y todavía con muchas preguntas por resolver. Se intenta explicar la fenomenología física del comportamiento de los fluidos o la termodinámica del curado en la pieza, observando mediante sensores con dimensiones de detección del orden de millones de veces más pequeños que el área-volumen de la pieza bajo observación o monitorización. Como resultado se alcanzan mediciones restringidas dimensionalmente a un sensor puntual. En esencia, estas técnicas de monitorización restringidas dimensionalmente han condicionado el enfoque de la mayoría de trabajos científicos. Además, focalizan en la medición de una variable-parámetro de proceso, durante alguna etapa de la fabricación, desconociendo su trayectoria en etapas previas o su interacción y/o variabilidad respecto de otras zonas de la pieza.

En general, los sensores reportados en la literatura, intrusivos o no-intrusivos, son habitualmente cero-dimensionales, esto es, puntuales o sensores de inspección local, [193]. Estos sensores son usualmente colocados en posiciones fijas y no dan flexibilidad, versatilidad al proceso de monitorización. Por ejemplo, en mediciones del flujo de resina y su impregnación o la dinámica de la transferencia de calor para áreas de gran envergadura. Por tanto, el sensor óptimo debería ser una matriz de sensores cero-dimensionales que dé flexibilidad-versatilidad en la monitorización. Actualmente, las cámaras ofrecen este tipo de atributos, a fin de visualizar con gran resolución espacial los fenómenos presentes en procesos de fabricación.

El uso de cámaras en procesos RIFT viene justificado básicamente porque el contra-molde es una bolsa de plástico transparente y restringe su utilidad a este tipo de procesos.

En suma, la comunidad científica y técnica avanza con interés en la definición de un marco computacional que pueda ser utilizado y represente con exactitud aceptable el proceso de fabricación, en todas sus etapas incrementando su interrelación, [194]. Es necesario vincular, en el mismo sistema tres líneas de actuación: la caracterización de materiales y su modelado físico; el diseño del molde y la definición de una estrategia óptima de llenado considerando parámetros de inyección que optimicen la impregnación; finalmente la optimización del curado de la pieza. Esta temática es tratada por algunos proyectos europeos bastante contemporáneos, [195], [196].

1.5 Hipótesis y Objetivos de la Tesis.

En vista de la situación actual, respecto de los métodos de monitorización en fabricación de composites bajo procesos LCM-RIFT, *las hipótesis principales* de esta tesis son las siguientes:

- Los sensores no-intrusivos de última generación, tales como las cámaras sensibles a múltiples espectros, arrojan mayor cantidad de información de las piezas bajo fabricación que los sensores puntuales tradicionalmente usados. Matriz de sensores bi-dimensional.
- Faltan técnicas de monitorización on-line óptimas, esto es durante el procesamiento de las piezas, que permitan determinar la variabilidad de los parámetros de proceso cubriendo las dimensiones completas de la pieza bajo inspección.

- La naturaleza de los fenómenos físico-químicos presentes durante una fabricación pueden ocurrir en cualquier momento y en cualquier zona de la pieza, presentando heterogeneidades que pueden pasar desapercibidas por las restricciones de las técnicas de monitorización tradicionales.
- La variabilidad de los parámetros de proceso a lo largo de las etapas que lo conforman deberían poderse representar en una única entidad computacional, que permita flexibilizar y universalizar el uso de un sistema de información común a toda la fabricación.

Esta tesis busca alcanzar los siguientes *objetivos*:

- **a)** Definir un marco computacional único para la monitorización en base a técnicas de visión artificial. Válido y aplicable a las distintas etapas de procesos LCM-RIFT, que permita la integración de mediciones de la variabilidad de parámetros del proceso provenientes de diferentes técnicas de monitorización.

Haciendo uso del marco computacional basado en Visión Artificial:

- **b)** Analizar la mecánica de la impregnación/saturación y las formas del frente de flujo de resina, mejorando los métodos y las herramientas de monitorización y caracterización existentes. Así, proponer nuevas técnicas de medición de la zona de saturación y de la permeabilidad del refuerzo durante el llenado de moldes.
- **c)** Proponer mejoras a las técnicas de monitorización de grado de curado disponibles para piezas durante el proceso de polimerización. Extensible a piezas de grandes dimensiones.

1.6 Hypotheses and Objectives of the Thesis

In view of the current situation regarding monitoring methods in manufacturing composites with LCM-RIFT processes, *the main hypotheses* in this thesis are:

- Latest generation, non-intrusive sensors, such as multispectral cameras, provide more information on the parts being manufactured than traditional point sensors.
- There is a need for optimal online monitoring techniques, i.e. during processing of the parts, to determine the variability of the process parameters covering all of the dimensions of the part under inspection.

-
- The nature of the physical and chemical phenomena present during manufacture may appear at any time and anywhere on the part, giving rise to heterogeneities that may go unnoticed due to the limitations of traditional monitoring techniques.
 - It should be possible to show the variability of the process' parameters throughout its stages in one single computational entity. This will allow for more flexible and universal use of a common information system for the entire manufacturing process.

This thesis seeks to achieve the following *objectives*:

- **a)** To define a single computational framework for monitoring, based on artificial vision techniques. This should be valid and applicable to the different stages of the LCM-RIFT processes, allowing for integration of the measurements of variability in the process parameters through different monitoring techniques.

Making use of the computational framework based on Artificial Vision, we can:

- **b)** Analyze the mechanics of impregnation/saturation and the resin flow front shapes, improving the existing monitoring and characterisation methods and tools. As a result, we may propose new techniques for measuring the saturation and permeability of the reinforcement when filling the mould.
- **c)** Put forward improvements to the techniques for monitoring the degree of cure available for parts during the polymerization process. This should be applicable to large parts.

Capítulo 2

Marco Computacional y Tecnológico para la Monitorización del Procesado de Composites mediante LCM-RIFT. AVPP.

2.1 Introducción.

Este capítulo está parcialmente publicado en el artículo <<*On-line Measurement of the Resin Infusion Flow Variables Using Artificial Vision Technologies*>> presentado en la conferencia anual, versión 13th ESAFORM-2010 (European Scientific Association for Material Forming), el cual fue posteriormente publicado en el International Journal of Material Forming, [17].

El objetivo del presente capítulo es definir un marco computacional y tecnológico basado en visión artificial, que permita evolucionar la herramienta AVP⁴⁰ presentada en [17], y así constituir el sistema o herramienta AVPP⁴¹. Un sistema para monitorizar y apoyar, completa, óptima e integralmente la fabricación de composites procesados mediante RIFT. Por tanto, se define el sistema AVPP-RIFT⁴², buscando aglutinar las capacidades actuales de las herramientas de visión artificial al servicio del proceso, poniéndolas en valor a través de un único escenario de representación. Y en este centralizar, el análisis de la realidad de los múltiples parámetros físicos (dimensionales,

⁴⁰ *Artificial Vision Package.*

⁴¹ *Artificial Vision Package for RIFT Processing.*

⁴² *Resin Infusion Flexible Tooling.*

térmicos, reológicos, químicos, mecánicos, hidrodinámicos, etc.) estimables o medibles, que se presentan durante el ciclo de fabricación de un composite.

AVPP avanza conceptual y técnicamente con la finalidad de establecer un sistema común entre etapas, universal y flexible, a toda la información sobre parámetros-clave que genera un ciclo de fabricación real y su diseño por ordenador. Es decir, potencialmente AVPP se constituye como la herramienta genérica con la capacidad de contener, todas las herramientas de apoyo y monitorización, presentes y futuras. Gradualmente ha de compatibilizar con herramientas de diseño por ordenador, lo cual favorecerá la materialización computacional del vínculo entre la realidad y la virtualidad, usando el modelo 3D de la pieza a procesar y el concurso de tecnologías de monitorización de campo-completo (bi y tri-dimensionales).

2.2 Antecedentes.

En el capítulo 2 de la referencia [6], y también en [17], propusieron el uso de la visión artificial como sensor de los procesos LCM-RIFT. En especial, dicha propuesta fue motivada por la facilidad para medir variables online, [17], y por las ventajas que aporta la VA a la hora de sensorizar eficientemente un molde. Ya que se puede configurar de tal forma, que ofrezca información en línea con etapa, de la misma forma que la ofrece la simulación, es decir, la información nodal de los elementos finitos. Para conseguir sensorizar un molde de esta forma, los píxeles de la cámara se asocian formando elementos finitos (FEM⁴³). Para convertir los píxeles en nodos, simplemente necesitamos saber su posición en el espacio. Para una geometría 2D esta operación se realiza mediante proyección. Sin embargo, cuando la geometría a sensorizar es compleja, se hace necesario el uso de múltiples cámaras y de dispositivos adicionales para determinar la ubicación espacial de los píxeles.

De esta manera, en [194], se reportó un discretizador de las imágenes 2D del molde mediante elementos finitos. Ver el desarrollo de la técnica en el anexo XI , titulado *Mallado de un molde mediante la matriz foto-sensible de las cámaras. Asociación de técnicas de visión artificial y el método de elementos finitos - FEM*. En ese artículo, el sensor CCD, la matriz de foto-detectores que integra la cámara, fue considerada como una matriz de nodos que produce un espacio de discretización, donde cada triada <<nodo – pixel – foto-detector >> actúa como un sensor puntual-local referido a una coordenada espacial. La relación entre los <<nodos – píxeles – foto-detectores>> adyacentes define los elementos finitos permitiendo construir cualquier malla de

⁴³ Método de Elementos Finitos.

distribución o forma de elementos finitos. Por lo que los píxeles pueden ser asociados o agrupados, por ejemplo, en triángulos donde algo de ellos queda dentro de cada elemento finito, según la envergadura/dimensión que le sea conferida. Esta técnica interrelaciona verdaderamente tres métodos << FEM / Procesamiento de Imagen / Tecnología óptica del sensor >>. De esta manera la resolución de los elementos finitos dependerá de la resolución de la tecnología de sensorización, en cualquier caso parece no ser un tema crítico, teniendo en cuenta los millones de foto-detectores que hoy día integran las matrices detectoras en las cámaras, y que además va en incremento.

No obstante, también es posible establecer el proceso inverso, es decir, dado un mallado concreto del molde, relacionar los píxeles de la imagen del molde con los elementos finitos predefinidos en el mallado 3D. Para ello, se ha de conocer cuál es la posición del molde en la escena, vinculando los píxeles 2D y el mallado 3D. Ver en el anexo XII, titulado *Mallado de un molde desde la discretización del espacio con elementos finitos y su asociación con la matriz foto-sensible de las cámaras*.

Para geometrías un poco más complejas, como son las curvaturas, es necesario determinar el espacio ocupado por el molde 2.5D, con sistemas de visión artificial más sofisticados. Tal que la cámara debe estar calibrada a las coordenadas conocidas de cada píxel, nodo, en el espacio. Esto se explica en el anexo XIII, titulado *Discretización del espacio con visión artificial para geometrías 2.5D*. En la literatura hay un sin número de técnicas que permiten hacer esto, [120], por ejemplo, mediante el uso de un láser de luz estructurada, o un patrón específico de luz emitido por un proyector. En nuestras investigaciones se usa un digitalizador o escáner-láser 3D como lo muestra la sección 1.2.3.2.1.4. El cual utiliza la distancia entre una cámara y el láser como su inclinación, para calcular la posición del plano cortante en el molde. Usando este particular dispositivo, el error en la posición del píxel es del orden de milímetros, sin embargo es razonable, considerando la medición de superficies de gran envergadura. Esta técnica, permite ejecutando metrología, obtener una malla del molde-pieza 2,5D de bastante precisión, donde la variación del espesor podría llegar a ser medida con precisión razonable, como lo publican en [17]. De la misma manera que el escáner láser, el proyector puede ser usado para conocer las coordenadas de píxeles reales. No obstante, se obtiene mayor exactitud usando un láser, que un proyector.

A pesar de ello, el proyector, un dispositivo de más bajo coste que un láser, se usa en la preparación del moldeo de la pieza, para proyectar sobre el molde información mediante “chorros” de luz en la escena (el molde actúa como pizarra), en posiciones nodales predefinidas, mostrando resultados, por ejemplo de la posición del frente de flujo

simulado, de las líneas referencia para posicionar las tuberías, etc. Tal como fue reportado y validado mediante la herramienta AVP, en [17].

2.2.1 Validaciones Experimentales.

Haciendo uso de los algoritmos definidos en [6], se definió en [17], la herramienta AVP. Su funcionamiento e implementación tecnológica preliminar se explica a continuación.



Figura 2.1. Piscina a escala con los puntos de calibración marcados.

Mediante el AVP se apoya al operario en tareas de preparación del moldeado e implementación de procesos LCM -RIFT, y puede monitorizar las etapas de los mismos. A continuación se presenta un ejemplo que validó preliminarmente y de manera experimental el Sistema AVP, para apoyar la preparación del molde de una piscina.

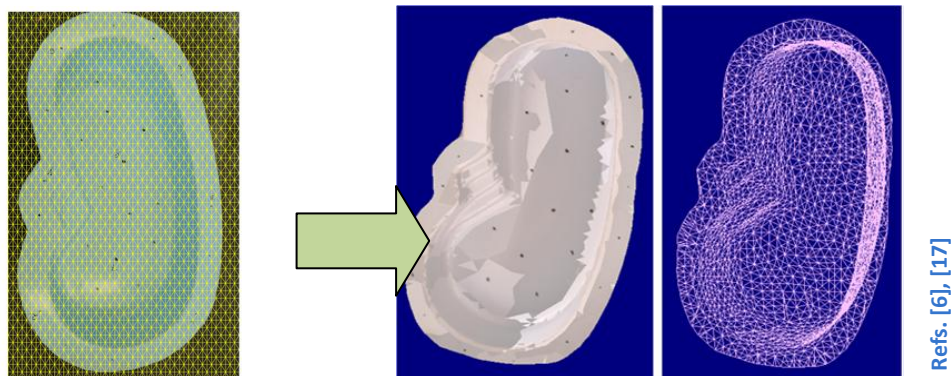


Figura 2.2. Mallado-2D de la cámara (izq.). Mallado del escáner 3D (der.), el cual determina la posición de los nodos. Mallados de los modelos de la piscina a escala con puntos de calibración.

Para este propósito, se usa como molde una piscina a escala, ilustrada en la fotografía de la Figura 2.1. En este molde, fueron marcados ocho (8) puntos para la calibración de

todos los dispositivos del AVP-RIFT, usando la algoritmia definida en el anexo IX más adelante.

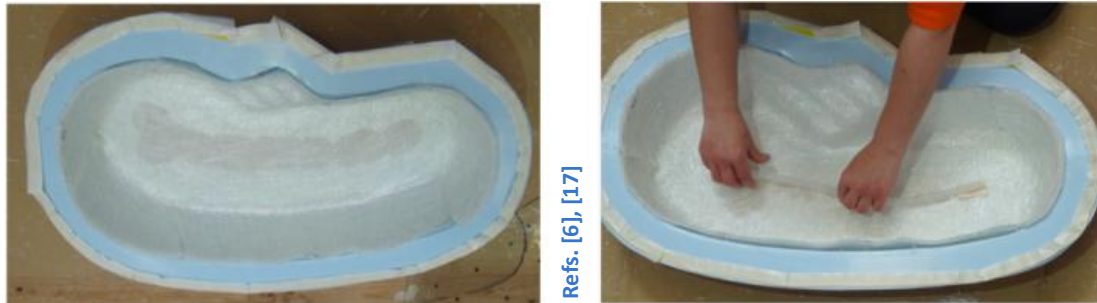


Figura 2.3. Canal de distribución desplegado sobre el tejido indicando la referencia para la fijación de los canales de inyección.

Mediante el uso del digitalizador 3D, la piscina se malla obteniendo un modelo basado en elementos finitos (FEM), ver Figura 2.2.

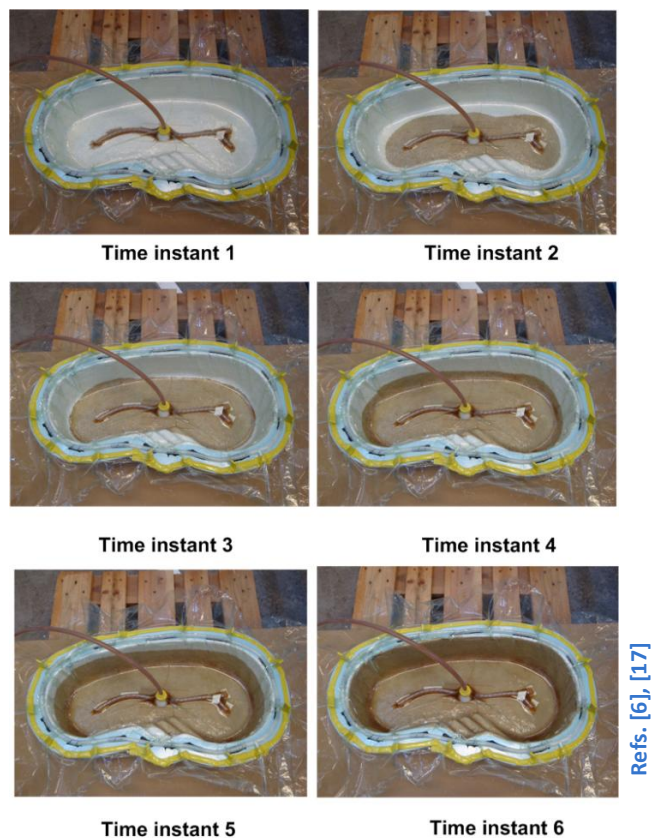


Figura 2.4. Etapa de llenado del molde de la piscina.

Usando mencionada malla 3D, una herramienta de optimización que fue propuesta en, [143], y [140], permite calcular el canal de distribución óptimo para el llenado de la

pieza. Los nodos que integran el canal de distribución óptimo son desplegados sobre el molde mediante el proyector. Mencionado procedimiento tecnológico usando el AVP ayuda a los operarios en las tareas de montaje, tal como la fijación de tuberías, ver Figura 2.3.

En la Figura 2.4, se pueden observar los diferentes instantes de tiempo, del frente de flujo de resina, durante la etapa de inyección. Nada más empieza el llenado, la cámara de espectro visible monitoriza el frente de flujo, asignando a cada nodo el tiempo en el cual el flujo lo alcanza, ver Figura 2.4. En esa figura, es posible observar la eficiencia del canal de distribución, el cual permite que el flujo alcance el venteo de manera homogénea.

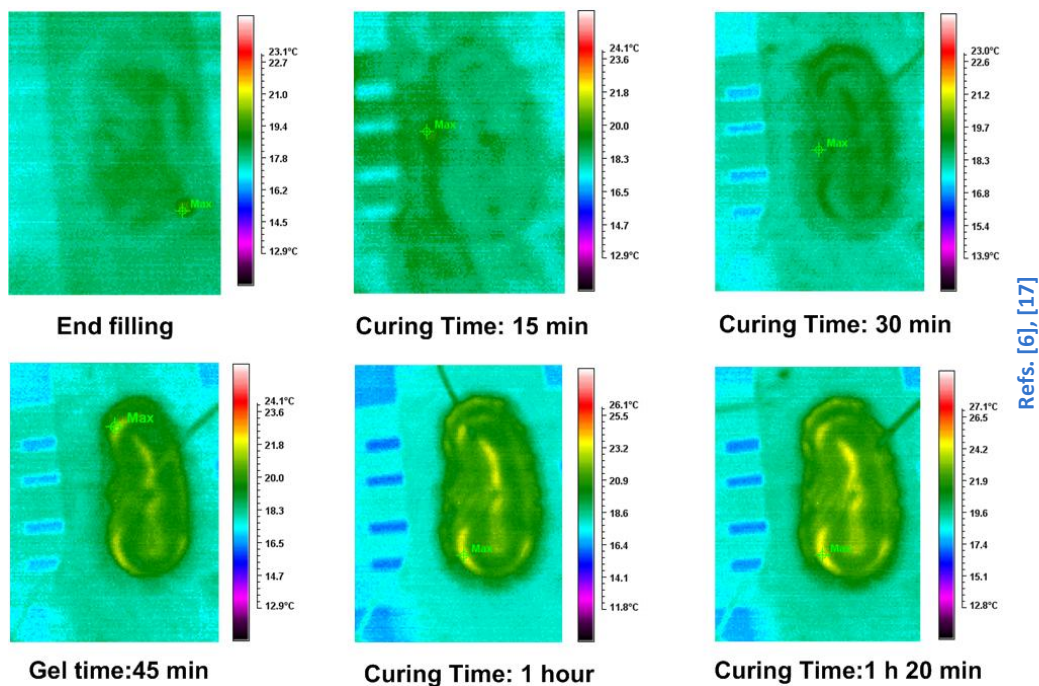


Figura 2.5. Etapa de curado de la piscina.

Cuando el proceso de llenado finaliza, es cuando procedimentalmente debería iniciar el curado. Una cámara térmica adquiere las imágenes para asociar a cada nodo del mallado 3D, la información de temperatura y durante el tiempo que dure el curado de la misma, ver la Figura 2.5. Es interesante ver que la distribución de la temperatura no es homogénea, en atención a la resina atrapada en el canal de distribución y en los cantos de la piscina. Confirmando la variabilidad de parámetros relativos al curado en la pieza. Lo anterior se debe a la diferente concentración de la matriz-fibra en estas zonas. En el canal de distribución, no hay fibra y en las esquinas o cantos, la preforma de fibra no

puede ser perfectamente adaptada a la forma del molde, lo que favorece que bajo la preforma, se formen acumulaciones de resina no controladas.

2.3 Justificación.

Los procesos LCM-RIFT mencionados en la sección 1.2 se enfrentan actualmente a algunos retos de fiabilidad técnica que requieren más inversión en investigación y desarrollo, para ser resueltos, así convertirse realmente en una sólida alternativa frente a los procesamientos implementados por excelencia. Entre estos retos, la impregnación de la resina líquida en refuerzos fibrosos de porosidad bi-modal es una cuestión clave, especialmente para la industria aeronáutica [3], [190], [191], [18], [189], aunque no es una cuestión ajena a otras industrias que desarrollan piezas-composites. También y solo por mencionar algunas problemáticas, la repetibilidad en la fijación-colocación de láminas de fibras sobre el molde con la orientación correcta según diseño, sin pliegues entre láminas [20], tanto como la optimización del ciclo de curado [48]. Conducir procesos LCM encarna frecuentemente bastante incertidumbre, debida principalmente a las variaciones de comportamiento de las propiedades de los materiales utilizados, a manipulaciones inadecuadas de los mismos y/o procedimientos de preparación incorrectos por parte de los operarios, como manifestaron en [34], [192]. Mencionadas variaciones suponen por tanto, cambios físicos desconocidos y garrafales potencialmente en las prestaciones del componente final de diferentes maneras [40]. Se destaca igualmente, la poca información que se suele reunir durante el proceso acerca de la consolidación de la pieza, ya que la práctica industrial habitual, verifica (no todas las veces) propiedades mecánicas y calidad a la pieza fabricada o resultante (ya desmoldeada), sin vincular esos resultados, a la evolución ocurrida durante la fabricación [54].

Lo anterior contrasta con el enfoque de la mayoría de trabajos científicos hasta ahora, en el ámbito de la monitorización de parámetros de proceso. Suelen ejecutar monitorizaciones puntuales-locales de los parámetros que interesan. Pero, desconocen su trayectoria en etapas previas o su interacción con otras zonas de la pieza en el dominio del tiempo y espacio. En general, la literatura técnica y científica, se ha basado en mediciones que técnica y dimensionalmente están restringidas a un punto (en atención, a la naturaleza dimensional y geométrica de los sensores) o múltiples puntos distribuidos en la pieza (produciendo resultados con baja resolución espacial) y en la mayoría de casos considerando alguna o algunas etapas, sin un seguimiento integrador.

Avanzar en monitorización eficiente y óptima para los procesos LCM es hoy por hoy, imprescindible. La monitorización eficiente y óptima de parámetros-clave asociados a las propiedades de los materiales, es de suma importancia y de ahí que constituya un reto adicional, al fabricar piezas-composites usando procesos LCM-RIFT. Ya que dichas mediciones, resultan útiles para estimar la influencia en la pieza final o actuar anticipadamente ante tendencias fenomenológicas, pudiendo corregir en tiempo real, tanto como retroalimentar al modelo o diseño inicial, pudiendo simular cómo afectan las condiciones de fabricación, medición y parámetros-clave en las propiedades mecánicas de la pieza final. De ahí, la *necesidad de vincular la realidad y la virtualidad del proceso*, de la manera más eficiente y óptima, acercando así, el marco de trabajo real y el del diseño. Dicha vinculación, ha de estar al servicio de todas y cada una de las etapas del ciclo de fabricación.

Por esta razón, y ante la variabilidad de las propiedades físicas de los materiales, el uso de tecnologías de monitorización on-line para asistir, medir-evaluar la secuencia completa de las etapas que conforman dichos procesos, [197], debe tener la capacidad dimensional, espacial y temporal de registrar el histórico de los cambios físicos que presenta el composite en proceso. Además, ha de aportar medios de diferenciación, para evaluar el comportamiento real de la pieza bajo proceso respecto del comportamiento esperado según el diseño o por fabricaciones previas.

En general, los sensores usados en la literatura, intrusivos o no-intrusivos, son definidos como cero-dimensionales, que a su vez son puntuales o sensores de inspección local, [193]. Estos sensores son usualmente colocados en posiciones fijas y no dan flexibilidad al proceso de monitorización de la dinámica del movimiento del fluido o de la transferencia de calor para áreas de gran envergadura. Por tanto, el sensor óptimo debería ser una matriz de sensores cero-dimensionales que dé flexibilidad en el proceso de monitorización. He aquí, una gran oportunidad para las tecnologías de monitorización de campo completo (bi-tridimensionales) que no comprometen la integridad de la pieza final, cuyas capacidades y afinidad con técnicas de procesamiento de imagen y cómputo, no han sido suficientemente exploradas en el mejoramiento de la monitorización de procesos LCM-RIFT. Este tipo de enfoques, deberían constituir un paso útil hacia la mejora de la calidad en la fabricación de composites, [54].

Hasta este momento, se puede decir que, las técnicas de monitorización existentes, tal cual están siendo usadas, aportan muy poco al conocimiento real de la pieza y a la mejora de motores de cálculo basados en modelos físicos. Las TM⁴⁴ podrían

⁴⁴ *Técnicas de Monitorización.*

aprovecharse mucho más, fusionando sus capacidades, adecuadamente. La información que genera cada técnica de monitorización aporta la medición de uno o algunos parámetros en sistemas de referencia implícitos, establecidos en la experticia del ingeniero de proceso, pero de difícil puesta en valor cuando se trata de contrastar el comportamiento de diversos parámetros-clave, en el dominio del tiempo y el espacio, al carecer de sistema de referencia común. La información experimental de dichos parámetros, no aportan suficientes elementos de análisis, la mayoría de veces, para entender las fenomenologías o tomar decisiones sobre el procesamiento, debido a la inexistencia de un sistema que ordene la información en relación a la pieza en proceso.

Por otra parte, ante la variabilidad de los parámetros inter-etapa, se desconocen qué tipo de herramientas tecnológicas basadas en VA avanzan direccionando medios de análisis integral al proceso, lo cual se incluye a continuación.

2.4 Capacidades Actuales de las Herramientas Tecnológicas basadas en VA, de Apoyo a la Ejecución de las Etapas del Ciclo de Fabricación.

En la secciones 1.2.3.1 y 1.2.3.2.2, se revisaron los parámetros usualmente medibles, bien mediante técnicas tradicionales y/o basadas en VA, respectivamente. En esta sección, se revisan las capacidades de las herramientas tecnológicas basadas en VA, que actualmente tienen su utilidad en el apoyo a la ejecución de procesos RIFT, o que en algún momento fusionan monitorizaciones experimentales con algoritmos de simulación. Algunas de ellas, ya se reflejan en patentes industriales y otras están en su fase experimental. Esta revisión, se realiza etapa por etapa del ciclo de fabricación, para encontrar elementos que conecten el análisis sobre métodos, técnicas o información inter-etapa.

2.4.1 Diseño de Composites mediante Motores de Cálculo Numérico.

Bien como entrada o como salida, los modelos 3D basados en elementos finitos (FEM), hoy por hoy, son virtualmente la base numérica del análisis de piezas estructurales. Diversos programas informáticos de diseño de procesamientos LCM, tanto académicos como LIMS [43], o comerciales, como SYSPLY, PAM-RTM [44], y PAM-FORM [198], incluso CATIA (que puede conectar con PAM), pueden proveer también soluciones virtuales para composites. En general, estos integran potentes algoritmos de análisis numérico como motores de cálculo y que muchos de ellos se pueden encontrar

en la literatura permiten a diseñadores e ingenieros de proceso, determinar y optimizar virtualmente, por ejemplo: la estrategia de infusión /inyección, la presión o el caudal de la inyección, la temperatura (molde y resina), la ubicación de puertas de inyección, salidas de aire (venteos), el preforming, fijación-colocación (draping), sujeción y posibles escenarios de deformación de la fibra, el ciclo térmico según matriz utilizada. Además estos, permiten predecir, estableciendo diversos escenarios de procesabilidad, por ejemplo: áreas de riesgo para aparición de zonas secas (Dry spots), riesgos de lavado de fibra (fiber washing), tiempo de curado y de llenado, velocidad de frente de flujo, presión aplicada al molde, temperaturas, flujos de calor y grados de curado, orientación de las fibras del laminado, planos de corte y orientación de fibra. Paralelamente, en cada capa o nivel de lámina, estima: arrugas (pliegues), puenteos, espesores, patrones planos de corte y orientación de fibra para su colocación en el molde. Y pueden incluso, estimar las propiedades mecánicas globales, equivalentes de cada apilado de capas de láminas de fibra, ayudando a validar la tensión de fallo por capa y su comportamiento dinámico.

En general, este software o motores de cálculo numérico, utiliza como entidad base de la información, una malla 3D de la pieza a procesar, sobre la cual ‘virtualmente’, se pueden hacer todo tipo de estimaciones, como las comentadas anteriormente. Los datos que contiene esta malla se basan principalmente en información de caracterizaciones⁴⁵ de materiales desacopladas usualmente del proceso real de fabricación. Aunque las capacidades de estas herramientas crecen, como crecen las capacidades del procesamiento informático, su utilidad en el procesado de composites bajo RIFT está restringida tan solo a la estimación dudosamente fiable del comportamiento de la pieza durante la fabricación, y además está desacoplada del procesado real.

Además, la literatura no reporta, el uso de tecnologías de VA durante esta etapa, excepto la obtención de la malla 3D, que puede ser obtenida directamente mediante diseño por ordenador o dado un molde físico, por ejemplo, mediante un escáner-láser como el de la sección 1.2.3.2.1.4.

⁴⁵ Entre otras, de permeabilidad, viscosidad, grado de curado, orientación de fibra.

2.4.2 Preparación del Molde para el Procesamiento de la Pieza.

En las secciones 1.2.1.3 y 1.2.3.2.2.3 más atrás, se especificaron las principales tareas que se suelen ejecutar durante esta etapa. Por tanto, se destaca la publicación científica de las siguientes herramientas.

En [17], mediante un sistema denominado AVP, que se compone de, un escáner 3D para obtener la malla de discretización del molde a procesar o modelo 3D del mismo. Con dicho modelo y el método publicado en [140], se pueden diseñar los canales óptimos de entrada de resina a lo largo de la pieza a procesar, garantizando llenados con homogeneidad del frente de flujo al venteo.

En [17], publican el funcionamiento descriptivo preliminar del AVP y sus contribuciones en la preparación de la fabricación: así, un escáner láser (cámara de espectro visible y un laser) mallan el molde (se obtiene la malla). Mediante el uso de esta malla, una herramienta de optimización permite calcular los canales de distribución óptimos, [140], [143], [144], con la finalidad de minimizar el tiempo de llenado de la pieza, a la vez que se analizan diversos escenarios de llenado óptimo (p. ej. frentes de flujo equidistantes al venteo). Para trasladar el resultado al molde, mediante proyección de canales óptimos vía video-proyector y técnicas de VA se asiste a los operarios la fijación-colocación óptima de los canales sobre el molde real. La herramienta, les marca espacial y dimensionalmente, el rigor de esta tarea. Como alternativa al proyector presentado en [17], existen también en el mercado, sistemas de proyección láser⁴⁶ sobre múltiples superficies de trabajo, que en la industria de composites están siendo usados específicamente, para desplegar sobre el molde las guías-líneas de luz láser de posicionamiento para ejecutar la fijación del preformado de fibra sobre piezas de gran envergadura, usando patrones virtuales de corte; es decir, el diseño de las piezas del rompecabezas que conforma el preformado de pieza o procedimiento de laminado para cada molde, [145].

En [141], una publicación bastante reciente, y argumentada en parte por la necesidad de medir con precisión los parámetros característicos de la fibra, en atención a que los materiales de las láminas en forma de preimpregnados o tejidos secos, exhiben comportamientos de deformación significativos y no-lineales, debidos a la manipulación previa y durante las tareas de preformado de una pieza, [199], reportan una herramienta preliminar y aún en desarrollo, basada en VA, útil para metrología

⁴⁶ Ampliar información en <http://www.lap-laser.com>.

industrial en las etapas iniciales del procesamiento de composites, aportándoles capacidad de automatización en la producción de piezas estructurales reforzadas con fibra de carbono (CFRP⁴⁷). Esta herramienta, habilita la identificación de parámetros asociados a la anisotropía del refuerzo, por ejemplo, el ángulo de orientación de la fibra (θ_f), a partir de imágenes cuya referencia espacial y dimensional es dada por un láser (de luz-visible), [200], y en línea con las tareas de draping⁴⁸ y colocación de la preforma de la pieza, sobre el molde. Resaltan el papel de la metrología en fabricación de composites, a fin de aumentar la calidad reduciendo la variabilidad en la fijación del refuerzo.

En [142], una patente que presenta un método basado en múltiples cámaras térmicas (IR), instaladas a un dispositivo de laminado de composites automatizado para inspeccionar-detectar en tiempo real, defectos que afectan la calidad del laminado de la pieza, tales como re-bordes, solapamientos y empalmes incorrectos, arrugas, así como malas adherencias e inclusiones, o cualquier otro tipo de anomalías en la fijación de las láminas durante el preformado de la pieza. Ante la presencia de cualquier tipo de parámetro anómalo, definido en su configuración, genera la activación de alarmas u otras señales de control. Estas imágenes adquiridas pueden ser utilizadas en tiempo real o post-proceso.

2.4.3 Llenado de Molde.

Al servicio de esta etapa, reportan varias herramientas basadas en VA, que habitualmente han sido validadas en moldes experimentales 2D, pero no implementan en moldes 2,5D.

Por tanto, detectan y controlan el frente de flujo, en [53], [146], [147], [148], [59], [61], [149], usando diferentes estrategias de control. En moldes experimentales, logran llenados con frentes de flujo homogéneos, a la vez que eliminan agrupamientos de aire, porosidades o zonas secas, mediante la actuación de un brazo o estructuras robóticas controladas por ordenador, las cuales aplican calor localmente en la zona de interés para modificar la viscosidad (μ) en [53], o la permeabilidad, en [146], [147]. También, re-direccionan el frente de flujo modificando la permeabilidad local mediante un sistema neumático que levanta o presiona el contra-molde flexible (bolsa de plástico), en [148]. Utilizando apertura y cierre de venteos cercanos al frente de flujo, en [59], [149] y [61].

⁴⁷ Carbon Fibre-Reinforced Plastics

⁴⁸ Fijación apropiada y cuidadosa sobre el molde de cada una de las partes que conforman la preforma fibrosa de la pieza, cumpliendo las reglas de diseño estructural (orientación de la fibra). Evitando arrugas, solapes, favoreciendo las uniones 'perfectas' entre las partes del laminado de fibra)

Para metrología de las variaciones de espesor a lo largo de la pieza, mediante diferentes estrategias, en [19], [60]. En [19], miden las variaciones de espesor de un punto en el tiempo, por ejemplo, en el centro de una pieza rectangular. También, mediante dos cámaras (visible) previamente calibradas se usan para medir las variaciones de espesor superficial, producidas en los procesos VI debidos a los cambios de presión local, [60]. En [60], mediante la técnica de estéreo-fotogrametría, estiman la dinámica de las variaciones en, la fracción volumétrica de fibra la permeabilidad a lo largo de una pieza, partiendo de la medición del espesor durante el llenado y el post-llenado

En [43], estiman la permeabilidad de la preforma (constituidas por un número de capas de tejido) usando el proceso VARTM y monitorización mediante dos cámaras (una arriba y otra abajo del molde, de espectro visible). En esta, detectan el frente de flujo, el algoritmo PEA busca iterativamente el valor de la permeabilidad que permitiría reproducir el comportamiento experimental del flujo en el software de simulación LIMS. A pesar de que es un método experimental y que no ha sido llevado a la industria, resulta interesante esta publicación, ya que aportan un enfoque útil, para explicar parcialmente la herramienta integral de monitorización que se propone en este capítulo. Conectan tecnología de monitorización, proceso y análisis numérico (LIMS). Por lo que logran que la simulación y la realidad experimental del llenado del molde, sean iguales. Es un enfoque constituido para la medición específica de un parámetro.

2.4.4 Curado y Post-curado.

En [94], detectan variaciones físicas durante el curado de piezas mediante monitorización de espectro visible, correlacionan el grado de polimerización de una resina con las variaciones que sufre el índice de refracción de la misma. Dichas variaciones se evidencian, cuando un haz de luz generado desde un laser refleja a un punto diferente del CCD de una cámara digital. Para monitorizar el ángulo utilizan una cámara de espectro visible. Este método ha sido probado para resinas, más no para piezas-composites.

Detectan variaciones en el grado de curado por técnicas infrarrojas, [156], [13], [11], [12], [10] y [164]. En [156], visualizan la composición química y la cinética de la reacción de algunas gotas de resina mediante la técnica denominada, “imagen multi-espectral en NIR (Near InfraRed – Infrarrojo próximo)”. A pesar de que no extienden, el uso de esta técnica podría ser la base de una herramienta inteligente para el análisis del curado de piezas composite. Validan esta herramienta como un espectrómetro de imagen NIR.

Adicionalmente, a través de las referencias [13], [11], [12], [10], actualmente se avanza en la invención de una herramienta de monitorización basada en termografía infrarroja (LWIR), que permita asistir el curado de piezas en un amplio rango dimensional, procesadas bajo RIFT. Esta, usa referencias in-situ definidas según las patentes [105], [107]. En [164], construyen un sensor basado en reflexiones atenuadas infrarrojas mediante un prisma puesto en la pared superior de una estructura composite en proceso de curado, donde un algoritmo basado en transformada de Fourier detecta los rangos espectrales del infrarrojo medio (MIR-Mid InfraRed) y los convierte en un índice de grado de curado. Dichas mediciones son usadas en un controlador de curado con retroalimentación asistida por un modelo, el cual determina la temperatura óptima de procesamiento. En [157], demuestran que durante un proceso exotérmico, tal como es el curado de resinas termo-estables, que el uso de un radiómetro de banda-singular para determinar con veracidad la temperatura puede llevar a resultados incorrectos, por lo que a través de radiometría de cuatro-bandas espectrales, estiman la emisividad de la resina en proceso de curado y por tanto llegan a mediciones veraces de temperatura. En este sentido, los sistemas multiespectrales tratados en la sección 1.2.3.2.1.1, y aplicados durante esta etapa, podrían aportar nuevos caminos que explorar, en la identificación y/o medición de parámetros-clave, no solo en la etapa de curado, sino en las demás que conforman el ciclo de fabricación. Además, en la patente [160], reportan una herramienta basada en termografía IR, para monitorizar la energía que liberan al ambiente las estructuras composites durante su curado, sin llegar a utilizar el potencial de la termografía tal cual se conoce hoy día, quedándose en mediciones puntuales. No reportan sus algoritmos.

2.4.5 Desmoldeado, Verificación de la Calidad y Caracterización Mecánica de la Estructura.

Es en esta etapa, quizá es donde la VA está teniendo, al menos en tiempos recientes un gran desarrollo de aplicaciones y por tanto el advenimiento de múltiples herramientas y combinación de técnicas de VA, acústicas y termodinámicas. Hay herramientas para caracterización mecánica desde pequeñas muestras hasta piezas completas. La mayoría de herramientas, se basan en el uso de técnicas de difusión de flujos térmicos y/o mecánicos (ondas acústicas) a través de la estructura desmoldeada, con la finalidad de ejecutar activamente, sin llegar a degradar las piezas, diferentes tests de caracterización mecánica. Estos, han sido denominados NDT, o métodos de inspección no-destructiva.

El potencial de la termografía infrarroja en estos métodos, ha sido reconocido desde hace muchos años. La termografía fue principalmente un método cualitativo adjunto a

tecnologías tradicionales de NDT, o para aplicaciones de mantenimiento preventivo o predictivo. No obstante, la termografía es hoy día también una técnica de visión artificial, gracias a que poco a poco ha ido adquiriendo capacidades cuantitativas. En especial, en fabricación de composites se ha consolidado como un método robusto para NDT⁴⁹. Hoy día, NDT es usado en variedad de aplicaciones de caracterización mecánica de piezas o muestras. La aparición y más entusiasta aceptación de técnicas termográficas para NDT luego desde la comunidad de composites espaciales [179], [180]. A partir de entonces, numerosas compañías han implementado testado termográfico, a menudo reemplazando ultrasonidos y radiografías, para ambas aplicaciones en fabricación o en servicio, [177]. Reportan también, el uso de cámaras térmicas para ejecutar NDT en piezas-composites desmoldeados en, [169], [176]. En [169] y [170], ejecutan NDT mediante termografía activa. En [63], combinan dos métodos de termografía activa: la termografía y la interferometría pulsada. Estas, producen una nueva técnica denominada “*deformo-grafía*” (comercialmente en Inglés: *shearography* [172]), la cual permite estudiar las propiedades térmicas y mecánicas de las piezas finales de composite, logrando mediante la fusión de ambas fuentes de datos, un tipo de inspección no-destructiva aplicable a piezas-completas reales de gran envergadura, arrojando detecciones tales como defectos a diferentes profundidades, malas adhesiones entre el núcleo de panal de abeja o espuma y la resina, impactos, poros, etc. Lo último, permite avanzar en un método de clasificación de tipos de defectos mediante técnicas de visión artificial (procesamiento de imágenes). En [174] y [175], presentan la *vibro-termografía* o termografía pulsada mediante excitación por ultrasonidos. Este tipo de técnicas, siempre relaciona procesamiento de imágenes y/o algún modelo referencia para la detección o estudio de los defectos típicos: *grietas, malas adhesiones, o delaminaciones*.

En general, usando técnicas NDT aplicadas a estructuras de composite se pueden detectar: *inclusiones, burbujas de aire, daños de impactos, adhesiones de mala calidad, y delaminaciones*, mediante termografía pulsada⁵⁰ según [176]. Además, *inclusiones*⁵¹, *distribuciones de resina anormales, medición de porosidad*, confirmación de la *orientación de las capas de fibra, y detección de zonas secas*, [177]. Y mediante termografía lock-in⁵² se puede relacionar información sobre el *espesor de adhesivos y pinturas aplicadas, apilamiento de fibras*, así como estudiar la influencia de tratamientos en la superficie del molde respecto a la *adhesión*, [176]. En mantenimiento,

⁴⁹ NDT – Non-Destructive Testing. Test no destructivos.

⁵⁰ Someter la pieza a flujos de calor.

⁵¹ Objetos extraños (tales como trozos de film plástico dejado sobre las capas de las láminas de fibra pre-impregnadas o sobre la superficie de la pieza).

⁵² Modulación de ondas de calor a través de la pieza.

mediante termografía activa⁵³, los tests incluyen detección de *daños por impacto, agua atrapada, delaminaciones*, y la *validación de parches en reparaciones*, [177].

En la sección 1.2.3.2.2.6 fueron tratados los parámetros de caracterización mecánica a piezas desmoldeadas o en servicio, que hoy día pueden ser obtenidos mediante métodos NDT o el uso de otras técnicas experimentales de caracterización, y que quizá podrían llegar a convertirse en herramientas industriales.

En [181] y [183]. Determinan la orientación de la fibra dentro del composite después de desmoldeado. En [181], estiman la *orientación 3D de las fibras* del composite (fibras de madera) desde imágenes en volumen a escala de grises obtenidas mediante microtomografía de rayos X. En [183], determinan la *orientación de la fibra* en estructuras de composite utilizando sensorización por ultrasonidos y procesamiento de señales dispersas.

2.4.6 Análisis de la Utilidad Actual de Las Herramientas Tecnológicas De Monitorización en la Mejora de los Procesos RIFT.

Para este análisis es necesario destacar que el procesamiento de piezas-composites no es un procedimiento lineal de un único proceso-etapa, como se pudo ver en la sección anterior. Más bien es un lote o ciclo de procesos-etapas, [54], que dan como resultado final una pieza o lote de piezas y con esta o éstas, muchas inquietudes sobre la realidad de sus prestaciones finales, agravando esta percepción de inquietud si es la primera vez que se fabrica mencionado componente (Ver Figura 2.6). Esto último, también es debido a que esta clase de procesamientos aún no son deterministas⁵⁴ respecto al diseño original, bien planificado bajo software o por métodos tradicionales (fichas ordenadas de fabricación). No ser deterministas, tiene que ver con la alta variabilidad de los parámetros de proceso durante el ciclo de fabricación, como se explicó anteriormente, pero también con las restricciones que impone el estado de las técnicas de monitorización y control, disponibles.

Las herramientas tecnológicas de monitorización se usan puntualmente en algunas etapas, y la información que estas generan, no está conectada con la secuencia de las etapas previas, ni posteriores que conforman el procesamiento de una pieza (Ver Figura 2.6). Se desconoce la metrología histórica del proceso, por lo que no se considera la

⁵³ *Termografía pulsada o Lock-in*

⁵⁴ *Teoría que supone que la evolución de los fenómenos naturales está completamente determinada por las condiciones iniciales.*

interdependencia y la sensibilidad física de los materiales entre etapas. De la misma manera, los métodos de medida y la instrumentación reportada hasta ahora, presentan uso específico y no llegan siquiera a plantear la posibilidad de conectar sus medidas actuales con los valores iniciales o parciales (por etapa), con la finalidad de establecer relaciones que permitan estimar-predecir parámetros en el composite final.

Por tanto, la Figura 2.6, representa un ciclo de procesamiento usualmente retroalimentado por información proveniente de las técnicas de monitorización tratadas en las secciones contenidas en 1.2.3. La Figura 2.6 además de ser equivalente a un bucle de control abierto, es un procedimiento no-sistemático, con tasas de error y de muestreo altas.

Paralelamente la dificultad de obtener predicciones fiables, en parte se explica en la Figura 2.6. La información que se genera durante el ciclo, suele estar desligada de las predicciones iniciales, debido a la inexistencia de herramientas que integralmente retroalimenten a la etapa de diseño. Esta carencia de integridad de la información, hace que tolerancias de procesabilidad sean desconocidas, y por tanto el comportamiento de los materiales y su relación con los parámetros primarios definidos en el diseño, sean difíciles de evaluar. En contraste a lo anterior, los diseños de piezas basados en paquetes informáticos, provistos de importantes motores de cálculo numérico, generalmente no son evaluados, integrando la información que genera el ciclo de fabricación en ejecución. De hecho la literatura reporta que se conciben como difíciles de evaluar debido principalmente a la falta de metrología fiable, óptima. Por lo que los modelos que gobiernan las simulaciones, pueden llegar a integrar ciertas inexactitudes. Actualmente, falta integración de la información de todas las etapas durante el procesado de la pieza para caracterizar el proceso de fabricación, con más precisión. En consecuencia, la información que generan las técnicas de monitorización asociadas al ciclo de fabricación, no puede ser usada en el diseño de proceso, eficientemente.

Asimismo, la gran mayoría de métodos de sensorización-monitorización tanto tradicionales como basados en VA, que permiten inspeccionar la consolidación sobre alguna etapa del procesamiento, aparecen desperdigados en la literatura, sin un sistema que les reúna o aglutine de forma ordenada. La monitorización en procesos RIFT es un campo de conocimiento aún no ordenado, por lo que no hay una metodología o sistema que potencialmente asocie o relacione la información mediante un escenario estructurado sistemáticamente, que ofrezca la interrelación e interdependencia entre las etapas de una fabricación.



Figura 2.6 Estado Actual De la Información de Etapas del Procesamiento De Composites.

Tradicionalmente, la evaluación más exhaustiva de una fabricación, se está ejecutando en la pieza desmoldeada y los parámetros que se pueden retroalimentar a la etapa de diseño, para ciclos posteriores dependen del experto-humano, y no de sistemas de monitorización fiables y ordenados sistemáticamente (Ver Figura 2.6). Esperar a testear la pieza desmoldeada mediante técnicas NDT para retroalimentar al diseño, se traduce en el desaprovechamiento de la riqueza de información y la posibilidad de correspondencia en tiempo real, que el ciclo de fabricación ha dado de sí. Paralelamente, aunque las predicciones del diseño sean favorables, lo más común es que los fallos de la pieza real desmoldeada desconozcan su causa.

En atención, al presente análisis, se evidencia la necesidad en el procesamiento de composites de una herramienta de análisis universal, que integre la información desde la perspectiva de un único sistema de referencia espacial, el diseño, la predicción, la monitorización y el apoyo (control) de las etapas de fabricación bajo procesos RIFT. Tal que permita poner en valor a través de un único escenario de representación, la realidad de los múltiples parámetros físicos (dimensionales, térmicos, reológicos, químicos,

mecánicos, hidrodinámicos, etc.) estimables o medibles, que se presentan durante el ciclo de fabricación de un composite. La literatura muestra en general que cada herramienta tecnológica trata el proceso desde su óptica, es decir, están al servicio de algunas partes del ciclo de fabricación. Sin embargo, estas no constituyen herramientas que propendan por integrar la información generada por las etapas del ciclo actual pudiendo utilizarla en diseños posteriores. Lo último significa definir herramientas capaces de acompañar, de estar al servicio de las necesidades y requerimientos, que pueda tener cada etapa en un ciclo. Ya sea, para ofrecer una representación gráfica en línea con la monitorización de la pieza, de esta en comparación del diseño y/o predicciones, o de desplegar información en el molde (como pizarra) con la finalidad de apoyar el proceso en alguna etapa. Como las capacidades de las herramientas reportadas en [17], [145], [200].

2.5 Definición del Sistema AVPP-RIFT.

Debido a las carencias actuales a nivel de integración de las herramientas tecnológicas de diseño, monitorización en base a VA y apoyo, al servicio de procesos RIFT, y cuyas capacidades limitadas fueron evaluadas en la sección 2.4. Además, considerando que todas las técnicas basadas en VA para la medición de parámetros-clave, revisados en las sub-secciones incluidas en la sección 1.2.3.2.2 más atrás en el capítulo 1, constituyen enfoques útiles, pero restringidos y muy específicos en comparación del objetivo de AVPP.

Se propone un marco computacional y tecnológico basado en visión artificial, que permita enriquecer las capacidades de la herramienta AVP presentada en [17], y así constituir el sistema o herramienta AVPP. De esta manera, AVPP es un sistema para monitorizar y apoyar, completa, óptima e integralmente la fabricación de composites procesados mediante RIFT. Por tanto, se define el sistema AVPP-RIFT⁵⁵, buscando aglutinar las habilidades actuales de las herramientas al servicio del proceso, poniéndolas en valor a través de un único escenario de representación, la malla 3D de la pieza o molde. Y en esta centralizar, el análisis de la realidad de los múltiples parámetros físicos (dimensionales, térmicos, reológicos, químicos, mecánicos, hidrodinámicos, etc.) estimables o medibles, que se presentan durante el ciclo de fabricación de un composite.

⁵⁵ *Resin Infusion Flexible Tooling.*

2.5.1 Capacidades y Mejoras Respecto de Herramientas Existentes.

Caminando hacia nuevos escenarios, las técnicas de visión artificial han de ser la base de cualquier propuesta computacional para monitorización y metrología asociada a esta clase de procesos, por su capacidad de arrojar información, espacial, dimensional y temporal de los mismos, tanto como la capacidad de “contener sub-conjuntos de datos” o asociarse con datos provenientes de otras técnicas. En suma, por su flexibilidad y versatilidad. Flexibilidad, ya que pueden adaptarse a cualquier pieza sin necesidad de interactuar conductivamente con el molde, al ser técnicas no-intrusivas. Además, pueden trasladarse a otro tipo de geometrías de forma directa, sin instalaciones costosas o mecanizados que ralenticen lo importante: el procesado de la pieza. Además, versatilidad, al poderse adaptar e incorporar integralmente la información producida en todas las etapas de un proceso de fabricación, en una única entidad de información (malla 3D).

AVPP, en el peor de los casos pueden facilitar la cualificación de las tendencias del procesamiento. En consecuencia, mediante históricos de mediciones entre etapas de cada ciclo, los sistemas de monitorización-medición han de potenciar la capacidad de evaluar el diseño inicial y las predicciones, haciendo seguimiento de los parámetros claves pre-establecidos, tal que en cualquier instante de tiempo, del proceso se puedan conocer y visualizar interactivamente. Por ejemplo, las tres siguientes vistas:

- El estado actual de la pieza bajo procesamiento,
- La predicción temporal equivalente de la pieza (obtenida mediante software de diseño),
- Y la pieza con las desviaciones resultantes del instante.

La vista de desviaciones resultantes podría llegar a dar una idea de lo que probablemente va a suceder mecánicamente en la pieza y de la calidad final de la misma. Dichas vistas se han de preparar, para el operario, que podría visualizar on-line y con muestreos online, que en algunos casos significa muy cerca del tiempo real (dependiente de las especificaciones del equipamiento) mediante la misma malla de discretización usada para la etapa de diseño de la pieza. Este tipo de enfoque, debería aportar información invaluable, ya que el desempeño mecánico de una pieza está ligado a las diferentes etapas de su consolidación.

La malla con el histórico de desviaciones (solo aplicable a parámetros predefinidos) durante el procesamiento siempre puede ser relacionada con parámetros medidos en la pieza final, mediante inspecciones NDT, tales como porosidades, tensiones residuales, zonas secas, deformaciones, entre otros. Lo anterior, permitiría evaluar el comportamiento real de la pieza con los modelos que gobiernan el diseño, y vincularlo a las propiedades mecánicas de la pieza final. Mencionadas relaciones emergentes son oportunidades para indagar nuevas maneras de estimar el resultado de la pieza final, así como evaluar los modelos existentes en los programas actuales de simulación. Usar la malla de desviaciones de los parámetros predefinidos, arroja información sensible de ser estudiada y relacionada con el diseño inicial, las predicciones y los resultados finales. Además de ser una manera indirecta de medir el comportamiento y la variabilidad de los materiales durante el procesamiento, puede vislumbrarse también como un método que estimula la capacidad de ajustar las predicciones iniciales, cuantitativa o cualitativamente, siendo esto clave para incrementar la fiabilidad de los procesamientos RIFT e incrementar el determinismo y exactitud de las predicciones de los software de diseño. Esto recalca con tener cada vez más medios fiables para ejecutar pronósticos sobre las propiedades mecánicas de la pieza, cuando este en servicio.

Además, mediante el uso del AVPP mostrado esquemáticamente en la Figura 2.7, es posible crear enfoques que relacionen el escenario real instantáneo y el diseño virtual-computacional, permitiendo así, estrechar la separación entre los dos escenarios. Dicho emparejamiento es escalable y depende de la tecnología disponible en cada momento, tanto como de los parámetros específicos a ser medidos. Sistemas como estos, también permiten avanzar en la estructuración y organización de la información que se genera durante un procesamiento, así como estudiar las dependencias de parámetros entre etapas, y de estas con la pieza final. Y todo ello apuntando a un mejoramiento de los ciclos de fabricación posteriores conociendo rangos y tolerancias de procesabilidad.

En el proceso ideal, que es el modelo hacia el cual se avanza, que muestra la Figura 2.7, se ilustra un ciclo principal con varios bucles cerrados, que representan intercambio o retroalimentación de información entre las etapas del proceso y el AVPP. El AVPP no es más que la tecnología y set de algoritmos requeridos para medir-asistir el proceso eficientemente. Por ello el AVPP, puede integrar o recibir información, hacia o desde el software de diseño, mediante el cual fue concebida la pieza bajo proceso. El error en la retroalimentación de la información está gestionado por sistemas con error casi despreciable comparado al experto-humano, del ciclo ejecutado actualmente en procesos RIFT como se puede ver en la Figura 2.6. El error entre predicción por diseño y resultado real-final, debe tender a disminuir al contar con procedimientos sistemáticos

de metrología. Tirar o reparar una pieza, igual que sentir incertidumbre sobre la misma, puede ser un reto más fácil de allanar, si se cuenta con métodos definidos e instrumentación común, sistemática y universal asociada a estos procesos. Quizá determinar cuantitativamente si procesos de piezas fuera del autoclave son más fiables que dentro, ha de estar permanente soportado en la instrumentación de medida, lo cual no ocurre hoy día, es más, ese tipo de determinaciones aún no resueltas debido al alcance actual de las técnicas.

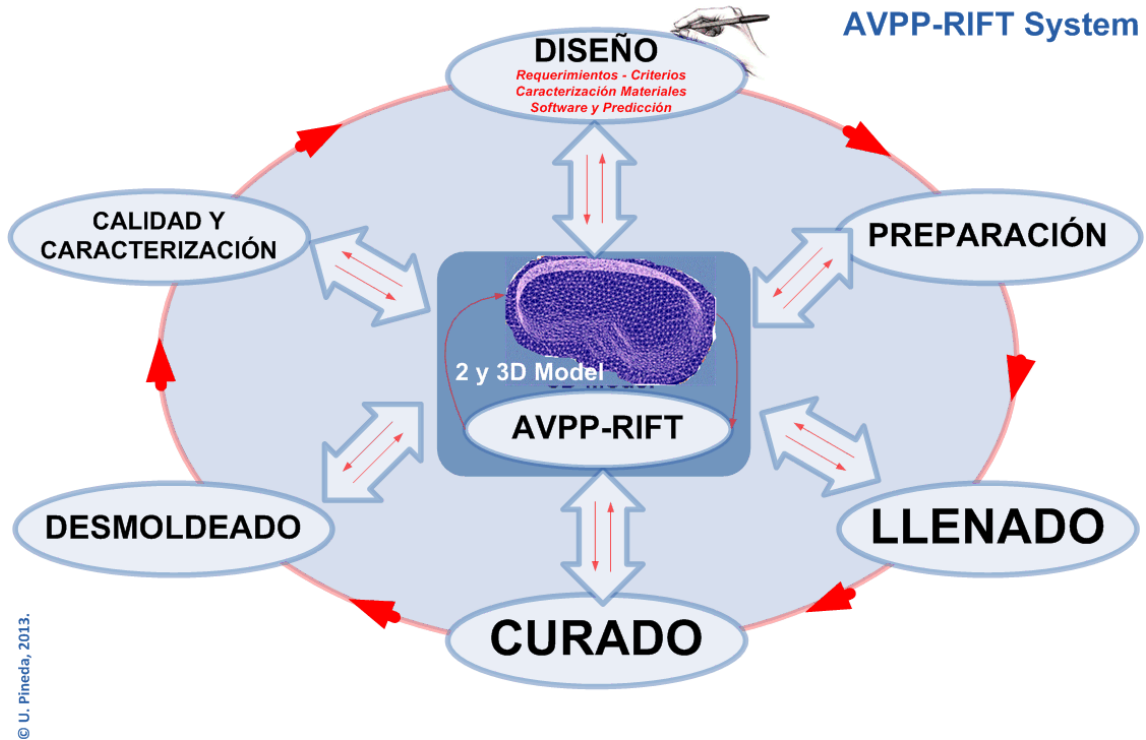


Figura 2.7. Concepción de AVPP – Set de Visión Artificial para el procesamiento de piezas bajo LCM-RIFT

Por tanto, el AVPP definido ha de integrar estas nuevas capacidades:

- Visión en diferentes espectros
- Ejecutar análisis metrológicos, calorimétricos, entre otros.
- Marcación de luz sobre el molde.
- Integración de información inter-etapa.
- Histórico de la variabilidad de parámetros-clave.

2.5.2 Implementación Tecnológica y Funcionamiento del AVPP-RIFT.

El AVPP ideal es de alto coste, ya que integra una cámara multispectral; y un proyector-láser. Con este tipo de cámaras al medir parámetros-clave en diversos espectros, se podría dar origen a nuevas técnicas de inspección y medida en fabricación RIFT. Sin embargo, la alternativa tecnológica, es el sistema preliminar de monitorización y metrología propuesto en este capítulo y esquematizado en la Figura 2.8. Se compone de una cámara infrarroja⁵⁶, un proyector de presentaciones⁵⁷, y un escáner 3D⁵⁸. Se adopta esta opción por su bajo coste respecto del AVPP ideal, y es la opción que se utiliza en esta tesis para la experimentación. Ver Figura 2.8.

Todas las cámaras se colocan arriba del molde, intentando aprovechar al máximo su campo de visión. Las ópticas asociadas a los dispositivos que conforman el set de VA han de poderse manipular para modificar el campo de visión y el enfoque del molde. Para el procesado de piezas de gran envergadura, se podrían utilizar distribuidamente, todas las cámaras necesarias asignadas por sub-áreas, que permitan abarcar toda la geometría espacial de la misma. Para este tipo de aplicaciones, las técnicas de estereovisión son de máxima aplicabilidad. Sin embargo, no se tratan en esta tesis. Ver Figura 2.8.

Adicionalmente, el proyector resulta de utilidad para desplegar “chorros” de luz en la escena (el molde), en posiciones nodales predefinidas, mostrando resultados, por ejemplo de la posición del frente de flujo simulado, las líneas referencia para posicionar las tuberías, etc.

El Set de Visión Artificial para procesar piezas bajo RIFT, tiene la capacidad de monitorizar las transferencias de calor debidas a la reacción química y exotérmica de los materiales en la etapa de curado. En muchos casos, la resina tiene que ser calentada, bien para facilitar el llenado del molde, o para acelerar el curado. Los gradientes significativos de temperatura en la etapa de curado implican estreses termo-mecánicos. Por consiguiente, el AVPP se complementa con una o varias cámaras térmicas (infrarrojas). Con esta cámara, la información de temperatura está disponible en cada pixel, nodo de la malla 3D, así se pueden mejorar apropiadamente las mediciones térmicas durante la etapa de curado.

⁵⁶ NEC - TVS500EXZ, LWIR (Long Wavelength InfraRed) longitud de onda entre 8000 y 12000 μm .

⁵⁷ SONY VPLESS

⁵⁸ VIVID910 – KONICA MINOLTA, compuesto por una cámara y un láser en rango visible.

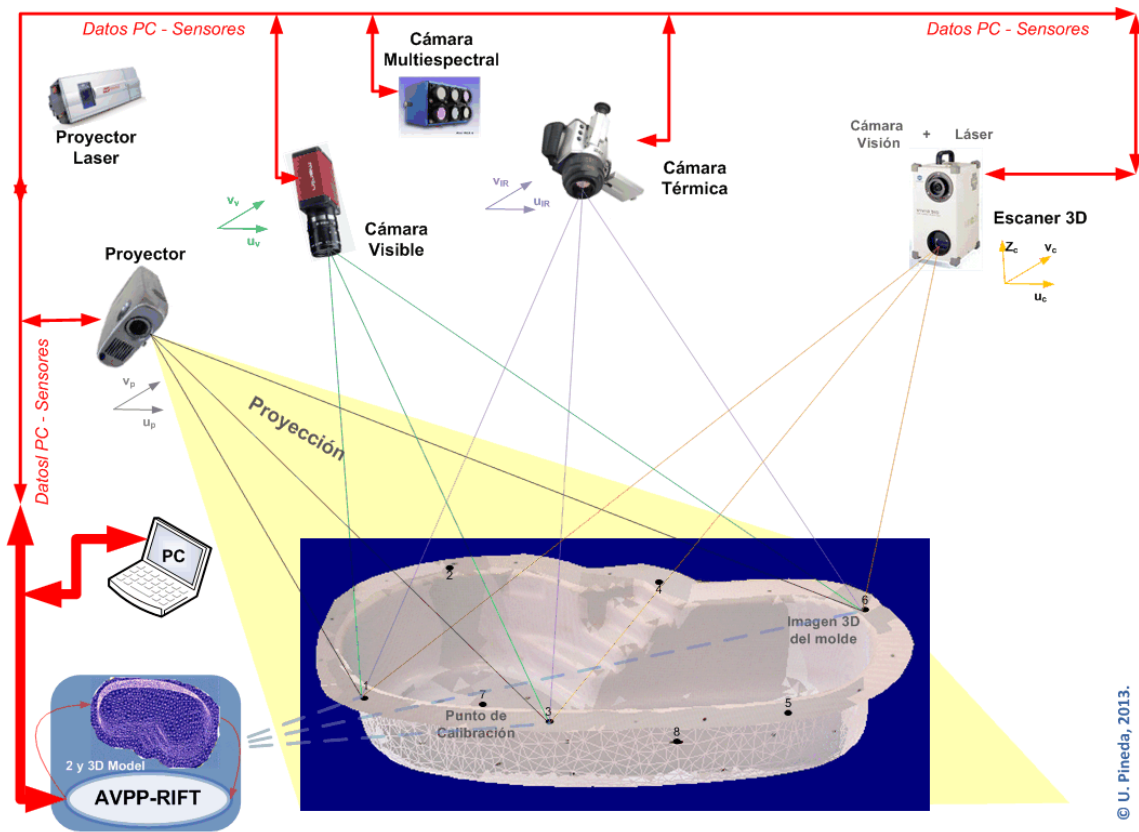


Figura 2.8 Set de Visión Artificial y sensores puntuales para el AVPP-LCM arriba del molde, bajo procesamiento.

Toda esta instrumentación de asistencia y medida, está conectada al PC u ordenador. Cada dispositivo tiene una tasa de transferencia definida, por lo que los tiempos de adquisición han de ser sincronizados. El AVPP-RIFT captura los datos de una y dos dimensiones, adquiridos desde los sensores, los envía al ordenador a diferentes velocidades de muestreo, los procesa ejecutando algoritmos que definen el marco computacional del AVPP, descrito con detalle más adelante. El AVPP está constituido de parte hardware y software (parte computacional).

En cualquier momento, puede estar enviando información para asistir el procesamiento de la pieza y/o recibiendo mediciones online de la evolución del mismo. Paralelamente, este enfoque podría ejecutar comparaciones con el modelo o modelos matemáticos externos que se quieran evaluar. Por ejemplo, modelos matemáticos de predicción del flujo, del ciclo térmico de curado, de preformado, etc. Ya que como puede verse en la Figura 2.8, el AVPP-RIFT ha de tener la capacidad de intercambiar información con cualquier tipo de software de diseño asociado al proceso.

Además, para el caso de fabricar la piscina a escala, mostrada en Figura 2.8, el proceso ha de disponer de los materiales consumibles y equipamiento asociado a fabricaciones tipo RIFT. Como mínimo, un recipiente para la resina, un calderín y una bomba de vacío. La estación de trabajo completa, es complementada por el molde.

2.5.3 Marco Computacional

El objetivo del marco computacional, es conseguir una malla 3D o 2D, según la geometría de la pieza, que sea común para todas las etapas de la fabricación, desde el diseño hasta la verificación, ver Figura 1.2. Primero que todo se ha de discretizar el molde, es decir, obtener una malla 2D o 3D asociada. Hay dos opciones: la primera digitalizarlo mediante un escáner-laser; y la segunda, por diseño computacional previo. Tal cual, se describe en el anexo XIII, obteniendo la malla 3D, que representa espacialmente la pieza a procesar. Usando este particular dispositivo, el error en la posición del pixel es del orden de milímetros para piezas de gran envergadura. Esto permite obtener una medición de la malla del molde de bastante exactitud, donde la variación del espesor podría llegar a ser medida con precisión razonable, como lo publican en [17]. En la literatura hay un sin número de técnicas que también permiten hacer esto [120], por ejemplo, mediante el uso de un laser de luz estructurada, o un patrón específico emitido por un proyector.

2.5.4 Calibración del Sistema.

Para visualizar o registrar la información del proceso, sistemática y ordenadamente, convirtiendo la malla 3D en un elemento universal a los componentes del mismo, es imperativo calibrar. Se calibran los datos que arroja la tecnología de monitorización disponible, mostrada en la Figura 2.8, a la realidad dimensional de los materiales a procesar. El procedimiento de calibración garantiza que todos los componentes del AVPP “puedan ver” el mismo sistema de referencia (malla 3D) del molde-pieza bajo proceso. De esta manera, se puede asegurar que dimensionalmente, el molde, el modelo 3D del proceso, las matrices de pixeles de las cámaras y los sensores puntuales, tienen una relación geométrica de correspondencia y proporcionalidad, tanto como que todos pueden ser visualizados y consultados por y desde dicha geometría, correspondientemente, lo cual constituye la vinculación entre la realidad y la virtualidad.

El tipo de calibración a ejecutar puede variar, de acuerdo a la geometría del molde-pieza. Se resaltan, dos casos de calibración:

- Para piezas planas-delgadas
- Y para moldes-piezas 2½D, o 2.5D.

En el **caso de piezas planas delgadas**, las referencias [201] y [8] explican el uso de la transformación proyectiva 2D, en otras palabras una *homografía*, que se ha de realizar con la finalidad de calibrar planos 2D con la matriz foto-sensible de cualquier tipo de cámara. Usando varios sets de VA para el mismo molde [17] (Ver Figura 2.8), todos y cada uno de ellos han de ser calibrados previamente. Para este propósito, algunos puntos son marcados en el molde, los cuales deben ser detectados, por todas las tecnologías involucradas en el AVPP: cámara visible, proyector, cámara térmica, etc. La calibración del molde por homografía queda definida por la ecuación (2.1):

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1) interesa encontrar los nueve elementos h_n que son los parámetros a ser estimados para calibrar o hacer corresponder, las coordenadas del mundo real y los pixel de la imagen. En la ecuación (2.1), la matriz \mathbf{H} es homogénea, $k\mathbf{H}$ también es una solución del problema. Por consiguiente, es posible dividir cada elemento de \mathbf{H} entre h_{33} para obtener una matriz de ocho elementos. Entonces, con $h_{33}=1$, la ecuación (2.1) puede ser escrita como muestra la ecuación (2.2),

Donde, x' e y' (en centímetros) son valores en el eje x y en el eje y para las longitudes del mundo real. Las coordenadas conformadas por x e y son los valores de pixel para cada imagen. \mathbf{H} es la matriz de calibración, cada h_n ha de ser calculado. Así, con el algoritmo 2D de la ecuación (2.2), se pueden ejecutar procedimientos de metrología en moldes LCM por medio de visión artificial.

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Para calibrar el sistema en el **caso de moldes-piezas 2½D**, como lo ilustra la Figura 2.9, el algoritmo denominado “algoritmo de los seis puntos” resulta útil. El procedimiento

de calibración requiere como mínimo 6 correspondencias entre $(u,v)_i$ y $(x,y,z)_i$ para estimar los 11 parámetros que permiten definir la asociación geométrica de los componentes del AVPP. Así pues, cuanto mayor sea el número de correspondencias, mayor redundancia puede ser obtenida en la información. Significa, mayor precisión en la estimación de los parámetros y por tanto la asociación de las diferentes mallas.

Este puede encontrarse formalizado en [201] y explicado en [6]. Además, para los interesados se adjunta en la presente, al final en la sección de anexos.

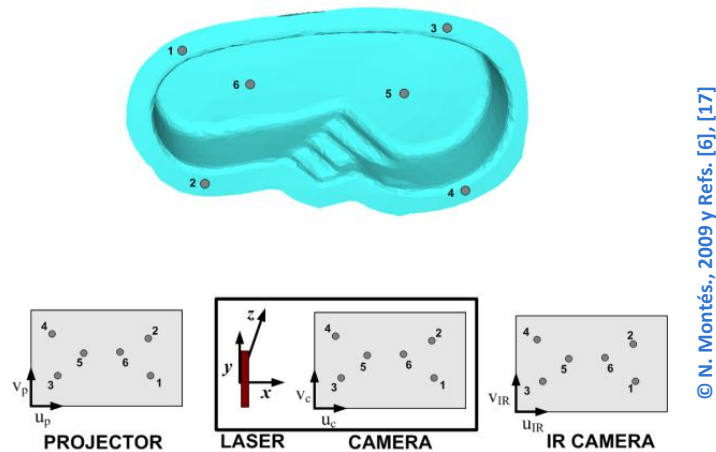


Figura 2.9. Sistema de Calibración [17]

Una vez calibrada dimensionalmente, toda la tecnología a la geometría de la pieza, se tienen posicionados y reconocidos espacialmente los materiales a procesar. Así queda establecido el emparejamiento entre realidad (pieza) y virtualidad (matrices de información 2D provenientes de cámaras y matriz 3D desde un escáner láser, métodos de triangulación u obtenido mediante algún programa de diseño). Solo resta refinar el vínculo computacional entre las matrices arrojadas por las tecnologías. Esto es, dado un mallado concreto del molde se ha de establecer la relación entre los nodos de los elementos finitos (FEM) predefinidos y los píxeles (imagen). Para esta labor, basta con ejecutar el algoritmo de asociación de cualquier matriz 2D de píxeles a la malla 3D del molde-pieza, se define en el anexo XII más adelante (También ver la Figura - Anexo XII.2), [6]. Este procedimiento puede maximizar correspondencia espacial y la precisión de la herramienta. No obstante, la resolución estará restringida al mallado tridimensional.

Resulta de interés también, la discretización de una geometría situada en el espacio, utilizando directamente los píxeles como nodos donde, la relación entre estos permite

definir elementos finitos, [6], con diferentes tamaños y formas. Su utilidad se focaliza sobre todo en la monitorización de piezas laminares. Ver anexo XI más adelante

2.6 Conclusiones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se propuso el uso de técnicas de Visión Artificial (VA) como la base del AVPP (Sistema de Monitorización y Metrología), para ejecutar monitorización completa y optimizada durante todas las etapas que conforman la fabricación de un composite, usando procesos LCM-RIFT. Por ello, el sistema se define computacional y tecnológicamente. Este enfoque surge como respuesta, a la pobre utilidad o contribución que actualmente las técnicas basadas en VA ofrecen a la detección de la variabilidad de los parámetros-clave, la predicción y el mejoramiento de las técnicas de monitorización de los procesos RIFT. Por lo último, se estableció la necesidad de definir conceptualmente los términos que fusionan el sistema AVPP en base a AV.

En particular, el AVPP-RIFT propuesto es validado como una herramienta que puede asistir la etapa de diseño-preparación del procesado de una pieza. Como ejemplo, una piscina a escala. Esto es, el digitalizador 3D malla el molde de la piscina o se obtiene desde el programa que permite diseñar la pieza por ordenador. Mediante el uso de esa malla y un algoritmo, se calculan los canales para el transporte de resina. Analizando la procesabilidad de sus resultados se obtiene el canal óptimo de distribución, para la geometría de la piscina. Estos canales son desplegados, bien mediante un laser o un proyector (podrían ser varios debidamente calibrados para piezas de gran envergadura), sobre el molde (como si fuese una pizarra) para su apropiada fijación. En las etapas de inyección, curado y post-curado, las cámaras de rangos espectrales visibles e infrarrojos proveen información acerca de la bondad del proceso.

AVPP-AV podría favorecer la comparación entre parámetros-clave del proceso real y los definidos en el diseño. Aporta además medios para cuantificar el impacto ante comportamientos no-esperados según parámetros de diseño, y sus afectaciones potenciales en la calidad final del producto. El AVPP facilita la fusión de los modelos computacionales y el escenario- real de la fabricación, a través de la malla referencia y con esto la posibilidad de conseguir modelos físicos más exactos que favorezcan el control predictivo, la repetibilidad, fiabilidad y automatización de esta clase de procesamientos.

El AVPP–RIFT permite vislumbrar una gran cantidad de aplicaciones en procesos RIFT, las cuales no fueron exploradas en este capítulo. Por ejemplo, podemos mencionar algunas de ellas:

- Durante la etapa de llenado, la cámara de espectro visible es muy útil. Para la caracterización del llenado, por ejemplo para la validación de algoritmos de estimación de parámetros como la permeabilidad, la viscosidad, análisis de saturación e impregnación, predicción-medición de micro/ macro porosidades, topologías óptimas del frente de flujo, estudios cinéticos de los frentes de flujo ante curados prematuros, reología de los materiales inmersos en la fabricación. Además, de poder evaluar, medir la ejecución de los procesamientos mediante índices estadísticos. Paralelamente, el uso del proyector o láser podría desplegar el frente de flujo óptimo sobre el molde, lo cual contribuiría visualmente a tomar medidas a fin de alcanzar el éxito del proceso, cuando se observa que el comportamiento no es el planificado.
- Durante la etapa de curado de la pieza, el uso de cámaras térmicas permite analizar gradientes de temperatura así tomar medidas ante curados heterogéneos en las piezas. El comportamiento cinético del curado de resinas podría ser analizado mediante cámaras multiespectrales. Este tipo de cámara podría ser integrado al AVPP en cualquier momento, siempre que el presupuesto lo permita. De la misma manera se podría buscar la medida de un parámetro asociado al grado de curado, el cual a su vez debería estar validado por métodos tradicionales, tales como la DSC.
- Durante la etapa de post-curado las cámaras térmicas pueden monitorizar la homogeneidad en la aplicación de temperatura arriba y abajo del molde. Esta etapa es muy importante en el proceso de fabricación ya que es la parte complementaria al curado, donde se consolidan las propiedades mecánicas características de los composites: gran resistencia y rigidez con peso ligero. Sin embargo, hay muchas industrias que lo omiten.
- Mediante el uso de AVPP se podría avanzar hacia sistemas de procesamiento automático de composites. Este tipo de sistemas, con AVPP puede disponer de gran cantidad de información, diversa y redundante si se desea, para el análisis, toma de decisiones y actuación. En este sentido, corregir perturbaciones en el flujo de resina, o controlar la homogeneidad de la temperatura o los flujos de calor generado por la reacción química durante el curado a lo largo de la pieza, dependen más de las limitaciones del estado del arte en actuadores, que de las capacidades de la monitorización en tiempo real. Con el advenimiento de nuevas tecnologías de

medición integradas al AVPP los planteamientos propuestos en este capítulo, tan solo abren la discusión sobre sistemas de control inteligente en procesos LCM-RIFT.

- Existe una línea de investigación que se basa en la monitorización de la salud de la estructura en servicio. Sobre esto ya existen múltiples trabajos, por ejemplo en [50], [51], [202] , [203]. Este tipo de monitorización, se realiza sobre la estructura a fin de hacer control predictivo de posibles fallos en servicio, garantizando el menor coste de mantenimiento. Así, combinando los dos enfoques, la monitorización durante el procesado de la pieza y su salud en servicio, además de permitir conocer qué pasa con la pieza desde la concepción hasta el final, potencia la ejecución de procesamientos más fiables.

Se pone pues, en perspectiva el ámbito de utilidad de este enfoque en procesos LCM-RIFT, sin pretensión alguna de cerrar el sistema, más bien con la intención de abrir un camino para el mejoramiento del mismo, por medio de técnicas de monitorización creativas e inteligentes que avancen hacia la eficiencia, y la integración de la información. Lo que podría habilitar muy pronto métodos de automatización que acoplen razonablemente los modelos y la realidad, considerando cada etapa, como parte del proceso global, es decir, como parte de un todo; no como partes aisladas o sin interacción con las demás.

Capítulo 3

Técnicas de Visión Artificial de Espectro Visible para el Análisis y Caracterización de la Mecánica del Flujo durante el Llenado de Moldes.

3.1 Introducción

Este capítulo está publicado parcialmente en el artículo << *Towards Artificial Vision And Pattern Recognition Techniques For Application in Liquid Composite Moulding Processes*>>, presentado y publicado en la Conferencia bi-anual, versión 5th ECCOMAS CFD-2010 (European Conference on Computational Fluid Dynamics), [8].

En este capítulo se tiene como objetivo explorar nuevas formas y/o proponer mejoras a las técnicas existentes para la medición de variables y parámetros relativos al comportamiento del flujo en refuerzos anisotrópicos. En especial, se trata experimentalmente la medida de dos parámetros-clave de proceso: la longitud de la zona de impregnación-saturación⁵⁹ y la permeabilidad de refuerzos anisotrópicos. Estos, en la actualidad despiertan interés científico e industrial.

La longitud crítica de saturación y la permeabilidad, juegan un papel importante en el procesamiento de piezas-composites. El primero en de la definición de las propiedades finales del composite, por su relación directa con la formación de zonas secas y porosidades durante la etapa de llenado, [7]. El segundo, ya que es un parámetro-clave

⁵⁹ Zona definida entre la zona mojada y la zona seca del frente de flujo de resina durante el llenado de moldes fabricados mediante procesos VIP

para la determinación y controlabilidad del tiempo de llenado del molde, es decir, inherentemente indica la facilidad con la que el flujo impregna la preforma textil.

Por tanto, para determinar espacialmente el flujo instantáneo y así medir estos parámetros característicos óptimamente, durante el proceso de fabricación. Resulta de gran utilidad el uso del marco computacional basado en VA definido en el capítulo 2. Aprovechando su capacidad de monitorizar y medir, sistemáticamente eventos visibles, con gran resolución espacial (precisión), campo de visión (de pequeños moldes a los de gran envergadura), además de su notable flexibilidad.

A través del presente se abordan los procedimientos y los detalles experimentales para la medición de estos dos parámetros.

3.2 Condiciones de Experimentación.

La Figura 3.1 muestra la instalación experimental apropiada para realizar las exploraciones que se proponen en este capítulo. La estación completa de trabajo quedo definida en el capítulo 2. A pesar de ello, en el presente trabajo, el AVPP funciona en configuración reducida, ya que para la obtención de los objetivos iniciales, resulta tecnológicamente suficiente con la cámara de espectro visible (Blanco/Negro – W/B) y un ordenador. Computacionalmente, quedarán definidos más adelante los algoritmos de medición desarrollados, los cuales vienen a enriquecer las capacidades ya descritas del AVPP.

Igualmente, la Figura 3.1 muestra los materiales consumibles usados para infundir una pieza y las condiciones de fabricación de la misma. Habitualmente, las industrias que fabrican composites no controlan la cantidad de luz sobre sus moldes, ya que no suelen ser parámetros críticos que afecten los procesos de fabricación. Al menos, no hay evidencia que indique lo contrario. En contraste, los sistemas de visión artificial están condicionados por la cantidad de luz que capturan.

Teniendo en cuenta lo anterior, los experimentos fueron desarrollados con luz no-controlada. Sin duda, no controlar la luz ambiente, supone un reto adicional, ya que pone a prueba los métodos generados. Sin embargo, esto mismo, motiva un análisis cualitativo-experimental del comportamiento óptico de los materiales consumibles que son usados en el procesamiento de piezas-composite. Como resultado de este, se

constata la alta reflectividad de la fibra de vidrio⁶⁰ usada como preforma de la pieza, y por tanto, la dificultad de medir cualquier parámetro de manera fiable.

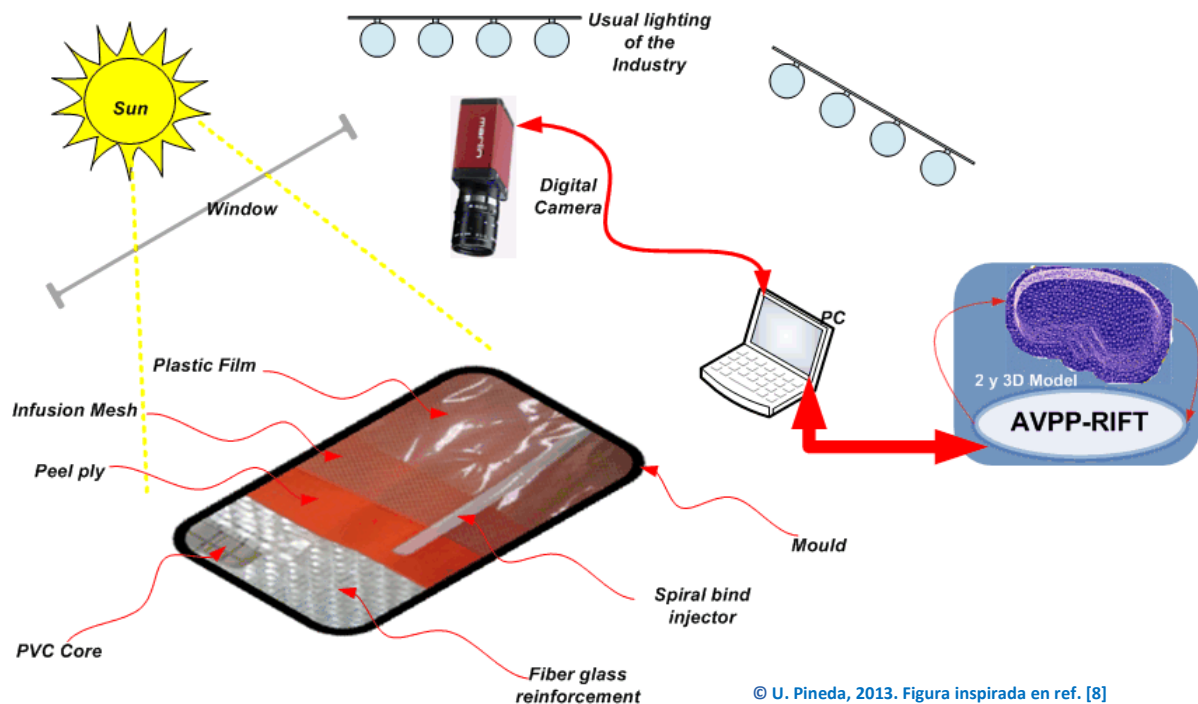


Figura 3.1. Materiales Consumibles en Condiciones Industriales y los Sistemas de Monitorización en base a VA.

Consecuentemente se pone a prueba, mediante una aplicación de control de la cámara, la modulación de la luz recibida por la óptica y CCD desde los tejidos de fibra de vidrio, intentando eliminar el ruido ambiental, y quedarse solo o con algo de información útil. Sin embargo, tan solo se logran atenuar las diferentes fuentes de ruido.

A pesar de lo anterior, y como evidencia experimental de este trabajo, la malla de distribución, también denominada malla de infusión (mesh infusión), una vez dispuesta sobre las fibras de vidrio, esta, se constituye en un estupendo difusor de luz. Lo cual, maximiza la captura de información foto-sensible del proceso y la utilidad del sistema de VA. Así, se puede adquirir fiablemente la propagación del frente de flujo, habiendo minimizado físicamente el ruido lumínico ambiental. En fabricación, la malla de infusión suele ser usada como última capa del preformado, y trabaja como un distribuidor de resina líquida.

⁶⁰ La fibra de vidrio está dispuesta bajo el contra molde plástico-transparente y flexible que actúa como contra molde.

Para los sistemas de visión artificial es esencial una gran homogeneidad de la difusión de la luz en la configuración experimental, así, como en el establecimiento de los niveles de saturación y el brillo adecuados en la cámara. Lo anterior, maximiza ambiental y técnicamente la posibilidad de obtener las mejores imágenes de la evolución del frente de flujo de resina. Por lo tanto, varios experimentos de inyección radial fueron ejecutados, hasta que se encontraron buenas condiciones de procesabilidad y de utilización de los métodos de medida basados en VA.

Como tests experimentales fueron fabricadas varias láminas cuadradas usando el proceso de fabricación VIP. Para el molde inferior, se usó una placa cuadrangular de cristal, cuyas dimensiones son (120x120) cm. Las láminas quedaron constituidas de resina epoxi y *una capa de tejido de fibra de vidrio* como refuerzo, con *orientación +90/-90*. Las imágenes han sido capturadas por medio de una cámara Marlin 145B2, la cual arroja imágenes con tamaño *1392x1040 pixeles*.

3.3 Uso de Técnicas de Visión Artificial para la Caracterización de Refuerzos de Fibra.

La permeabilidad es un parámetro en el procesamiento de composites que determina la facilidad con la cual el flujo de resina atraviesa la preforma de fibra, [204].

La medida de permeabilidad es un parámetro de convergencia entre investigadores, como requerimiento clave para diseñar y predecir el tiempo de llenado de piezas de composite, la velocidad y la posición del frente de flujo. En este sentido, la literatura científica propone diversas técnicas de medición que combinan métodos analíticos y experimentales para estimar la permeabilidad del medio poroso que conforma un refuerzo de fibras conductivas (carbono) o no-conductivas (vidrio, etc.), eléctricamente. Muchos trabajos plantean la estimación de la permeabilidad como un gran reto, ya que es un parámetro difícil de medir en preformas complejas, sobre todo cuando estas están compuestas de varias capas, con diversos materiales, geometrías y arquitecturas. La permeabilidad en efecto, es función de la arquitectura de la preforma y de la fracción de volumen de fibra [205], [206]. Además, la variación de la orientación de las capas y, las deformaciones inducidas afectan sustancialmente el valor de la permeabilidad.

Para el estudio de la permeabilidad, es importante comprender el comportamiento del flujo de resina según el tipo de refuerzo. De esta manera, cuando el refuerzo es isotrópico, la forma del frente de flujo en una inyección radial, propaga un círculo. En ese caso, la permeabilidad es la misma en todas las direcciones del espacio y una

medida unidireccional en una única dirección bastaría para determinar la permeabilidad asociada al refuerzo.

En contraste, cuando el refuerzo es anisotrópico, la permeabilidad no es la misma en todas las direcciones (trama y urdimbre) y por tanto, el comportamiento del flujo se caracteriza por desplegar una elipse en el plano, ante una inyección radial. Para este caso, se requiere caracterizar la propagación del flujo al menos en las dos direcciones principales, sin embargo, los flujos propagados en direcciones diferentes a las principales varían en función del ángulo.

3.3.1 Métodos Tradicionales de Medición de la Permeabilidad y Viabilidad de Mejoras.

Entre los métodos de caracterización, para la medición experimental de la permeabilidad, destacan las siguientes referencias [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214]. A través de los anteriores trabajos se puede extraer primordialmente que para caracterizar completamente un refuerzo de fibra anisotrópico, es necesario medir las permeabilidades principales, como se comentó en el párrafo anterior. Además, ya que la mayoría de piezas en procesos LCM suelen ser piezas de espesores pequeños, la permeabilidad en la dirección de espesor se puede considerar despreciable, y las permeabilidades en plano (trama y urdimbre) siempre han de ser evaluadas, [209]. Complementariamente, en [36], mediante un esfuerzo conjunto de miembros de la serie de conferencias FPCM, proponen un procedimiento a escala-laboratorio para medir la permeabilidad teniendo en cuenta las direcciones principales, para ello el requerimiento fundamental es preparar la preforma con las dimensiones de un molde rectangular y cortar las láminas de fibra de tal modo que la propagación del flujo sea paralela a la dirección a medir de la preforma de fibra. Como lo muestra la Figura 3.2 y Figura 3.3.

Los métodos habituales para determinar la permeabilidad hacen uso de las ecuaciones analíticas que suponen comportamientos ideales del frente de flujo. El mismo concepto es usado para la detección del frente de flujo real, aproximándolo a una línea recta, a un círculo o elipse perfectos, según sea el tipo de refuerzo utilizado. Por lo mismo, es bastante probable la acumulación de error en la medida experimental de los tiempos registrados bien mediante pulsadores-cronómetro manuales o posiciones predefinidas de sensores, previstos para la detección de la llegada del frente de flujo irregular, según posiciones prefijadas. En tanto, el comportamiento del flujo no es ideal y por tanto, no equivalente a las líneas rectas impuestas y marcadas o posicionadas previamente,

separadas entre sí equidistantemente, como lo muestran la Figura 3.2, Figura 3.4 y Figura 3.5. Dichos métodos ofrecen resoluciones espaciales y temporales restringidas, que afectan la medida de permeabilidad.



Figura 3.2. Preparación del contra molde con líneas de referencia para registrar el tiempo de llegada del flujo, ante propagaciones unidireccionales (izq.) y Figura 3.3. Molde de caracterización para la medición de permeabilidad (der.) [4], [9].

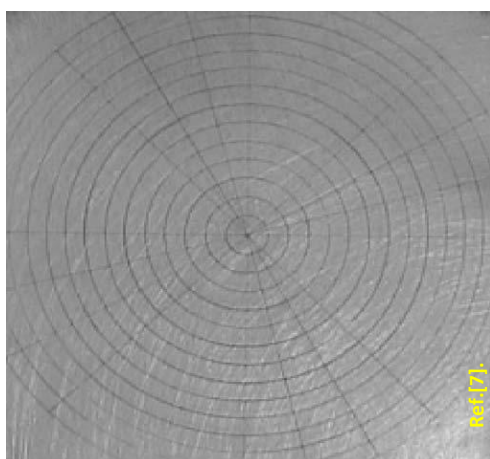


Figura 3.4. Círculos predefinidos para mediciones de posición del frente de flujo en propagaciones circulares [7].

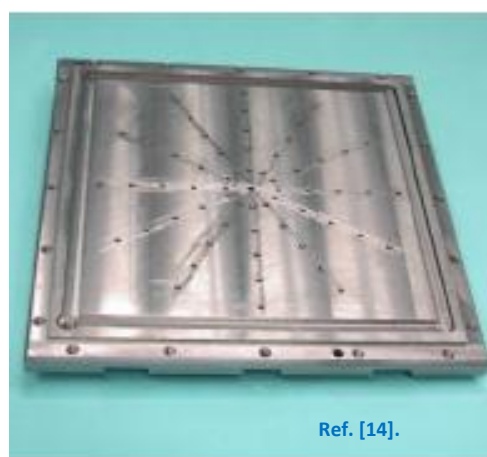
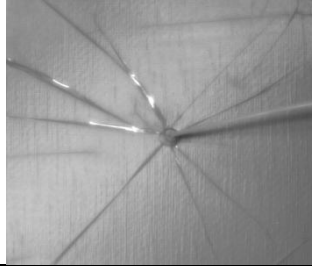
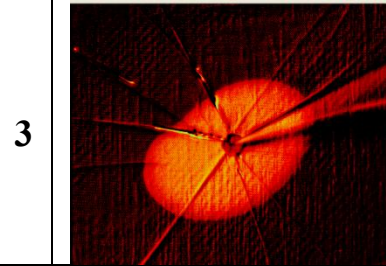
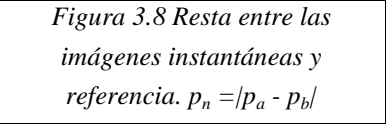

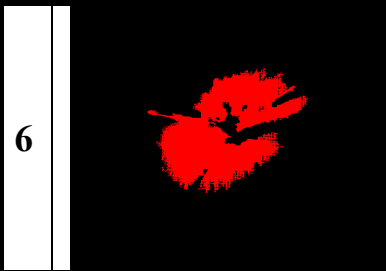
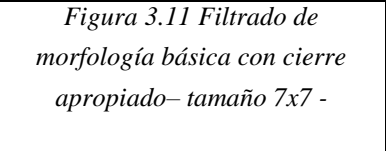

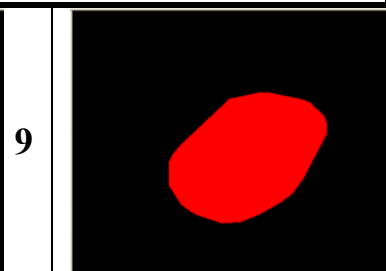
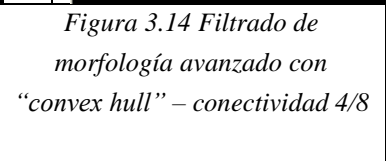
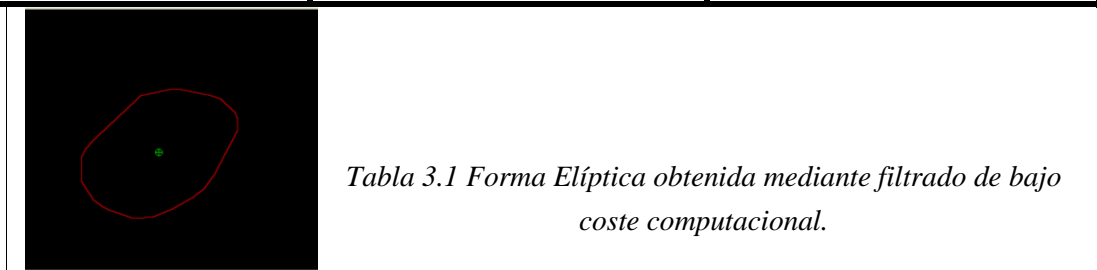


Figura 3.5. Molde inferior mecanizado con agujeros radiales al centro para medición de la permeabilidad mediante detección del frente de flujo por sensores de resistencia eléctrica [14].

3.3.2 Método Experimental para la Detección y el Reconocimiento de Patrones del Frente de Flujo.

La Figura 3.21 muestra la instantánea de la propagación del flujo elíptico durante un proceso de inyección de resina líquida para llenar el molde de una lámina cuadrangular.

1		2		3	
Figura 3.6 Imagen de referencia del molde, denotada como p_a		Figura 3.7 Imagen instantánea del molde denotada como p_b		Figura 3.8 Resta entre las imágenes instantáneas y referencia. $p_n = p_a - p_b $	
4		5		6	
Figura 3.9 Umbralizado hasta llegar objetos de contraste 45		Figura 3.10 Filtrado por morfología avanzada- pequeños objetos – 6 iteraciones – cuadrado – conectividad 4/8		Figura 3.11 Filtrado de morfología básica con cierre apropiado– tamaño 7x7 -	
7		8		9	
Figura 3.12 Filtrado de morfología básica– Erosión de objetos- tamaño 3x3 - 3 iteraciones- Hexágono.		Figura 3.13 Filtrado por dilatación de objetos – tamaño 7x7 - 3 iteraciones – Cuadrado		Figura 3.14 Filtrado de morfología avanzado con “convex hull” – conectividad 4/8	
10					
Figura 3.15 Filtrado de morfología básica con gradient gradient out – tamaño 5x5 - cuadrado		<p>Tabla 3.1 Forma Elíptica obtenida mediante filtrado de bajo coste computacional.</p> <p>© U. Pineda et Al, 2010. Ref. [8]</p>			

La Figura 3.22 es la representación 3D de la imagen que muestra la Figura 3.21. En la cual, la profundidad del plano es dada por el nivel de grises de los píxeles en las imágenes adquiridas. Por lo tanto, a primera vista se puede decir que existe una relación entre los niveles de gris de los píxeles de las imágenes adquiridas durante la propagación del frente de flujo y su mecánica de impregnación. Consecuentemente, evaluar los niveles de gris sobre el contorno formado por el flujo, resulta ser clave en su detección, en el reconocimiento de su forma, y en todas las mediciones de los parámetros a evaluar en el presente capítulo. No obstante, este enfoque podría ser aprovechado para estudiar fenomenologías asociadas a la etapa de llenado de piezas. La Tabla 3.1 muestra el procesamiento de cada imagen instantánea para una aplicación de los sistemas de visión artificial, en reconocimiento de patrones de flujo. Esta es un área novedosa en la que recién ahora, se empieza a investigar, en fabricación de composites. No hay evidencia de trabajos de investigación previos que demuestren lo contrario. Los experimentos fueron realizados para un refuerzo anisotrópico, constituyendo los niveles de gris para cada imagen como la referencia que monitoriza el flujo en cada instante de tiempo.

En esta sección también se presenta un algoritmo para detectar experimentalmente la forma del flujo elíptico, lo cual se describe en la Figura 3.17 y la Tabla 3.1. La Tabla 3.1 resume el reconocimiento de patrones experimentalmente y empezando con el molde aún sin resina Figura 3.6, y la evolución del frente de flujo en las figuras, Figura 3.7 a Figura 3.14 y su correspondiente contorno elíptico calculado (ver Figura 3.15). En la Figura 3.17 se muestran los pasos del algoritmo, para reconocer el frente de flujo elíptico o contorno formado por el flujo.

En este sentido, la Figura 3.6 ilustra un molde aún sin resina. Dicha instantánea se constituye en una entrada importante para el algoritmo ya que es la referencia del cómputo realizado. Los pasos son numerados en cada componente de la tabla, explicando la secuencia de los algoritmos implementados.

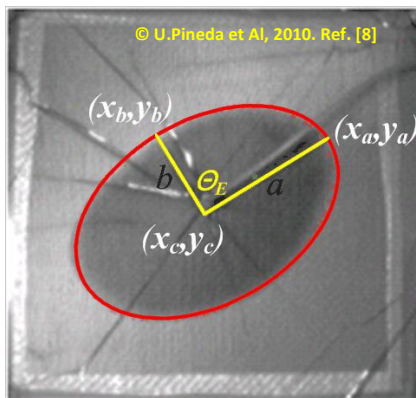
La etapa de llenado duró siete (7) minutos aproximadamente. Después del procesamiento de imagen, el algoritmo obtiene como salida, el contorno de la Figura 3.15. Se materializa, mediante la obtención de las coordenadas pertenecientes al frente de flujo de la resina.

Por consiguiente, se pueden monitorizar las coordenadas reales del frente de flujo en cada instante de tiempo, ya que el sistema de VA se calibró dimensionalmente, previo a la experimentación. Es decir, sobre ese frente-contorno reconocido se pueden ejecutar todas las mediciones que se consideren pertinentes. No obstante, la eficiencia del

cálculo depende del tipo de algoritmo de procesamiento de imagen que se seleccione. Lo cual, condiciona la optimización y eficiencia del reconocimiento del frente de flujo. El algoritmo descrito en la Figura 3.17 y que se ejecuta según Tabla 3.1 calcula contornos del frente de flujo bastante rápido y con un bajo coste computacional.

3.3.3 Medición de los Ejes Principales del Frente de Flujo Elíptico.

De acuerdo a la sección anterior, la cual garantiza la monitorización y reconocimiento espacial del contorno del frente de flujo, entonces, pueden ser medidos, la longitud de los ejes principales y el ángulo de orientación del flujo elíptico, como muestra la Figura 3.16. Esto viene motivado por la necesidad de medida de los ejes principales y el ángulo del algoritmo de optimización publicado en [215]. En color amarillo están dibujados o superpuestos ambos ejes, el eje mayor a y el menor b , en la correspondiente imagen instantánea. El cálculo de las coordenadas que representan la elipse-ajustada-promedio se dibuja con color rojo, justo alrededor del frente de flujo.



Donde,

θ_E , ángulo de orientación de la elipse

(x_a, y_a) , pareja ordenada que define el eje mayor.

(x_c, y_c) , pareja ordenada que define el centro

(x_b, y_b) , pareja ordenada que define el eje menor.

Figura 3.16 Relación entre parámetros principales de la elipse definidos por ecuaciones analíticas y la evolución del frente de flujo elíptico.

Las ecuaciones (3.1) a (3.5) muestran la formulación matemática que ha sido usada para calcular los parámetros principales de la elipse. Donde cada variable es definida en la Figura 3.16.

$$\theta_E = \text{atan} \left[\frac{y_a - y_c}{x_a - x_c} \right], \text{ calcula la orientación de la elipse.} \quad (3.1)$$

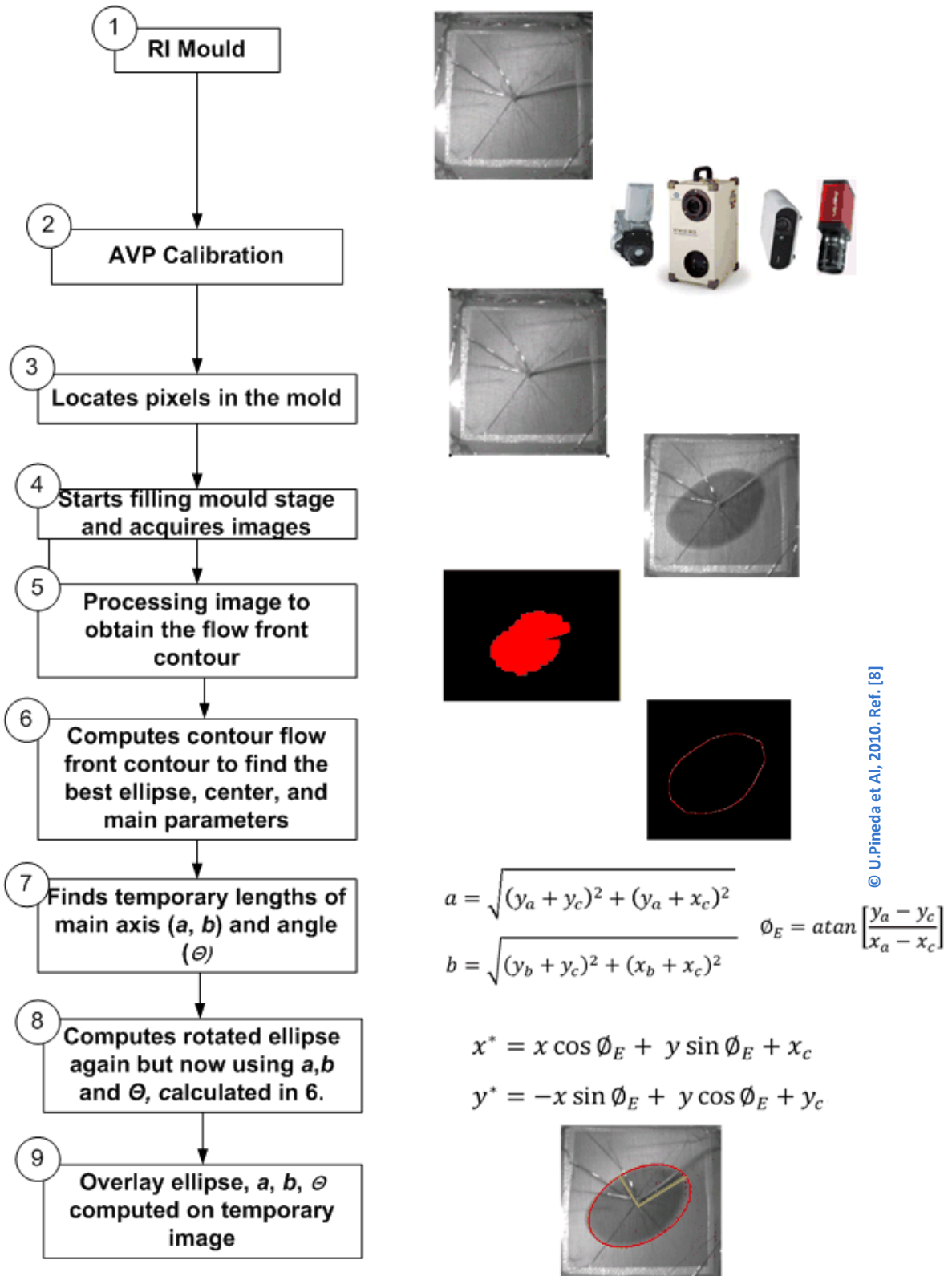


Figura 3.17 Pasos para medir los parámetros principales de la elipse mediante AVPP.

$$a = \sqrt{(y_a + y_c)^2 + (y_a + x_c)^2} ; \text{Calcula la longitud del eje mayor} \quad (3.2)$$

$$b = \sqrt{(y_b + y_c)^2 + (x_b + x_c)^2} ; \text{Calcula la longitud del eje menor} \quad (3.3)$$

Las ecuaciones (3.4) y (3.5) permiten calcular las parejas ordenadas o coordenadas x e y girados \varnothing_E grados respecto del eje horizontal x .

$$x^* = x \cos \varnothing_E + y \sin \varnothing_E + x_c ; \quad (3.4)$$

$$y^* = -x \sin \varnothing_E + y \cos \varnothing_E + y_c \quad (3.5)$$

Si se realiza la medición del ángulo y los ejes principales de la elipse, entonces se puede caracterizar la elipse. Esto significa identificar los parámetros principales del frente de flujo elíptico para un refuerzo anisotrópico: el eje mayor, el eje menor y el ángulo. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 3.17 y Figura 3.18.

Durante el tiempo de llenado, a , y b , incrementan la longitud en proporción al tiempo. Esto confirma la evolución expansiva del flujo elíptico. Además, la ratio a/b mantiene la proporcionalidad durante toda la etapa de llenado del molde, resultando constante la relación entre a , y b con el comportamiento del flujo en función del tiempo.

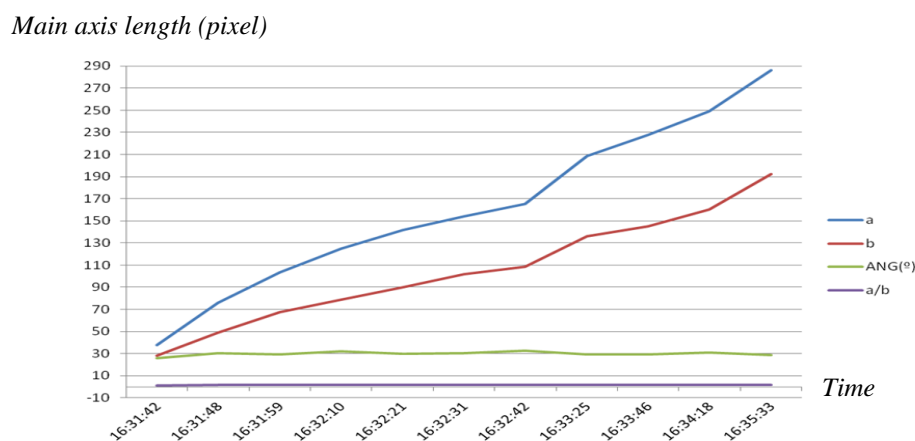


Figura 3.18 Evolución de los ejes principales de la elipse, ángulo de inclinación y ratio a/b

3.4 Uso de Técnicas de Visión Artificial en la Saturación del Frente de Flujo

3.4.1 Estudios de impregnación de resina en el frente de flujo durante la inyección. Definición de la Longitud Crítica L_s .

La calidad de las piezas de composite está fuertemente ligada al porcentaje de macro-micro poros que está contiene [45]. Los micro-poros son definidos como los espacios intersticiales entre los filamentos de los paquetes de fibra, mientras que los macro-poros son los vacíos entre los paquetes, [216]. Como la resina impregna a escala-dual el medio poroso llena los espacios vacíos dentro de las “mechas” de fibra. Consecuentemente, el frente de flujo macroscópico puede fluir hacia abajo, mientras que las paquetes continúan todavía saturando arriba, como muestra la Figura 3.19, tal como lo publicó [16].

Los investigadores han observado que la velocidad de infiltración influye en la formación y localización de los poros y zonas secas en la pieza [216], [217], [218], [219], [220]. Esto queda bien explicado al considerar dos tipos de fuerzas que inducen el movimiento del fluido a través del medio poroso de escala-dual: *las fuerzas viscosas y las capilares*.

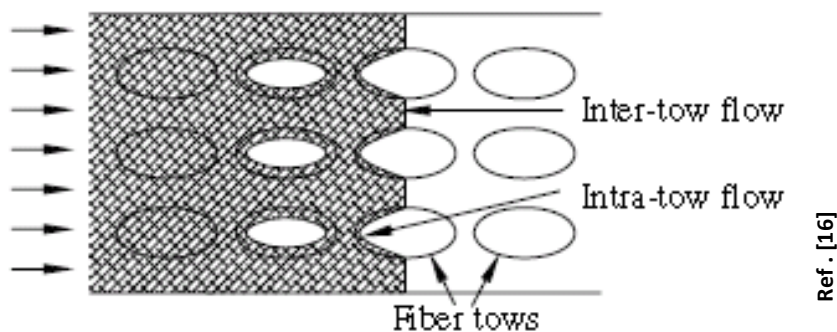


Figura 3.19 Impregnación retrasada en los paquetes de fibra comparada a la de otras macro-regiones.

El efecto de cada una de esas fuerzas que compiten en la formación de poros puede ser evaluado por un parámetro adimensional denominado número capilar (C_a). Los estudios experimentales de infiltración micros y macroscópica habían demostrado la existencia de un número capilar óptimo para minimizar el contenido final de poros en la pieza [218], [219], [220]. Esto significa que la velocidad de impregnación en cualquier

momento y la posición deberían ser idealmente los que minimizan el contenido en porosidad microscópica y macro-microscópica. Así que en [45] presentan una metodología numérica para optimizar el caudal de inyección y asegurar que el número capilar tiene un valor óptimo en el frente de resina durante el proceso de llenado para la técnica de fabricación RTM. Cuando las fuerzas capilares son dominantes (es decir, para la velocidad baja de la resina), porosidades macroscópicas aparecen entre los paquetes de fibra en los canales abiertos. La impregnación en el interior de los paquetes de fibra es más rápida que en los canales. Si las fuerzas viscosas dominan el flujo del fluido (es decir, para la velocidad de resina, alta), porosidades microscópicas aparecen dentro de los paquetes de fibra debido a la diferencia entre la resistencia viscosa de los paquetes de los filamentos y los canales abiertos, [45].

En el trabajo [7], presentan la evaluación del número de capilaridad como evidencia de una zona no-saturada, que se caracteriza por una longitud crítica que fue definida por [221] y redefinida esta longitud de acuerdo a la ecuación (3.6) en [222]. Ese trabajo de investigación presentó la expresión del número de capilaridad y la longitud crítica para flujos unidireccionales (1D) y bidireccionales (2D) asumiendo un medio poroso isotrópico. Como resultado, la descripción rigurosa y precisa del flujo en la vecindad del frente no puede ser tratada sobre la base de la Ley de Darcy [223], solamente. En efecto, esta sólo tiene en cuenta las fuerzas motrices que son debidas a la presión o a las ratios de caudal de flujo obligatorias.

$$L_{cv} = \frac{D_f}{C_a} \quad (3.6)$$

Donde C_a , es el número de capilaridad y D_f el diámetro de la fibra (*en metros*) o el poro situado a nivel del frente material que está sometido a la caída de presión (diferencia entre la presión de inyección y la presión en el frente de flujo) [7]. En [7] demuestran que el efecto capilar es importante tanto en inyecciones 1D como en las configuraciones 2D. Por ello, a través de la ecuación (3.6) se verifica que cuando aumenta el número de capilaridad, la longitud crítica del flujo disminuye considerablemente. Hay que señalar que a partir de un número capilar del orden de 10^{-4} , la longitud crítica del flujo llega a ser muy pequeña, lo que significa una transición hacia la saturación. El efecto de capilaridad depende de los parámetros de moldeo. Este efecto disminuye cuando el tiempo de llenado disminuye, es decir, cuando la presión o el caudal de inyección aumentan. También disminuye cuando disminuye la porosidad.

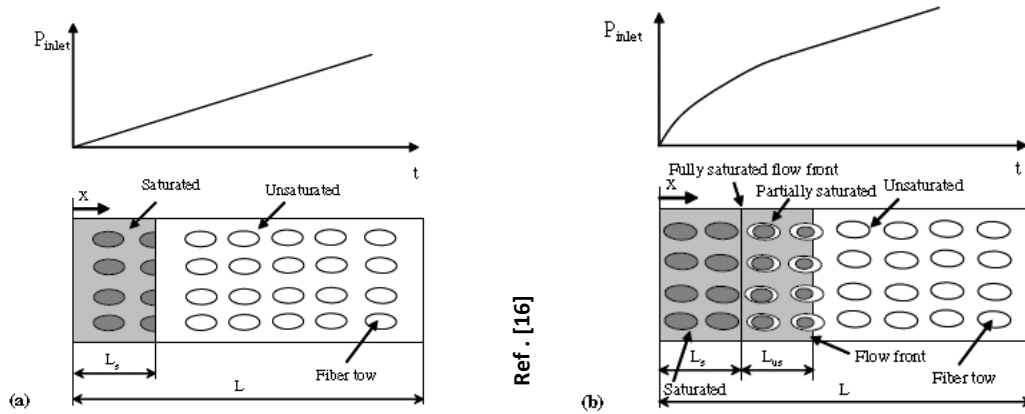


Figura 3.20 Presión y zona de saturación para (a) mats de fibra escala-única y (b) mats de fibra de escala-dual, [16].

La Figura 3.20 muestra que mediante un par de diagramas pictóricos las correspondientes regiones de flujo para medios de escala-dual y escala-única la zona de saturación tiene comportamientos diferentes. Para preformas de escala-única hay solamente una región de longitud L_s , ya que cada porción del tejido es siempre completamente saturada. Pero, para preformas de escala-dual hay dos diferentes regiones de flujo: una es la zona saturada-completamente de longitud L_s , y la otra es la zona parcialmente saturada de longitud L_{us} . En la industria, para impregnar refuerzos de fibra de escala-dual es común la práctica del sangrado, la cual consiste en dejar que la resina fluya por el venteo durante el tiempo suficiente para favorecer la saturación de los paquetes de fibra, [16].

3.4.2 Mediciones de la Zona de Flujo No-Saturada.

Este test ha sido ejecutado en las condiciones que describe la sección 3.2 más atrás. La malla de infusión ayuda a difundir la luz, haciendo de filtro natural, lo cual facilita la identificación entre resina y tejido seco. La presión de inyección fue de **0,5 bares**. Cuando el gradiente de presiones incrementa entonces la velocidad del frente de flujo incrementa y viceversa. A velocidades más altas se decrementa la zona no-saturada, es decir que, la longitud de la zona no-saturada, L_{us} es menor.

La Figura 3.21 muestra la porción de la forma elíptica que debe ser reconocida y medida, para ello se ilustra usando la línea de muestreo de color verde. La Figura 3.22 muestra el frente de flujo elíptico representado en vista de tres dimensiones (3D) constituyendo el nivel de grises en el *eje z*. Este tipo de representación puede dar información útil sobre la impregnación durante el tiempo de llenado.

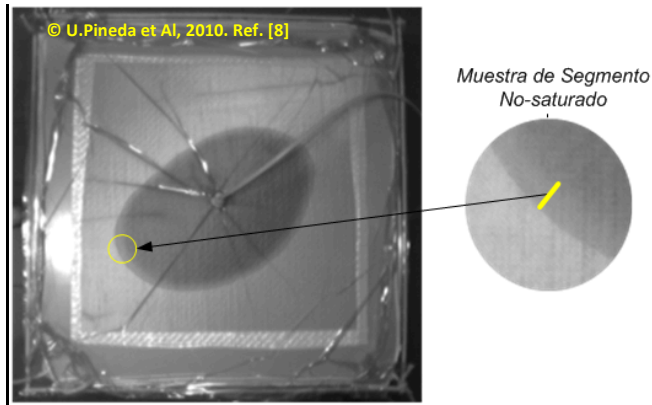


Figura 3.21 Zona no-saturada, estudiada en las cercanías del frente de flujo

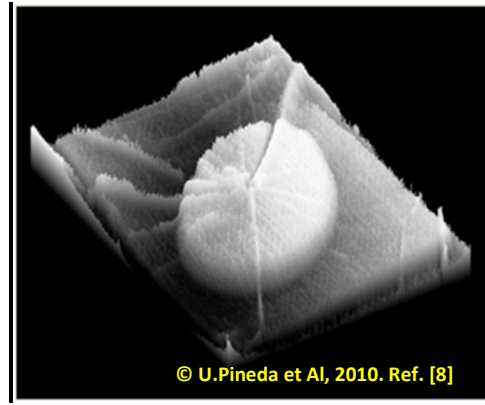


Figura 3.22 Vista tri-dimensional instantánea de la elipse

Medir la longitud de la zona no-saturada para diferentes ángulos como tiempos desde una inyección radial permite contribuir al análisis y comprensión del fenómeno físico de la impregnación del refuerzo en el frente de flujo de resina.

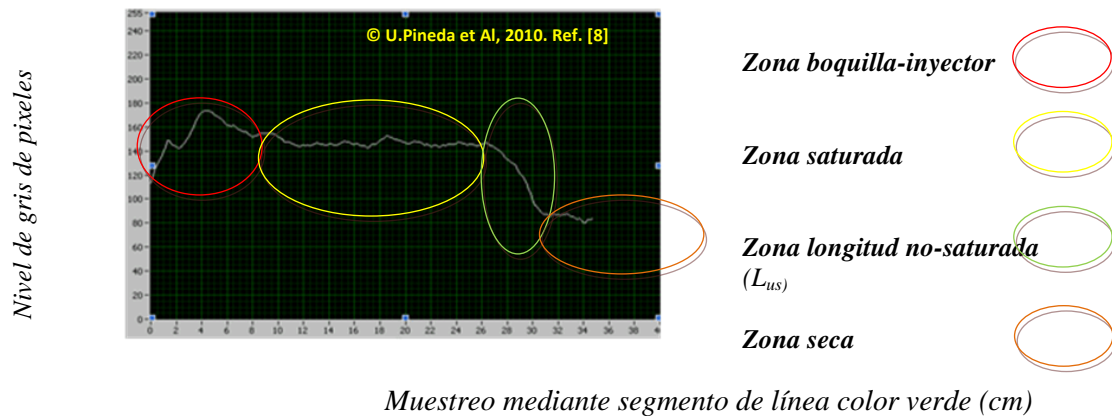


Figura 3.23 Corte de frente de flujo usando niveles de gris. Zonas de saturación, y medir L_{us}

El análisis de la Tabla 3.2, para el instante de tiempo 1300, también se ejecutó para dos instantes de tiempo diferentes en el mismo proceso de llenado de molde. Por tanto, se analizaron también los instantes de tiempo 348 y 725, como la variación de la longitud del flujo no-saturado mediante los pasos mostrados en la Tabla 3.2 y representados los resultados en la Figura 3.33.

La Figura 3.23 muestra el gráfico *Nivel de gris de pixeles = F (Longitud de radio-vector verde)*, donde también se ilustran las diferentes zonas de impregnación tal como se define en este test y en contraste con la literatura. L_{us} se mide diez (10) veces, alrededor del contorno instantáneo que bosqueja el frente de flujo correspondiente, teniendo en cuenta el barrido angular de la línea verde de muestreo, para la realización de los

perfiles de corte, para cada ángulo calculado (una línea verde o radio-vector gira desde 0° hasta 360° moviéndose a cada perfil angular de la elipse).

© U.Pineda et Al, 2010. Ref. [8]

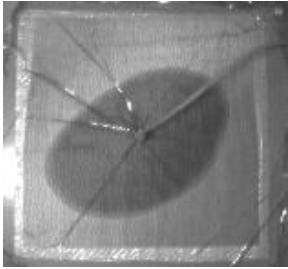
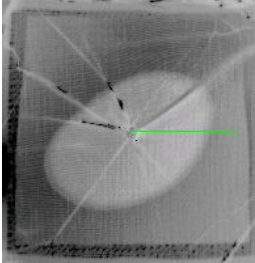
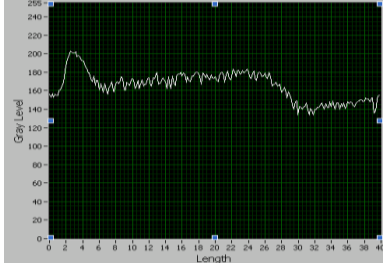
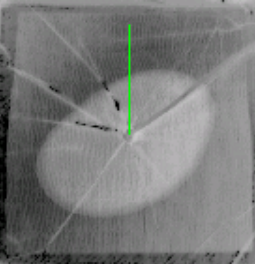
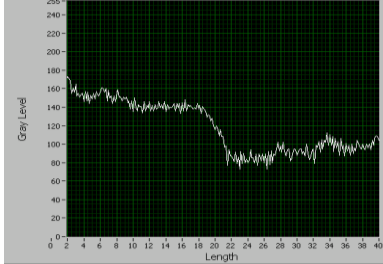
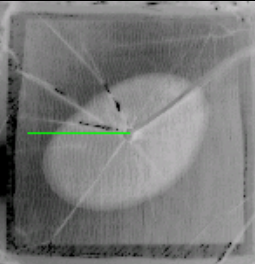
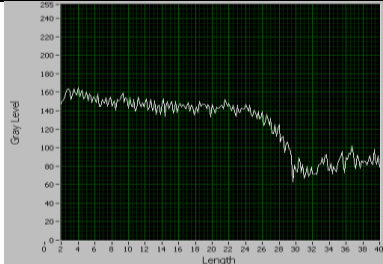
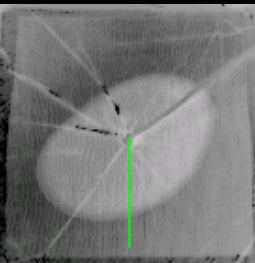

<i>Instante en el frente de flujo</i>	<i>Shortcut green line to θ</i>	<i>Gray level (0-255) profile against length (40 cm) for line to θ</i>
 <p data-bbox="256 1240 512 1317"><i>Figura 3.24 Instante 1300</i></p>	 <p data-bbox="603 801 826 837"><i>Figura 3.25 $\theta = 0^\circ$</i></p>	 <p data-bbox="1018 801 1241 837"><i>Figura 3.26 $\theta = 0^\circ$.</i></p>
	 <p data-bbox="603 1115 826 1151"><i>Figura 3.27 $\theta = 90^\circ$</i></p>	 <p data-bbox="1018 1115 1241 1151"><i>Figura 3.28. $\theta = 90^\circ$</i></p>
	 <p data-bbox="603 1429 826 1464"><i>Figura 3.29 $\theta = 180^\circ$</i></p>	 <p data-bbox="1018 1429 1241 1464"><i>Figura 3.30 $\theta = 180^\circ$</i></p>
	 <p data-bbox="603 1742 826 1778"><i>Figura 3.31 $\theta = 270^\circ$</i></p>	 <p data-bbox="1018 1742 1241 1778"><i>Figura 3.32 $\theta = 270^\circ$</i></p>

Tabla 3.2 Perfil de la longitud de la zona de flujo no-saturada tomando pequeños cortes a través del frente de flujo para el instante 1300 mediante la línea verde. Es un análisis off-line.

En la segunda columna en la Tabla 3.2, se ejecutó una función inversa la cual invierte los valores de los píxeles en la imagen de la Figura 3.24 lo que produce un negativo fotométrico de la imagen original. Este tratamiento permite mejorar el contraste para graficar las escalas de grises contra la longitud (cm), ver esto en la Figura 3.25, Figura 3.27, Figura 3.29 y en la Figura 3.31.

Los resultados se muestran en la Tabla 3.2, y en la Figura 3.33. Las gráficas $L_{us} = F(\theta)$ para cada instante de tiempo muestran la dispersión de L_{us} , relativa a la fenomenología física (gradientes de presión, naturaleza de la fibra, ruidos por arrugas en la bolsa plástica, entre otros), que afecta el contorno bosquejado por el frente de flujo.

El valor medio de L_{us} durante el instante de tiempo 348 es **3,88cm**. Para el instante de tiempo 725 es **4,48cm**, y para el instante de tiempo 1300 es **4,53cm**. El valor medio de L_{us} durante el llenado del molde incrementa como función de la distancia desde el inyector al frente de flujo no-saturado. Además, la medida de la longitud de saturación L_{us} es afectada por las variaciones de luz, la zona del frente de flujo donde se mida. La medición de L_{us} , para la pieza fabricada varía rango de entre 3 y 7,5cm., aproximadamente.

Longitud no-saturada (cm)

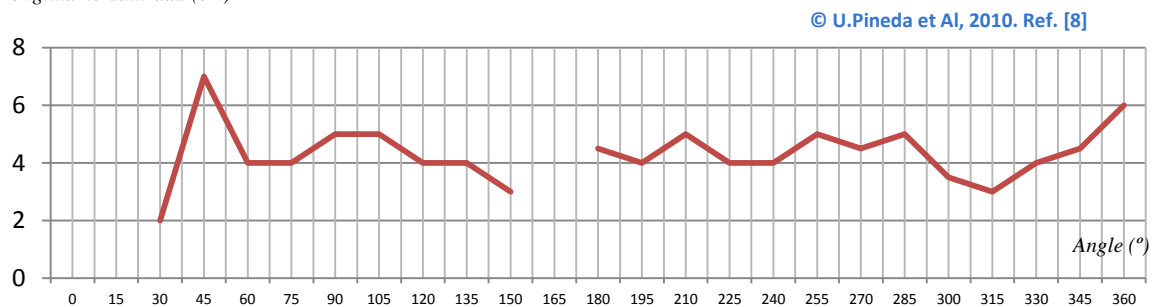


Figura 3.33 Gráfico de $L_{us} = F(\theta)$ para el instante 1300.

3.5 Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo, se propuso un método experimental basado en visión artificial de espectro visible para el análisis y caracterización de la mecánica del flujo de resina propagándose en refuerzos anisotrópicos de fibra, durante la etapa de llenado de moldes usando el proceso de fabricación de piezas mediante infusión de resina – VIP.

Los objetivos experimentales de este trabajo han sido alcanzados, después de haber conseguido que la malla de distribución de resina, actué como difusor natural del ruido

ambiental. Así, se pudo asegurar que la información proveniente del frente de flujo desde el molde, está 'limpia' para el sensor, con la finalidad de evitar procesamientos posteriores. Por tanto, la cámara digital que está integrada al AVPP definido en el capítulo 2, se calibra a las dimensiones reales del molde. Posteriormente, es posible monitorizar el molde, y con esto, el comportamiento espacial del frente de flujo elíptico. Mediante aplicación de control software, se ajustaron adecuadamente, el brillo y el contraste de la cámara, para llevar a cabo procedimientos metrológicos de calidad, bien para condiciones de laboratorio, como industriales.

Después, se presentó el método para la medición experimental de los ejes principales del flujo elíptico, al inyectar resina cuando la resina es inyectada en tejidos anisotrópicos. En este sentido, se presentó un método nuevo para reconocimiento de patrones de la forma del flujo de resina, calculando para cada instante de tiempo durante la etapa de llenado de una pieza. Adicionalmente, se midió la longitud de la zona no-saturada del frente de flujo L_s , usando la relación existente entre la escala de grises de los píxeles de las imágenes instantáneas capturadas por la cámara-CCD y la transitoriedad de zona de impregnación.

Estos métodos de medición podrían ser aplicados a los procesos LCM, con la finalidad de profundizar en el estudio de los fenómenos asociados a la impregnación, monitorizando la longitud no-saturada. La medición óptima de dicho parámetro, permite estimar y optimizar algunos parámetros de inyección (p.ej. velocidad del frente de flujo, presión, o estimar el contenido de porosidad durante el proceso de fabricación sin esperar a que cure la pieza).

Por tanto, los trabajos futuros podrían ser realizados tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- La visión artificial podría ser usada para estudiar la cinética del contenido de poros y las burbujas de aire, también. La zona de flujo no-saturado es el mejor indicador del contenido de poros de la pieza, actualmente. Este conocimiento es muy importante, para detectar los fallos durante el procesamiento de la pieza, por lo que podrían contribuir en la optimización de la inyección de piezas, avanzando en la medición del contenido de poros en tiempo real. Cuando el aire entra dentro del molde, ser capaces de detectar el contenido de poros durante el proceso, se traduce en dotar el proceso de medios no-destructivos para evaluar la porosidad.

3.5.1 Hacia la Mejora de la Medición de la Medición de la Permeabilidad en Refuerzos Anisotrópicos Mediante VA.

Hoy día, tecnológicamente es posible realizar mejores mediciones de permeabilidad, además usando instalaciones de monitorización y medida más versátiles. Mediante técnicas no-intrusivas, basadas en visión artificial, se pueden mejorar los métodos que habitualmente presenta la literatura científica. Al impregnar un refuerzo, con espesor predefinido, para la medida de permeabilidad se realiza registro de vídeo. Por lo que al finalizar el llenado del molde, la evolución del frente de flujo podría estar asociada a cada elemento finito en la malla de sensorización, la cual previamente debió haber sido calibrada dimensionalmente. Con lo cual, desde la imagen discretizada, al analizar el trasiego del frente de flujo de la resina, se pueden calcular los tiempos reales de llegada a cada nodo. Asimismo, la presión de inyección y la viscosidad (μ) son conocidos antes de lanzar el llenado de caracterización de la preforma, resolviendo la ecuación de Darcy.

En una simulación típica, se lanza el proceso de llenado del molde usando ecuaciones analíticas para obtener los tiempos de llegada del frente de flujo a cada nodo que compone los elementos finitos de la imagen virtual, usando una permeabilidad promedio. En la simulación inversa, se lanza el proceso de vaciado del molde usando imágenes reales, el resultado final podría determinar, por ejemplo la permeabilidad por cada elemento finito de la preforma, durante el proceso real. Con la ventaja adicional de medir el comportamiento del flujo, por ejemplo en cantos de la pieza. En este sentido, también podría ser aplicado el método ya publicado en [150], donde se realiza una estimación local de la permeabilidad usando técnicas de visión artificial, conforme se propaga el flujo de resina.

Las ventajas de métodos basados en visión artificial para la medición de la permeabilidad se reflejan especialmente en la cantidad superior de muestras utilizadas, la no-intrusividad, la dispersión gaussiana obtenida usando tantas muestras como elementos finitos se configuren en la malla (imagen con FE) de sensorización, la posibilidad de estimación de las permeabilidades correspondientes a cada elemento finito y consecuentemente la resolución configurable tanto como flexible de la medida.

Mencionadas técnicas basadas en visión artificial para la medición de la permeabilidad, resultan ser mucho más apropiadas en procesos LCM cuyo contra-molde es semi-rígido o flexible. Ya que la preforma es sometida a presiones, que no están distribuidas de forma homogénea a lo largo de esta. Así pues, la profundidad de la cavidad es función

de la presión local en el molde, modificando la fracción volumétrica y con ello la permeabilidad, [26]. En esta línea, muchos investigadores han intentado modelar el comportamiento de la permeabilidad bajo presión. En [224] se presenta uno de los primeros trabajos que analiza la problemática de los procesos LCM con variaciones en la presión local. En este trabajo se presentan resultados experimentales preliminares del efecto que tiene el cambio de presión. La aplicación del vacío provoca una reducción inicial del espesor. La llegada del frente de flujo tiene un efecto lubricante, produciendo un cambio en la compactación. Cuando el frente de flujo pasa sobre la posición monitorizada, la presión sobre la lámina se reduce. Esto implica que, para obtener una buena caracterización de la permeabilidad a fin de utilizar la ley de Darcy, es necesario tener en cuenta, primero la compactación de la preforma en función de la presión local, obteniendo la permeabilidad en cada zona, y después, contemplar las diferentes presiones existentes entre las zonas secas y mojadas. En la literatura existen varios trabajos que modelan todos estos efectos, [225], [226], [227], [60]. Aun así, aunque una simulación precisa requiere de un modelo claramente no isotrópico, se suele aceptar como aproximación a los resultados reales de este tipo de procesos, la permeabilidad promedio, que se le suele denominar, permeabilidad efectiva, "*effective permeability*", [225]. De hecho, en procesos RTM, donde el contra-molde es rígido y por tanto el espesor es controlado, hasta ahora y con el objetivo de predecir el llenado de una pieza, parece haber sido suficiente la obtención de una permeabilidad promedio que pueda ser utilizada para simular mediante el uso de la Ley de Darcy.

De acuerdo a todo lo anterior, las técnicas de VA podrían aportar mejoras a los métodos de medición de la permeabilidad que reporta la literatura, especialmente en precisión, en resolución, en sistemática, en cantidad de muestras, en coste de mano de obra y en tiempo de ejecución. Además, en llenados radiales (refuerzo anisotrópico) asegurando el espesor (fracción de volumen de fibra constante), mediante un único test se pueden estimar las permeabilidades principales y todas las efectivas que hagan falta. Si se quiere hacer análisis de error, tal como propone [36], se podrían hacer tres o más tests, resaltando que en cada test es posible determinar óptimamente la caracterización del tejido y no como en el método [211], en el cual se requiere un test por cada dirección del refuerzo. La capacidad que aporta la VA, es justamente la medición sistemática de espacios-longitudes recorridas por el flujo, lo que actualmente no hacen los métodos que reporta la literatura, ya que dependen de distancias inspeccionadas manualmente. Por tanto, la medida de los ejes principales del flujo elíptico, es tan solo una muestra de las nuevas habilidades que supone contar en un banco de medida de permeabilidades, con VA para la detección del flujo. Las herramientas basadas en VA calibrada tienen la habilidad de medir cualquier distancia entre el foco de propagación y el frente de flujo

instantáneo, ya que se tienen las coordenadas espaciales de cada instante de tiempo. En este sentido, las posibles mejoras en el método de medición de distancias del inyector al frente de flujo instantáneo, en base a VA, en una dirección (enfoque unidimensionales, refuerzos isotrópicos) o en todas las direcciones posibles (p. ej. enfoque bidimensional, refuerzos anisotrópicos), tiene aplicabilidad directa en la caracterización de mats y tejidos, correspondientemente. Así, usando el enfoque basado en VA que se presenta en esta sección, también pueden ser mejorados los métodos de medición propuestos por ejemplo en [36], [7], [4].

Capítulo 4

Técnicas de Visión Artificial de Espectro Infrarrojo para la Monitorización de la Evolución del Curado de Piezas-Composites de Matriz Termoestable.

4.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo, es proponer mejoras a las técnicas de monitorización de la transferencia de calor para la estimación del grado de curado durante procesos de polimerización, disponibles para piezas fabricadas bajo procesos RIFT. En este sentido, se exploran las técnicas no-intrusivas basadas en tecnologías de visión infrarroja, con la finalidad de superar las restricciones dimensionales que presentan las técnicas de monitorización cero-dimensionales, tradicionalmente asociadas a la medición o evaluación local-puntual (ver sección 1.2.3.1.7), de la transferencia de calor por zonas del molde, como consecuencia de su curado. Por tanto, se avanza hacia la estimación de parámetros-clave que intervienen durante la evolución del curado de las piezas-composites, incrementando la resolución espacial, temporal y el campo de inspección, a la vez que se reducen los costes asociados a mano de obra por monitorización.

Por tanto, este capítulo se divide en cuatro partes, siguiendo el orden cronológico de las fases seguidas en la búsqueda del objetivo final. En la primera parte, se evalúa la habilidad de la termografía infrarroja en comparación a sensores cero-dimensionales para ejecutar mediciones de transferencia de calor durante procesos exotérmicos,

programables mediante Heat PAG Mould (basado en una célula peltier), que actúa como una pieza en proceso de curado. También se analizan: los modelos físicos de transferencia de calor que modelan la respuesta de los sensores infrarrojos y conductivos-convectivos, valorando principalmente sus ventajas y desventajas como técnicas de monitorización en la fabricación de composites. En base a los resultados experimentales, se evidencia y analiza la influencia de la emisividad en la precisión de las mediciones térmicas mediante espectro infrarrojo, y por tanto la necesidad y requerimientos para determinarla, a fin de obtener repetibilidad y veracidad en las mediciones de temperatura.

En la segunda parte, se presenta un método experimental de calibración in-situ basado en termografía infrarroja combinada con los sensores de flujo de calor, utilizados en la comparación de la primera parte. Las fabricaciones experimentales son monitorizadas mediante el AVPP del capítulo 2. Durante la etapa de curado, mediante la cámara infrarroja se adquieren imágenes termográficas con la cadencia de la evolución térmica de la pieza curando. Se aplica la calibración in-situ, a cada termografía, así, medir la transferencia de calor bidimensional de la pieza. De esta manera, se convierte cada pixel de la cámara en un sensor de flujo de calor puntual, con mayor resolución espacial, que la aportada por los sensores cero-dimensionales habitualmente usados para estos menesteres, durante la fabricación de composites. De esta manera, la medición de flujos de calor mediante termografía muestra su capacidad visualizar variaciones de transferencia de calor a lo largo del composite, lo cual sugiere según la literatura no ser nada conveniente para las propiedades mecánicas finales de las piezas. Por lo que, este método puede resultar de utilidad para medir la transferencia de calor de piezas de gran envergadura durante su fabricación. Finalmente, se presentan los algoritmos de calibración, que permiten medir el flujo de calor liberado instantáneamente por una pieza de composite, mediante cámara térmica infrarroja.

En la tercera parte, se compara la capacidad y precisión de la termografía respecto de la técnica con sensores cero-dimensionales, para evaluar el grado de curado de piezas-composites. En particular, se analiza el proceso de curado de tres piezas, de matriz termoestable y refuerzo de fibra, y sus repeticiones. En total, tres pares de piezas, cada una con 2, 4 y 6 capas de fibra, respectivamente. Durante sus etapas de curado, se mide en zonas cercanas al inyector y al venteo, su liberación de energía térmica, mediante dos técnicas de evaluación: conductiva e infrarroja. Este proceso de monitorización-medición de dichas zonas, se ejecuta simultánea y respectivamente, mediante un par de sensores de flujo de calor (ver sección 1.2.3.1.7) y un par de pixeles (libremente escogidos, se les calcula el calor radiativo instantáneo), lo más cercanos posible, al área

de influencia de los sensores locales. Basados en ambas técnicas, finalmente, se determina un valor asociado al grado de curado (DoC – Degree of Cure) real de los materiales en proceso de polimerización. En el transcurso de este, se muestran los algoritmos usados para calcular el indicador de grado de curado – DoC asociado a ambas técnicas de sensorización.

En la cuarta parte, se propone un novedoso método no-intrusivo de monitorización del grado de curado en función del tiempo durante la fabricación de piezas de matriz termoestable y refuerzo fibroso. Esta técnica se basa en la detección y medición del grado de curado de las diferentes zonas de la pieza completa y con esta, visualizar y analizar las variaciones del curado a lo largo esta, mediante un mapa bidimensional del curado; el cual, es cambiante con la evolución de su polimerización. El entendimiento de esas variaciones es importante ya que la aparición súbita de picos de liberación de calor, pueden acelerar la degradación de la matriz y consecuentemente las prestaciones de la pieza final. Tales estreses internos pueden también inducir deformaciones en el composite. Por lo tanto, con la finalidad de mejorar la información de las herramientas de monitorización disponibles actualmente para medir esta fenomenología, se aprovechan las técnicas generadas en las anteriores secciones de este capítulo y se generaliza esta técnica para la monitorización de grado de curado bidimensional de campo-completo, haciendo uso de una cámara térmica y dos sensores de flujo de calor. Esta técnica, resulta flexible y versátilmente aplicable para la monitorización del curado de piezas pequeñas y de grandes dimensiones. Este capítulo ha sido parcialmente publicado en [11], [12], [13], [10].

4.2 Justificación.

El calor liberado durante el curado de las piezas-composites, puede producir significativos gradientes térmicos y picos de temperatura de acuerdo a la geometría de la pieza. Esto en sí mismo, podría generar estreses residuales que pueden tener un efecto adverso en la calidad y en las propiedades finales de la pieza [228]. Además, las temperaturas de procesamiento y el grado de curado instantáneo (DoCi) deben ser controlados óptimamente dentro de un bucle cerrado, para que los gradientes térmicos y los defectos o problemas comentados en la sección 1.2.1.5 sean minimizados, así, encontrar el proceso óptimo que maximice la obtención de las mejores propiedades mecánicas de las piezas finales.

En contraste, la literatura técnica y científica, focaliza, sobre todo en técnicas de monitorización de la polimerización de pequeñas muestras. Habitualmente estás

técnicas son trasladadas a piezas, pero no siempre tienen la capacidad de garantizar los mejores resultados. Ya que, las técnicas de inspección local, resultan eficientes para el estudio de pequeñas muestras, o a nivel de laboratorio, permitiendo monitorizar óptimamente la variable-parámetro asociada al curado, [229]. Con cierta frecuencia, los ciclos térmicos de curado son diseñados mediante la técnica Calorimétrica de Escaneado Diferencial (DSC), [32], [33], la cual mide la cinética de curado de una muestra de la matriz termoestable mediante monitorización del flujo de calor generado durante su curado. Esta técnica es ampliamente usada en la verificación de la operatividad de la matriz termoestable y la determinación de los parámetros de curado y post-curado, tales como la energía total de la reacción, la velocidad de la reacción, el grado de curado (DoC), etc.

Inconvenientemente a la evaluación del curado de piezas, los test DSC están diseñados para una muestra de resina de unos cuantos miligramos, y los análisis cinéticos no tienen en cuenta el efecto de masa que es observado cuando se necesitan, cantidades más grandes de resina termoestable. Como es el caso habitual de las piezas, donde se requieren de gramos a kilos de resina. Este efecto debería ser considerado en el cálculo de la cinética de curado, ya que tiene una gran influencia sobre los picos de temperatura y de calor liberado. Desafortunadamente, esto no puede ser observado o testeado usando el análisis comúnmente conocido a través de una DSC.

Paralelamente, en la actualidad, el éxito de la etapa de curado en una fabricación en marcha depende fuertemente de la experiencia del operario, [18], ejecutando el mismo proceso, lo cual le ha llevado a optimizarlo por prueba-error.

Adicionalmente, los cambios de las condiciones de fabricación y la incorrecta manipulación de la resina pueden generar diferentes comportamientos de curado en la pieza [34]. Igual sucede, con la variabilidad dimensional y geométrica de ciertas características de la consolidación del moldeado, que se evidencian posteriormente durante el curado, y que pueden estar relacionadas con la variabilidad térmica, a lo largo de la pieza. Por ejemplo: la heterogeneidad del espesor, los cantos, las curvaturas pronunciadas, etc. Consecuentemente, los resultados de la caracterización DSC, difícilmente pueden ser extrapolables-iguales por si mismos a diversas zonas de la estructura-composite bajo proceso-estricto de monitorización local.

Es decir, que si se traslada la misma técnica o grupo de técnicas cero-dimensionales usadas para caracterización, requiere de distribuir múltiples sensores a lo largo y ancho de la pieza bajo procesamiento, usando algún criterio experto. Dichos sensores, pueden operar embebidos (intrusivos, dentro de la preforma), aunque otros (ligeramente

intrusivos) operan sobre el molde, y en contacto material. Con lo anterior, se evidencia por tanto que durante la fabricación, la fiabilidad y la eficiencia en la detección de flujos de calor provenientes desde cualquier área de la pieza, están restringidas por las características de los sensores, particularmente, por su forma geométrica, sus dimensiones y su ubicación en, o sobre la pieza en proceso de consolidación.

La revisión de la literatura incluida en capítulo 1 y 2, la observación de las prácticas habituales en esta industria, sumadas las actuales restricciones técnicas de la monitorización tradicional, todo ello conduce a decir, que para la etapa de curado en el procesamiento de piezas-composites, hace falta avanzar en técnicas de monitorización mejoradas, que permitan medir completa y eficientemente la evolución del curado de las piezas. En consecuencia, el aprovechamiento de las capacidades de las tecnologías de medición de campo completo (2D) mediante visión infrarroja, debidamente aplicada, es un camino para explorar, en procesos LCM-RIFT a través de este capítulo.

4.3 Análisis de los Diferentes Modos de Transferencia de Calor para la Estimación del Grado de Curado (DoC)

Para un cuerpo dado, existen un intercambio de energía entre este y los cuerpos cercanos al mismo. Si dicho cuerpo es aislado, el intercambio de calor se realiza con el aire que lo acoge. Hay tres modos de medición de la transferencia de calor: mediante técnicas por conducción, convección y radiación.

La técnica por conducción necesita que el sensor este en contacto con el cuerpo a medir. Este sensor mide la cantidad de energía térmica que pasa a través de él. Esta tipo de medición está gobernada por la siguiente ecuación:

$$q_c = k(T_c - T_s) \quad (4.1)$$

Tomando como referencia el sensor, T_s , es la temperatura sobre la superficie del cuerpo, T_c es la temperatura en la superficie del sensor que no está en contacto con el cuerpo (por ejemplo la superficie superior del sensor) y k es la conductividad térmica del material del sensor. Entonces q_c es la cantidad de la energía térmica que pasa a través del área del sensor.

Para la técnica de medición por convección, la principal diferencia respecto de las técnicas de conducción es el medio que es cruzado por el intercambio de calor. En este caso, el medio se comporta como un fluido, para lo cual el aire cumple este comportamiento. Focalizando nuestra atención en el medio de aire, la ecuación que

gobierna la medición es similar que en el intercambio de calor por conducción (4.1) esto es;

$$q_{cv} = h(T_s - T_A) \quad (4.2)$$

Donde T_A , es la temperatura ambiente, h , es el coeficiente de convección del aire. Entonces q_{cv} es la cantidad de energía que pasa a través de un área especificada en el medio de aire.

La técnica de medición por radiación está basada en la medición de la energía emitida o la pérdida de calor por radiación, por el cuerpo en una banda de longitudes de onda predefinida. La energía emitida puede venir desde dos fuentes principalmente, la energía emitida por el cuerpo y la energía reflejada en la superficie del cuerpo, proveniente de cuerpos o superficies vecinas. Para minimizar la energía reflejada, hay dos caminos posibles. El primero es cubrir la superficie del objeto mediante un material delgado –conductor que presente una emisividad alta o el segundo es, obtener una curva de calibración mediante un ajuste lineal como propuso el trabajo de la referencia [230]. En cualquier caso las mediciones de radiación son gobernadas por la siguiente ecuación:

$$q_{IR} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_A^4) \quad (4.3)$$

Donde la ε es el coeficiente de emisividad (para un material absorbente ideal, es decir un *cuerpo negro*, ‘*black-body*’, su emisividad es igual a la unidad; y es igual a menos de la unidad para superficies de objetos reales, los cuales no son absorbentes ideales [231]); σ es la constante de Stefan Boltzmann, que es igual a $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Entonces, q_{IR} es la cantidad de energía térmica infrarroja que emite un área especificada de la superficie.

En el caso de mediciones de transferencia de calor en procesos LCM, la resina limpia o “neat resin”, las fibras, los adhesivos y el molde, hacen parte y/o conforman el objeto de estudio. La reacción exotérmica de la resina produce los intercambios térmicos con el ambiente circundante. Este intercambio térmico ha sido estudiado en la literatura ampliamente por medio de sensores conductivos para pequeñas muestras de resina, no inmersas en moldes. A través de los sensores conductivos se mide el grado de curado como se menciona en párrafos anteriores. Por consiguiente, nuestro principal objetivo durante la etapa de curado es determinar el grado de curado, α , que se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\alpha(t) = \frac{1}{H_T} \int_0^t \left(\frac{dH_t}{dt} \right) dt \quad (4.4)$$

Este grado de curado se define como la ratio entre la cantidad de flujo de calor generado, H_t , en el tiempo t , y el calor total de la reacción H_T , [232]. Con la finalidad de conocer el grado de curado en una pieza real, previamente es necesario conocer la cantidad de energía que debería liberar al ambiente, la resina a utilizar. Este trabajo se desarrolla en la DSC y es más conocido como caracterización de la resina. En mencionado dispositivo se usan los sensores conductivos para la estimación del grado de curado, [32]; en la actualidad se ha extendido su uso, también durante la fabricación de piezas reales.

Las técnicas de medición por conducción son por lo general intrusivas, mientras que las técnicas basadas en la convección y radiación no, esto es, que no tocan el objeto o cuerpo bajo análisis. En particular, las cámaras térmicas infrarrojas pueden ser usadas como un sensor para medición de calor por radiación, y también para calor por convección estimando el coeficiente de convección, h ; ver la referencia [193].

4.4 Evaluación Experimental del Desempeño de las Técnicas Tradicionales de Medición de Flujo de Calor respecto a la Termografía, para la Estimación de Grado de Curado. Heat PAG Mold .

En esta sección, y como primer paso para avanzar hacia la consecución de la estimación de grado de curado mediante cámara térmica, se evalúan las capacidades de la termografía IR. Estas, son comparadas con las capacidades de los sensores de flujo de calor-local (ver sección 1.2.3.1.7). Lo último, se consigue al medir parámetros-clave de la transferencia de calor, tales como energía transferida y el grado de conversión-curado de la pieza, a través de procesos exotérmicos.

Por ello, se desarrolló Heat PAG Mold, para ejecutar procesos exotérmicos sin necesidad de polimerizar resinas activadas, debido a su laboriosidad, además de sus costes en tiempo y horas-hombre. También, para alcanzar repetibilidad exotérmica, que no siempre puede ser garantizada con precisión en base a polimerización de resinas termoestables. Por tanto, los experimentos de evaluación se ejecutan en condiciones controladas y repetibles, así tener la capacidad de comparar las técnicas de monitorización de transferencia de calor, tratadas aquí, y mencionadas anteriormente.

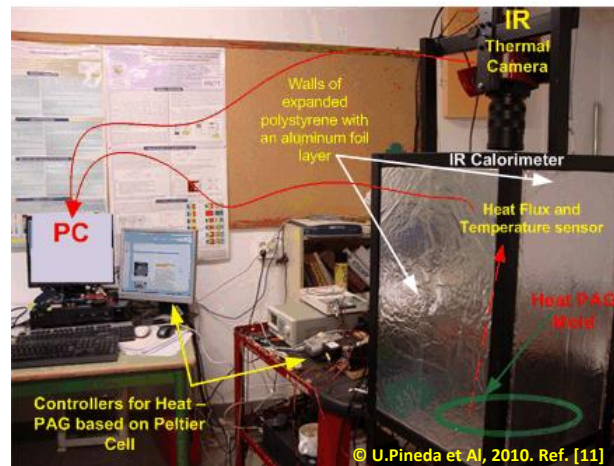


Figura 4.1. Instalación experimental.

Mediante Heat PAG Mold (Molde Generador Artificial y Programable de Flujo de Calor, ver Figura 4.1) se simula el comportamiento de la transferencia de calor de una pieza en fabricación o una resina limpia (neat resin). De esta manera, Heat PAG Mold permite generar flujos de calor exotérmico, controlado por registros térmicos o históricos de temperatura, adquiridos durante una muestra o pieza curada, previamente. Heat PAG Mold en una célula termoeléctrica (célula Peltier).

Para este trabajo, los sensores que se muestran en la Figura 4.2 son colocados en la instalación. En particular, la cámara térmica TVS 500EXZ de NEC y el sensor de la sección 1.2.3.1.7.

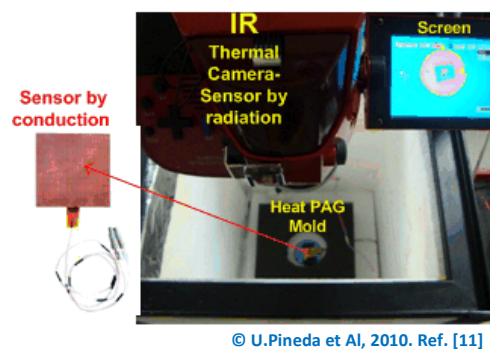


Figura 4.2. Vista desde arriba de la instalación.

En la Figura 4.3 podemos ver la bi-dimensionalidad térmica de la cámara infrarroja (IR). Para las experimentaciones se seleccionó un solo pixel de la matriz de 240x320 pixeles, cercano al sensor de flujo de calor puntual, ver Figura 4.3. La temperatura medida en dicho pixel es denominada, T_{IR} .

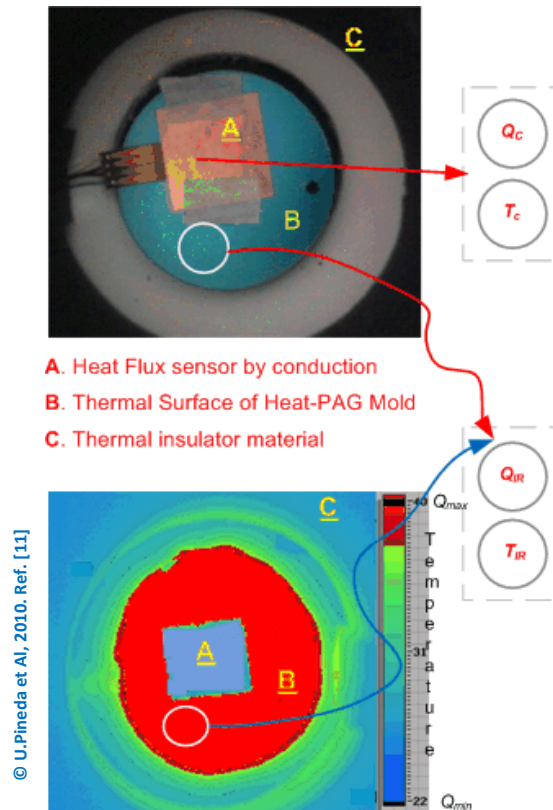


Figura 4.3. Configuración del experimento. Foto térmica en un instante de tiempo.

Como se muestra en la Figura 4.3, el cuadro etiquetado A, es el sensor de flujo de calor sobre la superficie del Heat-PAG Mold; la superficie etiquetada B, es la superficie superior de la masa térmica del molde y la etiquetada C es un material aislante que conduce el flujo térmico en la dirección de la cámara térmica.

4.4.1 Integración de Software y Hardware

Se trata del desarrollo de un software personalizado en lenguaje de programación gráfica (LabView), como lo describe la Figura 4.4. Este software se ha optimizado para controlar y monitorizar el flujo de datos desde el PC a los actuadores, la fuente de alimentación y el ventilador de la célula peltier como también los radiadores eléctricos que controlan la temperatura ambiente. El PC recoge la información en tiempo real desde la cámara térmica a 10 imágenes/segundo, desde el sensor conductivo, y los sensores de temperatura (ver Figura 1.8) en el calorímetro infrarrojo (IR) y temperatura ambiente del recinto, a 30 muestras/segundo. Un esquema de la conexión de todos los componentes se muestra en la Figura 4.4.

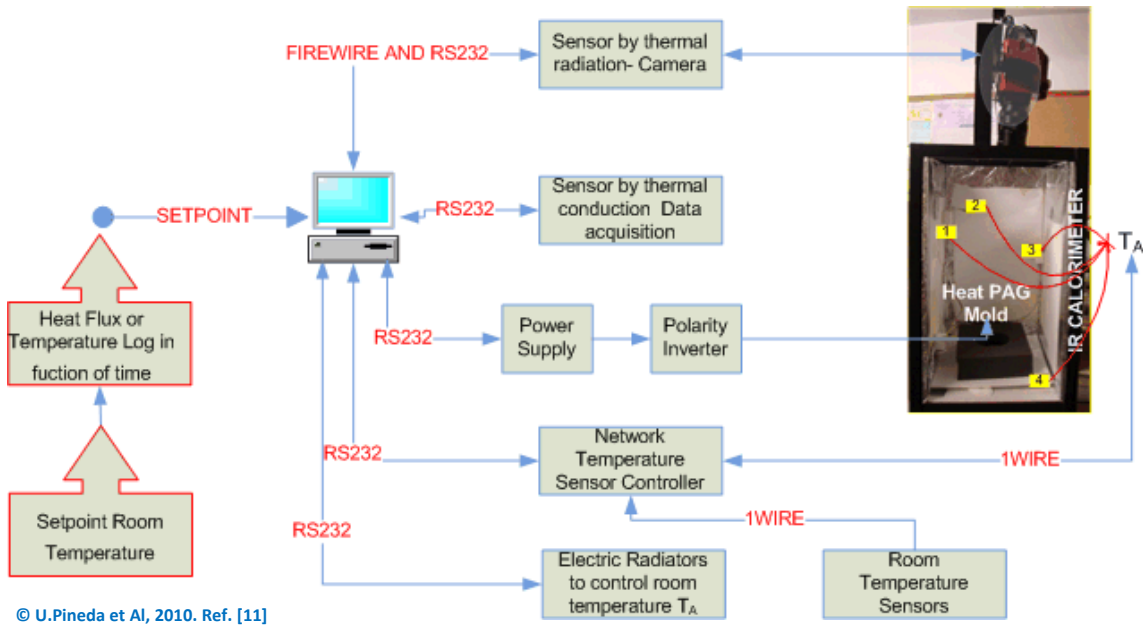


Figura 4.4. Software y Hardware como herramientas de integración para estudiar la etapa de curado de una pieza mediante Heat PAG Mold.

4.4.2 Calibración in-situ de la Cámara Térmica

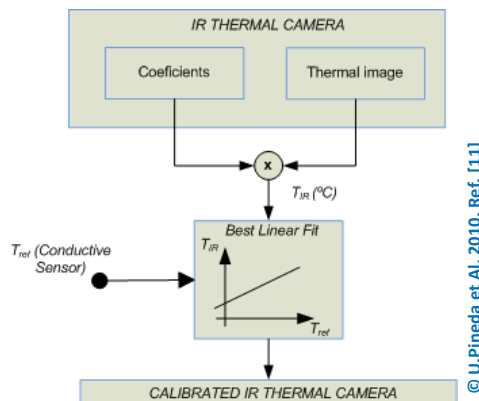


Figura 4.5. Calibración de la cámara térmica mediante regresión lineal.

Previamente al uso de la cámara térmica para las mediciones de temperatura, es necesario calibrarla. El procedimiento de calibración es descrito en la Figura 4.19.

Primero que todo, la cámara infrarroja entrega una imagen donde la información de cada pixel no es un valor de temperatura. Esa información es una cantidad de energía infrarroja en bruto, relacionada con el valor real de temperatura. Dicha adquisición no está calibrada. Por consiguiente, la cámara térmica entrega unos coeficientes que corresponden a una especie de calibración interna inicial que son función de las

condiciones ambientales. Sin embargo no son siempre fiables debido a que dichas condiciones pueden variar en el tiempo; la humedad especialmente y la temperatura en procesos térmicos dinámicos. Por tanto, al operar los coeficientes comentados, con los valores de los píxeles, es posible obtener la temperatura del píxel para condiciones térmicas estáticas. Por el contrario, en casos donde se presentan cambios en las condiciones de superficie y/o de ambiente, generalmente en procesos térmicos transitorios, una calibración in-situ de la cámara térmica fue utilizada, [142], [193], [230], [233]. En particular, en el presente trabajo se utiliza la calibración térmica mediante regresión lineal, propuesta en la referencia [230]. Mediante un test de evolución térmica previo, se procedió a caracterizar-correlacionar linealmente la evolución de temperatura del sensor sobre la superficie del molde y las temperaturas medidas mediante la cámara (píxeles del test). En nuestro caso, se programó en el molde Heat PAG una rampa de calor, con pendiente de $0,05^{\circ}\text{C/s}$, a temperatura ambiente de 25°C .

4.4.3 Resultados de la Experimentación.

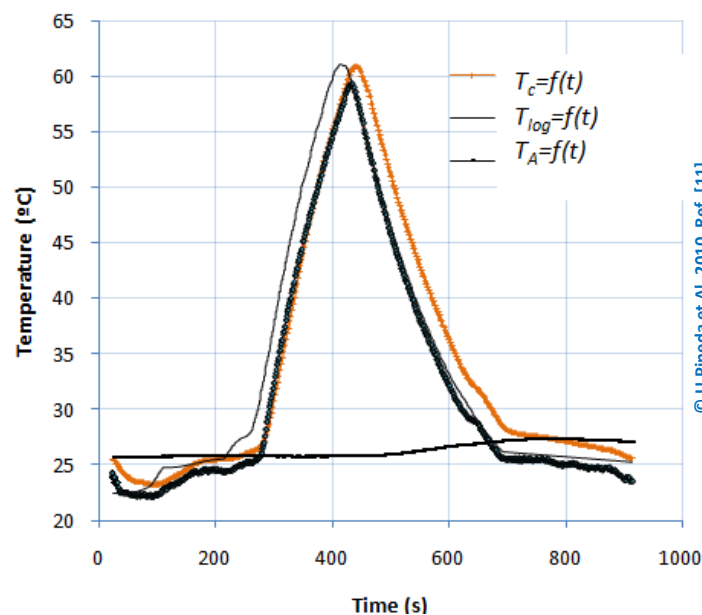


Figura 4.6. T_{log} es la temperatura referencia (log) versus T_c temperatura que arroja el sensor conductivo y, T_A es la temperatura ambiente.

Se ejecutaron dos tests. Ambos tests tomaron como referencia una subrutina programada, donde el molde Heat PAG se comporta como el test de fabricación de la pieza realizada en [34]. En ese trabajo, una resina de polyester insaturada se mezcló con el catalizador, MECKP 2 wt%).

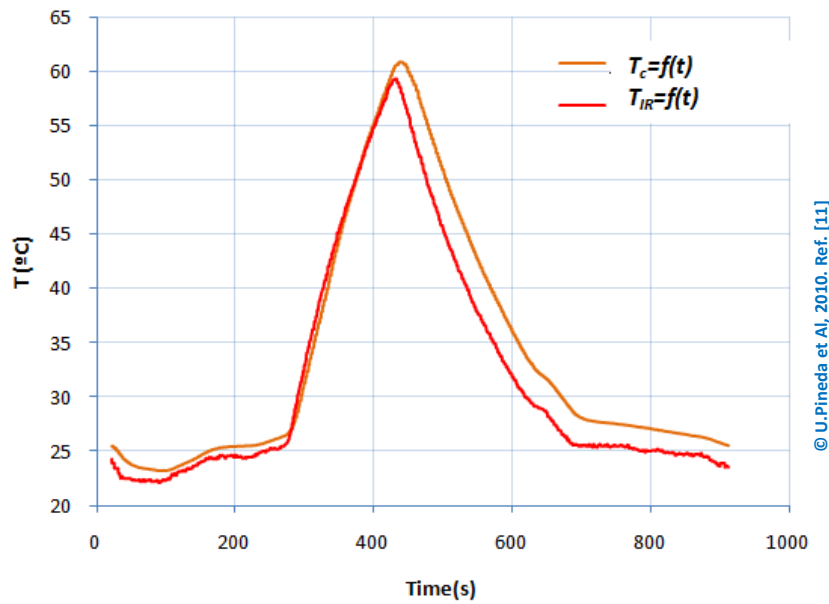


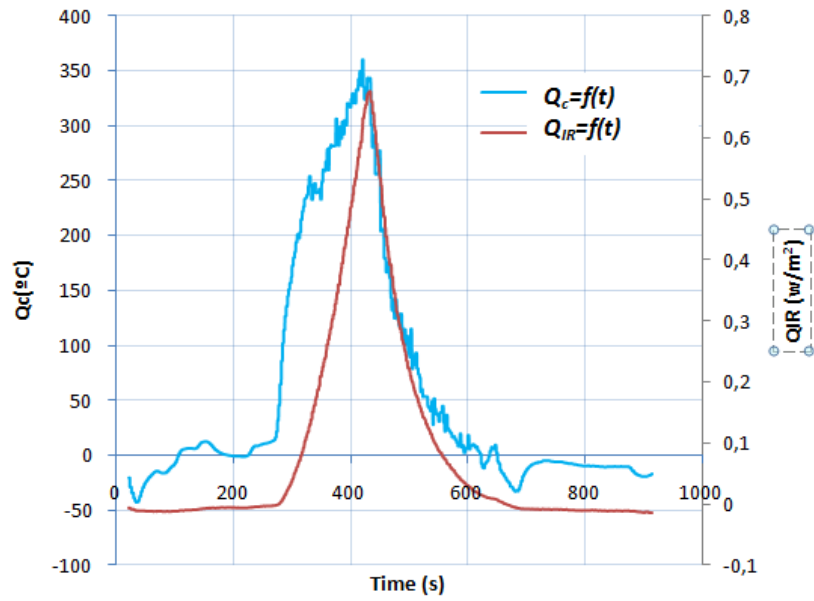
Figura 4.7. Temperatura IR versus temperatura mediante sensor conductivo

Esta resina fue inyectada a fibra de vidrio mediante VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding). Por consiguiente, el registro referencia para el molde Heat PAG es la temperatura registrada en la superficie del molde en los experimentos documentados en [34].

En la Figura 4.6 se muestra la temperatura referencia y la evolución de la temperatura medida mediante sensor conductivo. También, se muestra la evolución de la temperatura ambiente, la referencia es 25°C.

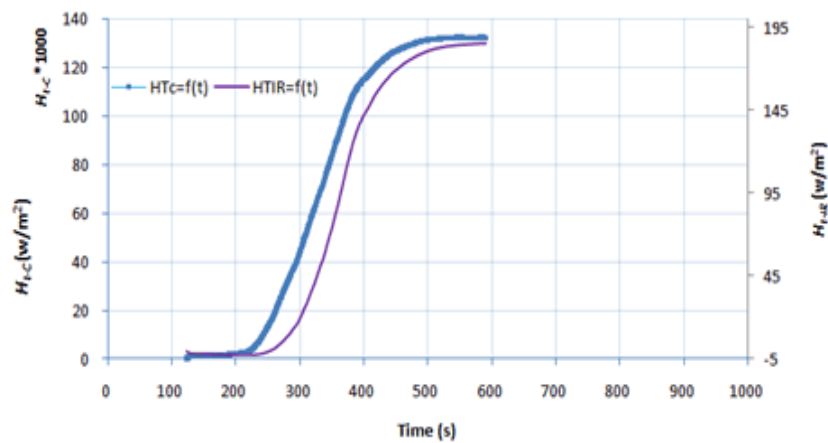
En la Figura 4.7 se muestra la temperatura medida por un pixel de la cámara IR y el sensor conductivo. En esta figura ambas temperaturas muestran que cuando van hacia arriba (incremento exotérmico) son bastante similares. Sin embargo, T_c cuando regresa hacia abajo, lo hace con un pequeño offset respecto de T_{IR} . Por consiguiente, este pudo ser generado por la transferencia de calor radiativo desde las paredes a la superficie del molde mientras decrece el fenómeno exotérmico. Lo último nos indica que la calibración no tuvo en cuenta este offset ni la rapidez de cambio de la temperatura respecto del tiempo ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) cuando la T_c estaba regresando a la línea base, después del pico exotérmico.

En la Figura 4.22, Q_{IR} fue calculado mediante la ecuación (4.3). Como vimos, el pico en Q_{IR} registrado por la cámara IR se detecta con un pequeño retraso respecto a Q_c . Esto también se debe al offset mencionado anteriormente.



© U.Pineda et Al, 2010. Ref. [11]

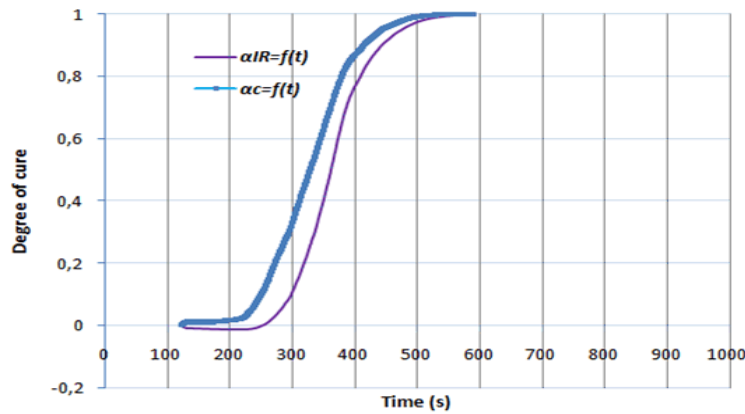
Figura 4.8. Flujo de calor conductivo versus Flujo de calor radiativo



© U.Pineda et Al, 2010. Ref. [11]

Figura 4.9. Medida de la energía emitida por el molde Heat PAG mediante ambos sensores.

En la Figura 4.23 se muestra la energía medida mediante la cámara térmica, H_{T_IR} y la energía desde datos del sensor conductivo, H_{T_C} . Esas energías son necesarias para calcular el grado de curado mostrado en la Figura 4.10, usando la ecuación (4.4).



© U. Pineda et al., 2010. Ref. [11]

Figura 4.10. Grado de curado calculado desde mediciones basadas en dos clases de sensores.

4.5 Evaluación del Curado de Piezas mediante Termografía. Influencia de la Emisividad.

Evaluar la transferencia de calor mediante técnicas infrarrojas en moldes RIFT, significa medir o detectar la cantidad instantánea de calor transferida por radiación, que la fabricación libera al ambiente durante su curado. La principal ventaja de este método de evaluación, radica en la flexibilidad de la inspección en atención a la naturaleza bidimensional de la termografía. En este sentido, los sensores cero-dimensionales no tienen la capacidad que la termografía tiene, sobre todo la flexibilidad y versatilidad que ofrece, invaluable cuando se quiere analizar la transferencia de calor en piezas de gran envergadura o la variabilidad térmica en diferentes zonas de la misma en línea con la evolución del curado.

Sin embargo, en atención a la experimentación ejecutada en la sección 4.4.3 y la dependencia de la emisividad (ϵ) que indica la ecuación (4.3); para evaluar la transferencia de calor de moldes fiablemente mediante técnicas de medición infrarrojas (cámaras IR), se analiza en esta sección: qué es la emisividad, cómo se mide y cómo puede esta afectar, las mediciones de transferencia de calor durante fabricaciones. De esta manera, mirar las ventajas del uso de la termografía en moldes industriales, a la vez que se valoran algunas de las fuentes de energía que podrían representar cambios en la temperatura real del contra-molde. Adicionalmente, algunas de esas fuentes de energía, detectables desde la cámara térmica, representan en la imagen, cambios térmicos reales y otros aparentes. Distinguir los unos de los otros, permite ejecutar mediciones fiables. Por ello es fundamental, operar correctamente la cámara térmica (ver Figura 4.15), pues esto asegura mediciones dependientes en exclusiva de la emisividad y de la geometría del molde, [128], para conseguir mediciones fiables cuantitativamente, en procesos

térmicos transitorios, como es el curado de piezas-composites. Por tanto, al determinar la emisividad, sería posible bien determinar la evolución de las propiedades del material (matriz termoestable + refuerzo de fibra) o simplemente evaluar su transferencia térmica con fiabilidad.

4.5.1 Caracterización de la Emisividad para el procesamiento de Composites.

La emisividad es un parámetro característico de la superficie bajo inspección termográfica. Este es constante para un material específico en un rango de temperaturas específicas y, bajo condiciones de medición específicas. Es por tanto, la habilidad de un material para radiar en comparación de un cuerpo-negro ideal. Todos los materiales radian-emiten energía. La cantidad de potencia radiada-emitida depende de la temperatura y de la emisividad del material. La ϵ es para un material absorbente ideal, es decir un cuerpo-negro igual a la unidad; y es igual a menos de la unidad para superficies de objetos reales, los cuales no son absorbentes de energía ideales, [231].

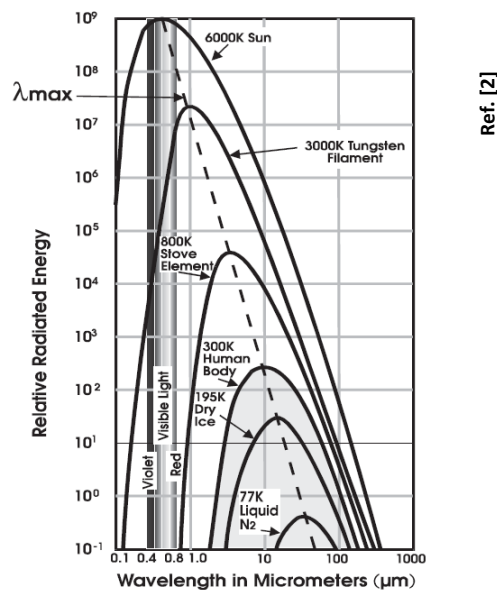


Figura 4.11 Comportamiento del cuerpo negro a varias temperaturas, [2]

Por tanto, las superficies de los materiales pueden ser clasificadas en tres categorías, como: *cuerpos negros*, *cuerpos grises* y *cuerpos no-grises*. Un cuerpo negro es una superficie ideal-teórica que tiene la máxima emisividad que se puede definir ($\epsilon = 1$) en un rango espectral (λ_n^{61}) y absorbe todas las energías disponibles en su superficie, como

⁶¹ Longitudes de onda.

puede verse en la Figura 4.11. Afortunadamente, aunque los radiadores de cuerpo negro no existen en la práctica, la superficie de la mayoría de los sólidos son cuerpos grises cuyas emisividades son altas y bastante constante respecto de variaciones de espectro de detección (λ_n), es decir, su emisividad es independiente de la longitud de onda, [234].

La Figura 4.12 muestra una comparativa de la distribución espectral de la energía emitida por un cuerpo negro, uno gris y uno no-gris, todos a la misma temperatura. Para mediciones de temperatura de un cuerpo gris es suficiente con ejecutar una simple corrección de emisividad. Sin embargo, para cuerpos no-grises la solución es un poco más difícil. Y por tanto, ese tipo de cuerpos se convierten en un reto evaluar su transferencia térmica mediante termografía.

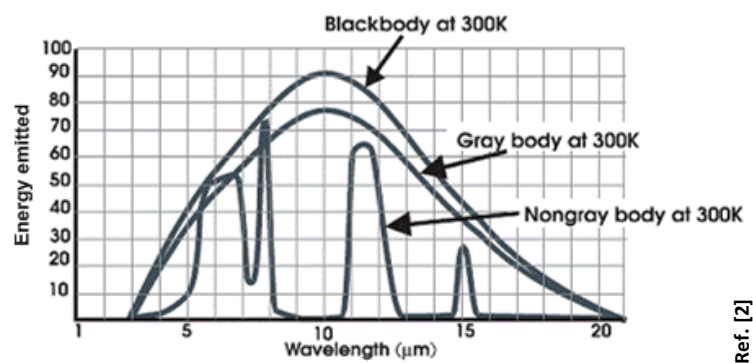


Figura 4.12. Distribución espectral de cuerpo negro, gris y no-gris, [2]

Para ejecutar medidas con cámara térmica, es fundamental resolver las siguientes cuestiones, antes de inspeccionar cualquier material. Primero, entender el comportamiento térmico del material a medir. Segundo, preparar el equipamiento para las mediciones de campo. Y tercero, usar los procedimientos de operación idóneos para la cámara IR.

Sin embargo, las temperaturas aparentes que entrega la cámara térmica, no son precisas ya que presentan la incertidumbre que introduce el valor de la emisividad⁶² de la superficie de medida que no es constante cuando la superficie de medición está sujeta a transitorios térmicos [128] o procesos exotérmicos, como publicó [157]. En [157], desarrollan un método para medir la temperatura verdadera de un proceso exotérmico causado por el curado de una resina mediante un radiómetro basado en fibra óptica, no en imagen térmica. Adicionalmente en [234], explica las razones que causan la incertidumbre en la medición de temperatura; focalizan en la emisividad. Consecuentemente, las mediciones basadas en la captura de radiación tales como la

⁶²Esta no está determinada para el film plástico usado como contra-molde.

termografía tienen que hacerse fiables, bien determinando la emisividad real efectiva de la superficie bajo medición o calibrándola in-situ mediante información térmica adquirida por otros sensores (fiables y precisos), como se ejecuta en la sección 4.6.2. El método de calibración in-situ para transferencias de calor dinámicas, también ha sido reportado por [230], [233], [235].

En el cómo determinar la emisividad, se destacan las siguientes publicaciones [234], [236], [133], [237]. En [234], resaltan varias formas de ejecutar mediciones de transferencia de calor, sin que la emisividad las convierta en incertidumbres mayores: ejecutar las mediciones dentro de una cavidad⁶³, pintar o cubrir la superficie a medir con pinturas especiales de emisividad promedio de 0.90 a 0.95, determinadas para anchos de banda de 8 a 14 μ m, o también, comparando el material bajo medición con una placa metálica plana de emisividad conocida y preferiblemente no menor de 0.90 para cierto ancho de banda. El uso de materiales con emisividades altas evita efectos de temperaturas de fondo (reflejar otras fuentes de energía). En [236], reportan técnicas calorimétricas y ópticas, para la medición de la emisividad. Como calorimétricas, existen dos métodos, en condiciones térmicas estacionarias (steady state heat transfer) y en transitorias (transient state heat transfer), [238]. Las técnicas calorimétricas requieren de un recipiente capaz de mantener la temperatura y la presión de vacío, esto para actuar como un cuerpo-negro, simulando radiación a espacio profundo. Las técnicas ópticas para medición de la emisividad, involucran iluminar (p. ej. mediante un láser) una muestra con energía infrarroja y medir el porcentaje de energía reflejada desde la superficie, usando un reflectómetro o espectrómetro [239], [240], [237]. La absorbencia (α) es calculada desde la reflectancia (ρ) mediante un balance de energía por radiación, como indica la ecuación (4.6).

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (4.5)$$

En el caso de una superficie opaca, la transmisividad $\tau=0$. Si la superficie no es opaca, el porcentaje de energía transmitida puede también ser medido. La absorbencia es entonces usada para calcular la emitancia por la Ley de Kirchhoff, la cual establece que cuando la emisión e irradiación son del mismo espectro, $\varepsilon=\alpha$, [241]. El método óptico es generalmente menos laborioso que el método calorimétrico, pero las medidas deben ser repetidas para todos los ángulos y luego numéricamente integradas para obtener la

⁶³ Una esfera, cilindro, cono o una combinación de ellos. Una cavidad es una buena aproximación de cuerpo-negro. La emisividad total de una cavidad depende de su geometría, pero generalmente se acerca a 1.

emisividad hemisférica total fiable. En la mayoría de casos no es práctico y la emisividad normal se usa para aproximar la emisividad hemisférica, algunas veces usando una formula de conversión dependiente del tipo de material.

4.5.2 Cuidados y Operación Idónea de la Cámara IR para Mediciones Térmicas.

Para mediciones locales (puntuales) se puede estimar la emisividad configurando en la cámara IR, con arreglo a las tablas de emisividad disponibles para los materiales. La restricción de este método de estimación, es que esas emisividades de las tablas suelen estar medidas en un rango de temperaturas y condiciones específicas. A pesar de ello, es un método aconsejado por la mayoría de manuales, tal como en [2] y quizá el más extendido, aunque no el más fiable. Por tanto, cuando se requiere exactitud en la medición, siempre es mejor determinar la emisividad efectiva real de la superficie a ser medida usando el dispositivo IR a ser usado en la medición. Ya que la emisividad también varía en función de la banda espectral⁶⁴ de detección.

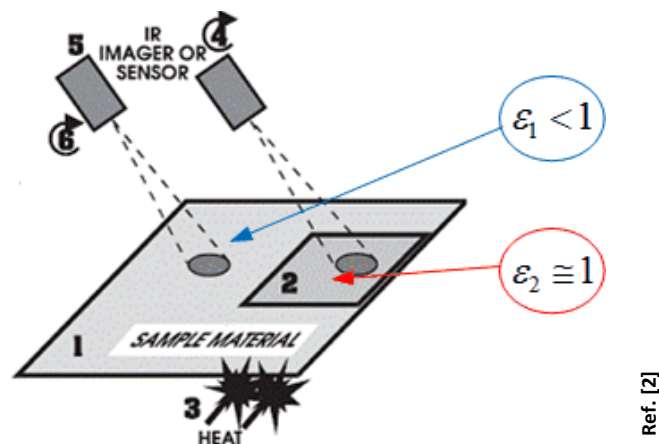


Figura 4.13 Medición de la emisividad de la superficie de un material, [2].

Por ello, para determinar la emisividad efectiva-real se sigue el siguiente procedimiento, ilustrado en la Figura 4.13. Primero (1), se selecciona la muestra (sample material). Segundo (2), se cubre una sección con un material de emisividad alta de valor conocido ($\epsilon_2 \cong 1$). Tercero (3), calentar la muestra a temperatura uniforme. Cuarto (4), se mide la temperatura de la sección cubierta con ϵ puesta en el valor conocido. Quinto (5), se apunta con el sensor en el área no cubierta. Sexto (6), se ajusta la ϵ para repetir la lectura de temperatura del paso (4). Esta es la emisividad efectiva de la muestra (del

⁶⁴ Variaciones de la emisividad al usar diferentes bandas espectrales, para evaluar muestras del mismo material.

material). Este mismo método puede ser aplicado, sustituyendo el material de emisividad conocida por un sensor de temperatura, en fuerte contacto térmico con la muestra bajo inspección.

En la Figura 4.14, se muestra que el instrumento de medida ve tres componentes de energía: (W_e) que es la energía emitida, (W_r) la energía reflejada desde el ambiente y, (W_t) la energía transmitida a través del material bajo inspección desde fuentes de energía detrás de este. La suma porcentual de esas componentes siempre es la unidad, como se puede ver en el eje vertical de la gráfica de la Figura 4.12.

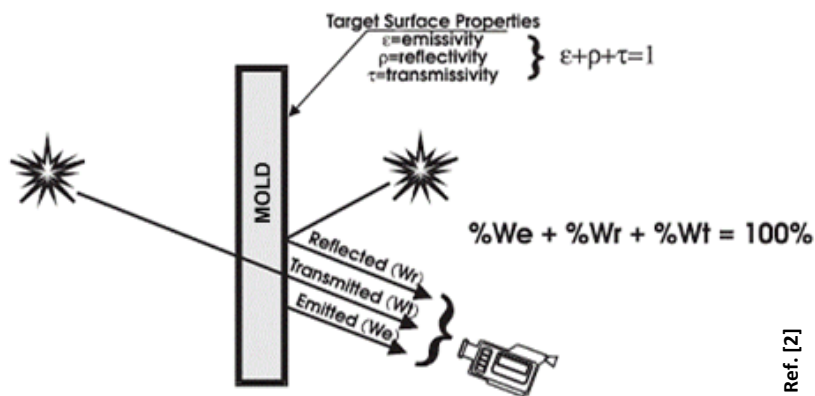


Figura 4.14. Componentes de la energía que llegan al sensor IR, [2].

Ya que un cuerpo-negro no refleja ni transmite energía, el instrumento de medida IR ve solamente W_e , la energía emitida. Para un cuerpo-gris, el instrumento de medida IR, ve W_e y W_r , es decir, la energía emitida y la reflejada. Sin embargo, para un cuerpo-no-gris, debido a que este, puede ser parcialmente transparente, el instrumento ve las tres componentes de energía. En la práctica, la componente que genera algunos problemas es la energía transmitida (W_t), a través de cuerpos-no-grises por la detección de fuentes de energía detrás del material bajo inspección.

Si la emisividad (ϵ) de un cuerpo-gris es muy baja, como en el caso de superficies metálicas pulidas, la reflectancia (ρ) llega a ser alta ($\rho = 1 - \epsilon$) y puede generar lecturas erróneas si no es apropiadamente manejado. La energía reflejada desde una fuente específica puede generalmente ser redireccionada mediante la apropiada orientación del instrumento con respecto a la superficie del material bajo inspección, como lo muestra la Figura 4.15.

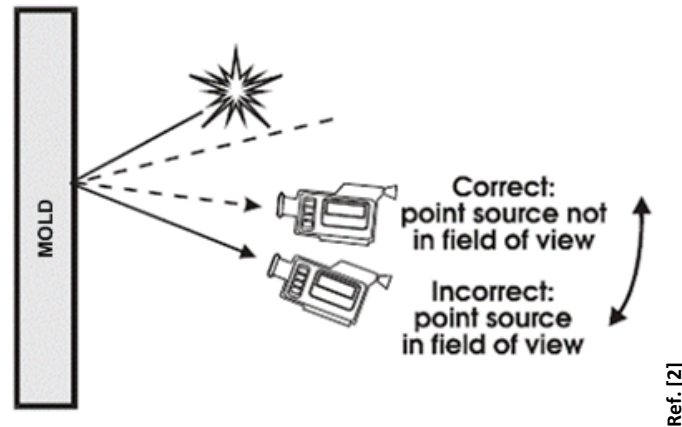


Figura 4.15. Orientación de la cámara IR para evitar influencia de puntos de reflexión de fuentes de energía no deseados.

El contra-molde en esencia puede llegar a comportarse como un cuerpo-gris al estar en fuerte contacto térmico con el material en consolidación (matriz termoestable + refuerzo de fibra), pero esto no deja de ser una presunción. La matriz termoestable cambia de temperatura y cambia de propiedades físicas por la polimerización, lo cual establece una interesante relación con la emisividad, que según [157], comprobaron la variación de la emisividad conforme evolucionaba el curado. Sin embargo, a la luz de la revisión de la influencia de la emisividad en la evaluación de la transferencia de calor usando detección infrarroja, y el requerimiento de múltiples aparatos y condiciones de laboratorio para su determinación, se plantea como trabajos futuros. Por tanto, se opta por ejecutar calibraciones in-situ, a fin proseguir el desarrollo de la tesis y de obtener repetibilidad en las mediciones de transferencia térmica. Mencionado procedimiento se desarrolla en la siguiente sección.

4.6 Calibración In-situ para Habilitar la Termografía Infrarroja en la Medición Fiable de Fenómenos de Transferencia de Calor durante el Curado.

Se propone una técnica experimental de calibración in-situ, para medir el flujo de calor que se libera desde cualquier lugar de un molde durante procesos exotérmicos de curado. Este método ofrece flexibilidad y versatilidad para medir el flujo de calor desde cualquier emplazamiento sobre la pieza, en el mismo instante de tiempo. Las capacidades mencionadas se obtienen mediante combinación de la precisión de los sensores cero-dimensionales y la detección bidimensional de la termografía infrarroja, conjuntamente.

Publicaciones recientes [193], [233], [242], mencionaron el uso de la cámara térmica calibrada mediante método in-situ. Ellos mostraron que la temperatura es el parámetro clave para la calibración de las mediciones. Además, ninguna de esas publicaciones ha sido aplicada a la fabricación de piezas de composite. La calibración de la temperatura en este trabajo, se hizo instantáneamente, y se usó como referencia para calcular el flujo de calor total, el cual es clave para la caracterización del curado de piezas de composite.

4.6.1 Instalación Experimental.

La Figura 4.16 y la Figura 4.17 muestran la configuración para la fabricación de una pieza de composite que es una placa cuadrada de 30x30 cm² mediante la técnica de infusión de resina (RI), donde el inyector de resina está en el lado izquierdo y el venteo en el derecho. La temperatura de laboratorio es controlada a 22°C y la humedad relativa a 50%. El refuerzo usado en este test fue un tejido de fibra de vidrio de 0°/90° y una resina termoestable viniléster. El molde que se muestra en la Figura 4.16 se puso dentro de una caja negra como muestra la Figura 4.17, del lado derecho.

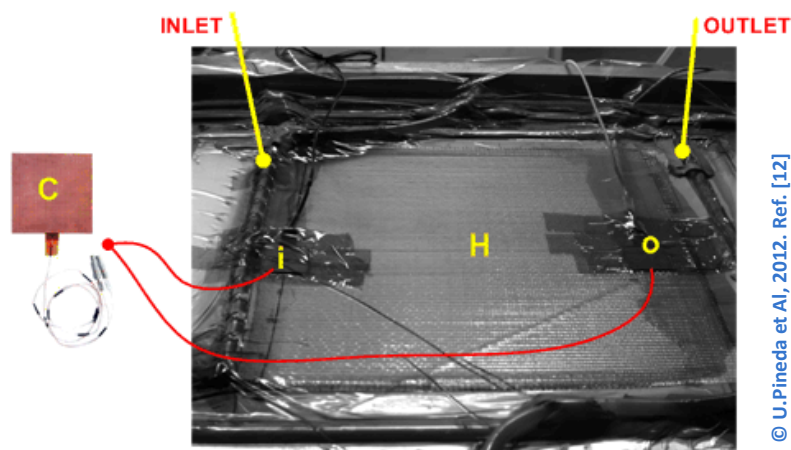


Figura 4.16 . Instalación para la fabricación de composite planos mediante proceso VIP. Los sensores (i) y (o) corresponden a los sensores de flujo de calor y temperatura, dispuestos cerca del inyector y del venteo.

El molde inferior es hecho de una placa de vidrio y el contra-molde, una bolsa de plástico que es flexible y transparente, con una elongación a la rotura de 400%. La resina líquida catalizada o activada se inyectó en el molde a través de la tubería del inyector (etapa de llenado) hasta que se llena completamente. En ese momento, la alimentación de resina al molde es cortada completamente y la etapa de curado arrancará al pasar un rato (este depende del inhibidor).

Un software de adquisición a medida basado en programación gráfica en LabView 8.6 fue desarrollado en [11], se usa como referencia de esta sección. Este sistema de adquisición de datos usa sensores térmicos para adquirir el flujo de calor durante la polimerización. El sistema recibe la información térmica necesaria para la calibración de los datos de la cámara térmica. Los datos llegan desde la pieza mientras está presente cambios en el frente de flujo durante la etapa de llenado. Los cambios son capturados instantánea y simultáneamente. En la Figura 4.16 y la Figura 4.17 en el lado izquierdo, cerca al inyector y al venteo, un par de sensores cero-dimensionales (Ci and Co) son puestos para medir temperaturas y flujos de calor. La cámara térmica es separada verticalmente 1.3 metros arriba del molde.



Figura 4.17. (Izq.) Ubicación del molde para la fabricación del composite, el cual es monitorizado mediante una cámara térmica (A), una cámara de espectro visible (B), sensores cero-dimensionales de temperatura – Flujo de calor (C), sensores de temperatura ambiente (E). (Der.), Caja negra cerrada (F), sistema de adquisición por ordenador (D).

Los fabricantes de los sensores “termo-sensibles” son Thermoflux y Captec. Durante los experimentos, todo el equipamiento es puesto dentro de la caja negra (ver Figura 4.17 de la derecha) a fin de prevenir que interacciones externas, fuentes de calor no controladas o ruido térmico puedan afectar la respuesta de la cámara térmica (TVS-500EXZ fabricada por NEC) y también de los sensores cero-dimensionales, mientras el calor exotérmico es liberado por la polimerización de la pieza.

4.6.1.1 Evolución Térmica Cualitativa mediante Histórico Termográfico del Curado.

Cualitativamente, las imágenes térmicas muestran la transferencia de calor durante la etapa de curado, experimentada esta por la pieza bajo proceso, debido a su la

polimerización que consecuentemente produce un fenómeno exotérmico, como puede verse en la Tabla 4.1. Por ejemplo, la Tabla 4.1 en el instante de tiempo 1 muestra como las regiones cerca al tubo de la inyección de resina incrementa las temperaturas ya que la concentración de masa alrededor del inyector es más alta que para áreas cercanas al venteo. Esta variación térmica es también mostrada en la Figura 4.19 a través de las señales térmicas, Q_i and ΔT_i . Las imágenes térmicas permiten el cálculo directo de la temperatura aparente para cada pixel usando el algoritmo publicado por NEC, el fabricante de la cámara térmica [243]. Además, ya han sido publicados trabajos que proponen métodos de calibración a fin de habilitar la termografía cuantitativamente, como en [233].

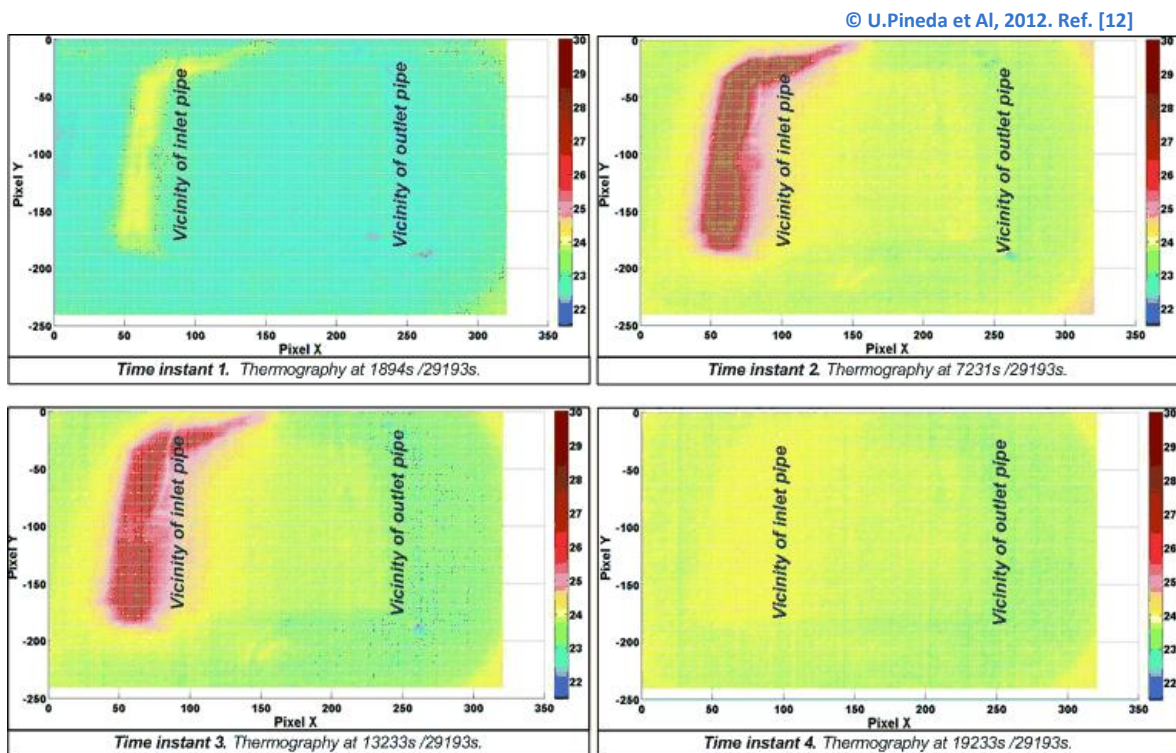


Tabla 4.1. Evolución cualitativa de temperaturas mediante imágenes térmicas durante la etapa de curado de las placas cuadradas

La termografía cuantitativa y la experimentación son discutidas en la sección 4.6.1.2.

4.6.1.2 Termografía Cuantitativa del Test. Análisis Comparativo de la Respuesta de los Sensores Conductivos y Radiativos.

La adquisición de datos del proceso de polimerización arranca tan pronto el molde inicia su llenado con resina. La liberación de calor es monitorizada por varias horas (≈ 8

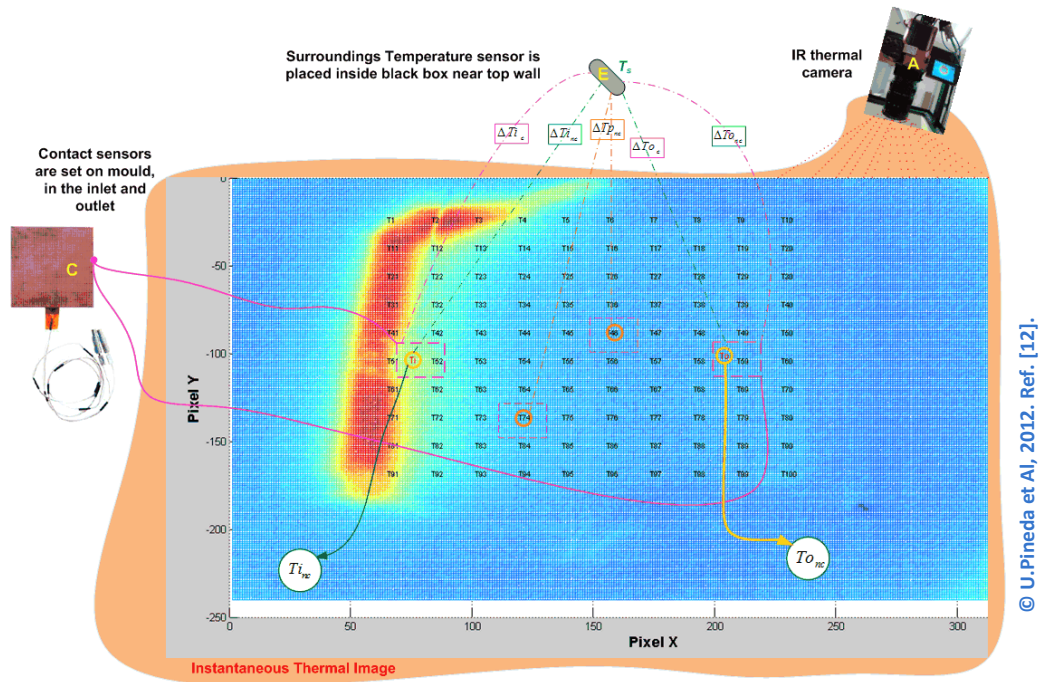
horas) hasta que la polimerización completada. Esto es cuando las temperaturas de la pieza muestran ser iguales a la temperatura ambiente. La tasa de muestreo es de una adquisición por segundo, simultáneamente desde todos los sensores. Los sensores de flujo de calor – temperatura, (C_i) y (C_o) son localizados como muestra la Figura 4.16 y la Figura 4.18. Así, conforme evoluciona el proceso exotérmico de curado, los flujos de calor y las temperaturas en el inyector (T_{i_c} , Q_{i_c}) como en el venteo (T_{o_c} , Q_{o_c}) son medidos, instantáneamente. Las señales de contacto mencionadas son la referencia térmica local o in-situ para calibrar las temperaturas aparentes entregadas por la cámara térmica, ya sea que estén ubicadas en el inyector ($T_{i_{nc}}$), venteo ($T_{o_{nc}}$) o en otro lugar a lo largo del molde (ver Figura 4.18 and Figura 4.21). Por consiguiente, mediante los sensores cero-dimensionales como referencia in-situ, cada pixel puede ofrecer una medición aproximada de flujo de calor, del proceso.

La temperatura ambiente T_s a lo largo del tiempo permanece casi constante con una variación de 22 a 22,5 °C, garantizando condiciones cuasi-isotérmicas. Por consiguiente, las diferencias de temperatura (ΔT) son calculadas mediante restas así, $\Delta T = T - T_s$, donde T puede ser una temperatura de contacto o sin-contacto.

En la Figura 4.19 se muestra ΔT_{i_c} y ΔT_{o_c} para las temperaturas T_{i_c} y T_{o_c} respectivamente. La Figura 4.19 muestra también que ΔT_{i_c} y ΔT_{o_c} , como también Q_{i_c} y Q_{o_c} son diferentes. Esas diferencias están relacionadas con las posiciones sobre la pieza donde los sensores monitorizan el flujo de calor liberado.

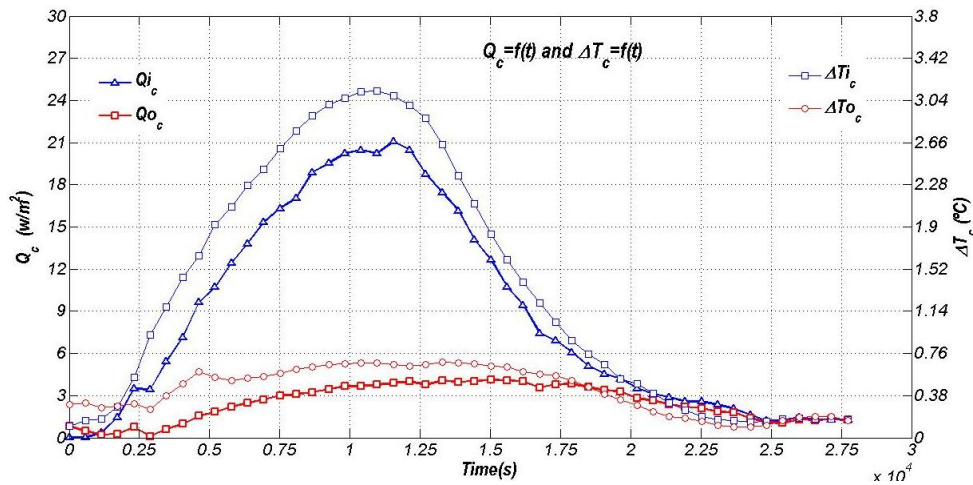
Cerca a la tubería del inyector se nota una concentración más alta de resina que en otros lugares a lo largo del molde. Mencionadas diferencias causan diferencias en el espesor que es ligeramente más mayor en las vecindades del inyector que en el venteo. Lo último implica que el calor liberado desde el molde no es homogéneo a lo largo del mismo y por consiguiente la pieza final tendrá variaciones de espesor.

En la Figura 4.19 y Figura 4.20, las diferencias de temperatura (ΔT) son calculadas por sustracción como, $\Delta T = T - T_s$, donde la temperatura T , puede ser por contacto o no contacto. Mediante dichas figuras se puede confirmar que los flujos de calor en el molde (Q_c) y las diferencias de temperatura ΔT_c , se comportan similarmente tanto en el inyector como en el venteo. En este sentido, los cálculos de ΔT_c presentan proporcionalidad con Q_c ambas en función del tiempo (ver la Figura 4.19). Igualmente, Q_c tiene un comportamiento proporcional con ΔT_{nc} .



© U. Pineda et al, 2012. Ref. [12].

Figura 4.18. (Der.) Análisis termográfico para la calibración. (Izq.) El sensor de Flujo de Calor – Temperatura que entrega mediciones exactas. Las líneas magenta solidas son la proyección cuadrada sobre en la imagen termográfica para dar una idea de la colocación relativa de los sensores en el inyector y en el venteo.



© U. Pineda et al, 2012. Ref. [12].

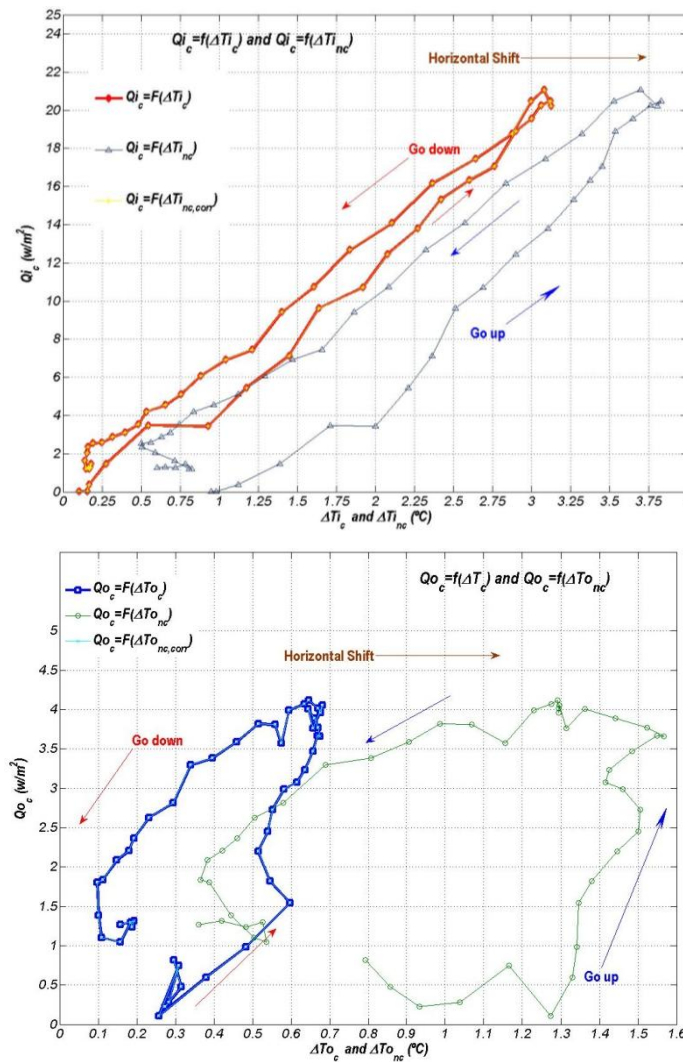
Figura 4.19 Flujos de calor por contacto y diferencias de temperatura como función del tiempo. Con ambiente de $T_s \approx 22^\circ\text{C}$.

Esto significa que $Q_c \propto \Delta T_c$ como $Q_c \propto \Delta T_{nc}$ pero es necesario chequear porque las respuestas térmicas por contacto y sin-contacto no convergen en sí mismas, es decir, no son iguales como se observa en la Figura 4.20. Entonces, asumiendo que los datos de

sensores por contacto son precisos y libres de error, en la se pueden ver dos clases de desviaciones en las curvas. Primero, las gráficas de $Q_c = f(\Delta T_{nc})$ muestran un desplazamiento horizontal respecto de las gráficas de $Q_c = f(\Delta T_c)$. Segundo, mencionadas gráficas van hacia arriba y hacia abajo por caminos térmicos diferentes. Esas desviaciones, punto a punto pueden ser corregidas conociendo las causas que las producen. Entonces, las desviaciones antes mencionadas deben ser analizadas como se procede a continuación.

$Q_c = f(\Delta T_{p_{nc}})$ y $Q_c = f(\Delta T_c)$ *presentan un desplazamiento horizontal*. El error inducido a través de las temperaturas medidas por la cámara térmica es evidente aquí en la Figura 4.20. Mediante termografía infrarroja no es posible medir temperaturas precisas pero si temperatura aparente. Por consiguiente, cada imagen térmica instantánea debe ser calibrada por medio de sensores cero-dimensionales precisos, así obtener $Q_c = f(\Delta T_{nc, corr})$ o $Q_c = f(\Delta T_{p_{nc}})$ si se aplica a cualquier pixel. Para la calibración mencionada se necesita calcular el error a cada instante como $e(t) = T_c(t) - T_{p_{nc}}(t)$, donde, $e(t)$ es el error, $T_c(t)$ es la temperatura por contacto con la pieza y $T_{p_{nc}}(t)$ es la temperatura aparente de pixel

$Q_c = f(\Delta T_{p_{nc}})$ and $Q_c = f(\Delta T_c)$ *describen diferentes caminos térmicos en la subida y en la bajada*. Particularmente los efectos de la convección natural y quizá los cambios en la emisividad del molde, causan esto. Se presenta el análisis a continuación: la Figura 4.19 muestra que la liberación de calor de la pieza al entorno durante los 11500 segundos de tiempo inicial, donde hasta ese momento Q_c , es una porción de todo el calor liberado por el molde. Así que, el calor liberado Q_c es movido por convección natural a los alrededores del molde así que existen una pequeña transferencia de calor entre el molde y el interior de las paredes de la caja negra. En la Figura 4.23 un pequeño incremento h antes y después del pico exotérmico confirma la convección natural. Después del pico exotérmico, como muestra la Figura 4.19 y Figura 4.23, el flujo de calor Q_c decrece hasta casi alcanzar balance o equilibrio térmico y entonces h incrementa justo antes de alcanzar el equilibrio térmico. De hecho, las curvas de las gráficas en $Q_c = f(\Delta T_{p_{nc}})$ y $Q_c = f(\Delta T_c)$ van abajo a través de diferentes caminos, como van arriba (ver Figura 4.20).



© U. Pineda et Al, 2012. Ref. [12].

Figura 4.20 Flujo de calor por contacto en función de las diferencias de temperatura por contacto y sin-contacto. Arriba, el comportamiento en el inyector. Abajo, el comportamiento en el venteo.

4.6.2 Método de Calibración Experimental In-situ para Termografía Infrarroja.

El diagrama de flujo en la Figura 4.21 muestra el algoritmo que permite calcular el flujo de calor para cada pixel, lo que lleva a este método a aportar la capacidad de visualizar imágenes térmicas de calor en lugar de únicamente temperatura. El trabajo publicado en [244], se toma como referencia para computar h .

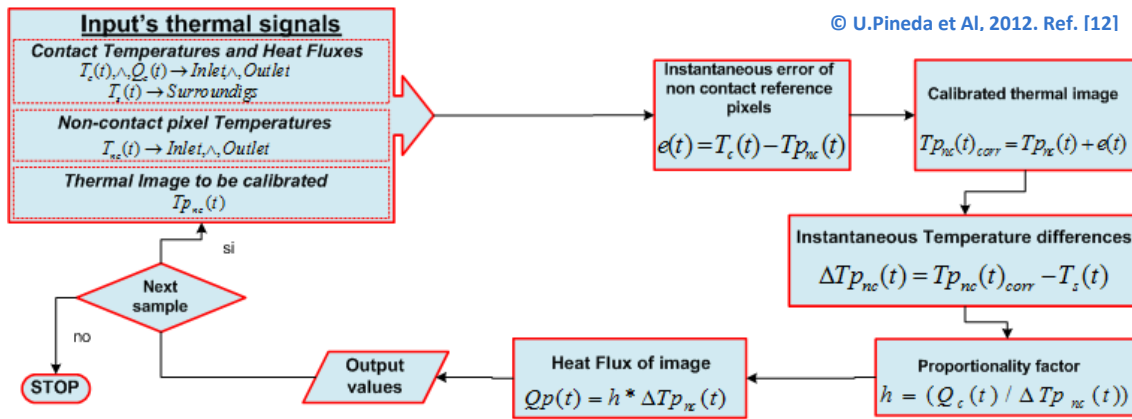


Figura 4.21. Diagrama de flujo de algoritmo para calcular el flujo de calor de pixeles experimentalmente en condiciones de temperatura ambiente controladas.

El factor h o factor de convección puede ser calculado como sigue, $h(t) = Q_c(t) / \Delta T_{p_{nc}}(t)$. Donde $Q_c(t)$ es el flujo de calor entregado por los sensores sobre el molde y $\Delta T_{p_{nc}}(t)$ es la diferencia de temperaturas entre la imagen térmica calibrada y $T_s(t)$.

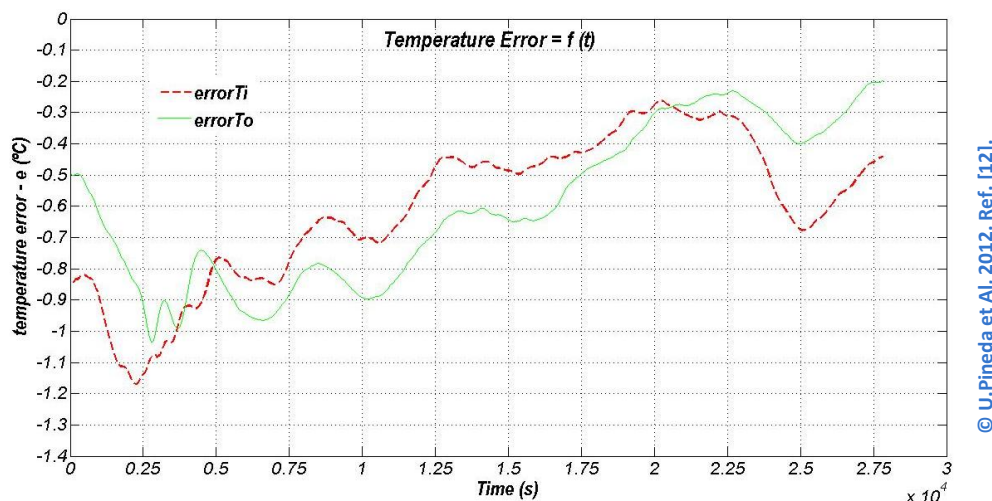
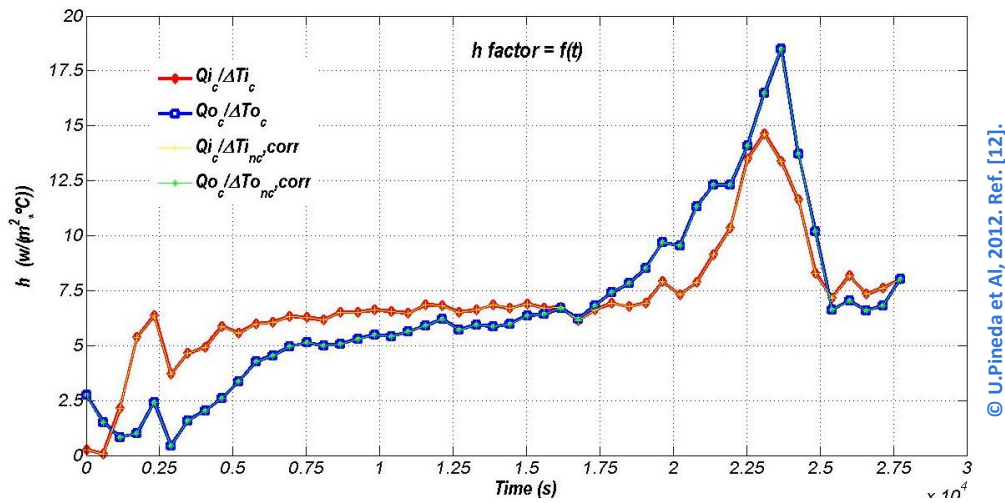


Figura 4.22. Error de Temperatura instantánea (Temperatura de cámara vs. Temperaturas por contacto)

Por consiguiente, intentar explicar esta clase de proceso de calor exotérmico por medio de únicamente una línea recta de ajuste o un factor de proporcionalidad en todo el dominio del tiempo no es lo adecuado ya que la clase de imprecisiones que presentan estos comportamientos térmicos deben ser actualizadas en el tiempo a fin de obtener los mejores resultados. Finalmente, se puede calcular el flujo de calor de la imagen calibrada acorde al algoritmo que muestra la Figura 4.21. En la Figura 4.22 se muestra

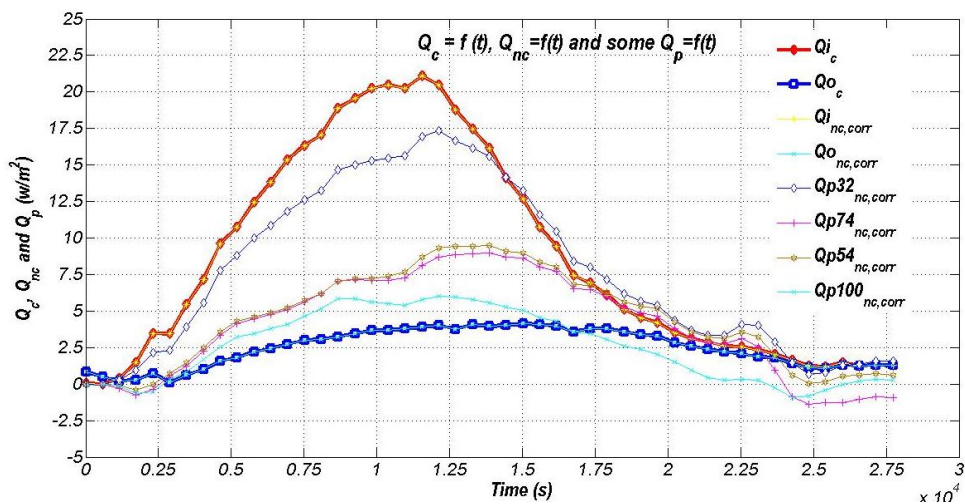
la evolución del error que es muy bajo y cercano a ser nulo y además casi del mismo orden de magnitud para cualquier sitio en el molde.



© U.Pineda et Al, 2012. Ref. [12].

Figura 4.23. Factor proporcional instantáneo en función del tiempo.

El comportamiento de flujos de calor de algunos pixeles en función del tiempo puede ser visto en la Figura 4.24. Esta figura compara el calor capturado liberado por la pieza, que se capturó mediante los sensores por contacto Q_c y el comportamiento del flujo de calor calibrado de algunos pixeles mediante termografías capturadas por cámara térmica durante un proceso de calor exotérmico.



© U.Pineda et Al, 2012. Ref. [12].

Figura 4.24. Algunos flujos de calor de pixel y por contacto a lo largo del molde

4.7 Evaluación de la Capacidad y Precisión de la Termografía respecto de la Técnica con Sensores Cero-dimensionales, para Estimar el Grado de Curado de Piezas-Composites

4.7.1 Materiales

Para este trabajo, la Dekarane 350-411, una resina viniléster termoestable con una viscosidad de 0,350 Pa.s fue usada. Antes del proceso de fabricación, la resina se mezcló con 1,25phr de catalizador MEKP-925H, 0,08 phr. de 2-4 inhibidor pentadione y 0,10 phr de promotor de cobalto para asegurar un tiempo de infusión óptimo. Las preformas de composite resultante fueron compuestas de dos, cuatro y seis capas de tejido de fibra de vidrio con orientación de 0°/90°.

4.7.2 Instalación Experimental

La Figura 4.25 y Figura 4.26 muestran la instalación y el equipamiento necesarios para la fabricación de las placas planas-cuadradas de material compuesto, midiendo 30x30 cm², y usando la técnica de fabricación de Infusión de Resina.

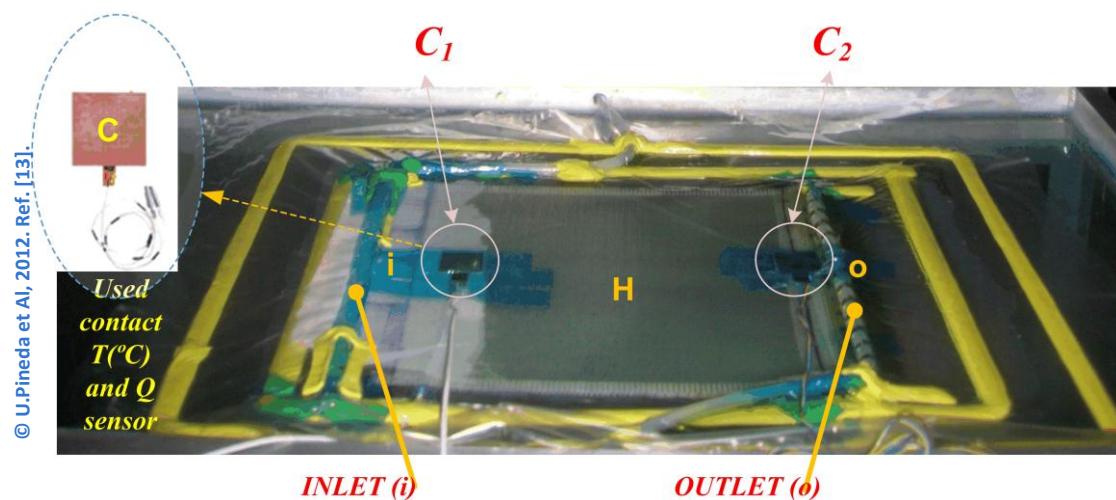


Figura 4.25. Instalación experimental para fabricación de las placas planas. Los sensores cerodimensionales (C) son puestos en la vecindad del inyector y venteo, tanto arriba y debajo de la preforma de fibra.

El molde usado en la Figura 4.25 es puesto dentro de una caja o armario negro, como se muestra en la Figura 4.17. El molde inferior, es una placa de vidrio o cristal y el contra-molde un film-plástico transparente y flexible. Las placas son dejadas polimerizando

hasta que se presenta ausencia de detección de calor liberado en el sistema de adquisición de datos. Los procesos de fabricación son ejecutados a temperatura ambiente de 22°C y una humedad relativa de 50%.

Un software de adquisición personalizado, reportado en un estudio anterior [11], se usó en este trabajo. Este software ha sido alimentado por cuatro (4) sensores cero-dimensionales e imágenes térmicas desde una cámara infrarroja durante la polimerización del molde. Las Figura 4.25 a Figura 4.17 explican claramente la colocación de los sensores cero-dimensionales y la cámara IR. La cámara IR es puesta verticalmente 1.3m arriba del molde para una vista entera del composite. Los subíndices “c” e “IR” se usan para referirse a sensores cero-dimensionales y señales térmicas. Durante los tests, todo el equipamiento ha sido puesto dentro de la caja negra (ver Figura 4.17) para prevenir interacciones externas tales como Fuentes de calor no-controladas o ruido térmico que pueda afectar la respuesta de los sensores anteriormente comentados.

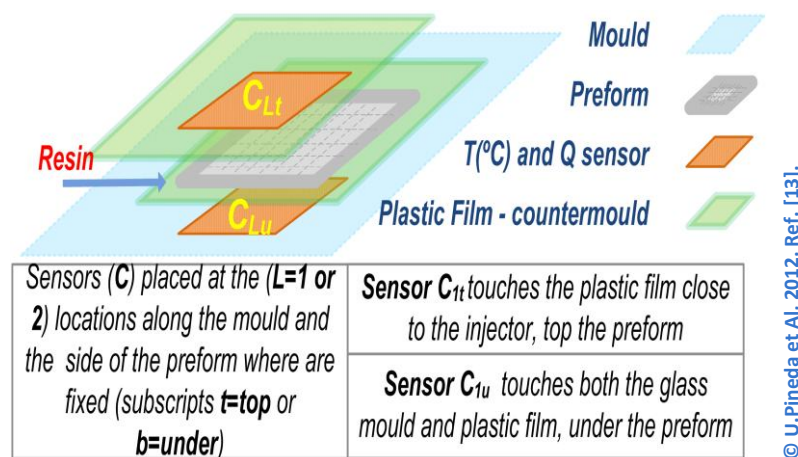


Figura 4.26. Colocación de los sensores cero-dimensionales durante el preforming para medir el calor liberado hacia arriba y hacia abajo, en un área de estudio del molde.

4.7.3 Tests Ejecutados, Datos Adquiridos y Algoritmos para Estimaciones de Grado de Curado.

En la Tabla 4.2. Se resumen los datos adquiridos antes y después de la fabricación de las seis placas planas. Dos tests fueron ejecutados para cada número n de capas de fibra. En la Tabla 4.2. , m_p corresponde a la masa de la placa final obtenido mediante una balanza, h es el promedio del espesor medido en las placas finales y V_f , el volumen de fibra, [245], que ha sido calculado como muestra la ecuación (4.6).

T_{est}	n	m_p (g)	h (mm)	V_f (%)	m_r (g)	V_p (cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	Heat Flux sensor	IR Camera
								Sample resin mass below sensed area	Sample resin mass below sensed area
								m_r^c (g)	m_r^{IR} (g)
1	2	153,55	0,92	44,16	85,74	82,8	1,85	0,8574	1,88E-03
2	2	167,12	0,89	45,65	90,83	80,1	2,09	0,9083	2,00E-03
3	4	259,64	1,73	46,97	137,69	155,7	1,67	1,3769	3,03E-03
4	4	289	1,95	41,67	168,58	175,5	1,65	1,6858	3,70E-03
5	6	432,89	2,8	43,53	244,46	252	1,72	2,4446	5,37E-03
6	6	502,35	2,96	41,18	295,5	266,4	1,89	2,955	6,49E-03

© U. Pineda et Al, 2012. Ref. [13].

Tabla 4.2. Datos de Fabricación de los tests y cálculos necesarios para las estimaciones de DoC.

Además, m_r se establece para la masa de resina de la placa, V_p para el volumen de placa, ρ_p para la densidad de placa. Finalmente, la cantidad de masa de resina relativa a cada área sensorizada es calculada mediante la ecuación (4.7); así m_r^c es la masa de resina relativa al área de un sensor de contacto y m_r^{IR} es la masa de resina relativa a un pixel.

En la ecuación (4.6), $\rho_{sup}=518g/m$ s la densidad de área de la preforma y $\rho_{vol}=2,55*10^6g/m^3$, la densidad volumétrica de las fibras de vidrio.

$$V_f = \rho_{sup} * n / h * \rho_{vol} \tag{4.6}$$

$$m_r^k = (A_k * h * \rho_p) * (1 - V_f) \tag{4.7}$$

Donde, A_k es el área del sensor de contacto $A_c=9cm^2$ o área de pixel $A_{IR}=0,0098cm^2$ sobre el molde. Puede ser visto que h a lo largo de las placas finales varía con la V_f y que m_r^k es una masa de resina para un área sensorizada. Ver las dos últimas columnas en la Tabla 4.2.

4.7.4 Algoritmos de Estimación del DoC mediante Sensores de Flujo de Calor y Cámara Térmica infrarroja.

La determinación de DoC durante un proceso exotérmico aparece en varios estudios como en [228], [246]. Esta ecuación se muestra abajo:

$$DoC = (1/H_T) * \int_{t_i}^{t_f} \dot{H} * dt \tag{4.8}$$

Donde, DoC es definido como la ratio entre la cantidad de flujo de calor Q generado, en el tiempo definido por t_i and t_f , y el calor total de la reacción, H_T . H_T es medido por medio de una DSC. Esta integración calcula el área bajo la curva de calor exotérmico el cual es la cantidad de energía lanzada durante proceso. En la fabricación de composite, esa energía es tenida en cuenta para comparar con H_T instantáneamente obteniendo una estimación de DoC instantánea.

Por consiguiente, aprovechando la ecuación (1.1), Q puede ser el flujo de calor radiativo Q_{IR} calculado para cualquier pixel de imagen adquirida instantáneamente por la cámara IR o cada uno de los cuatro flujos de calor instantáneos Q_c por un sensor de contacto. Así, para comparaciones subsiguientes de DoC por ambas clases de datos de calor, ellos deben ser adquiridos simultáneamente. Sin embargo, son dependientes del tiempo como también dependientes del área sensorizada como mencionó [11] (por ejemplo el área de pixel o la forma del sensor de contacto).

A fin de usar estos flujos de calor disponibles par a las estimaciones de DoC entonces, al hacer una simple variación de la expresión básica de la ecuación (1.1), esto llega a ser el DoC estimado por radiación de calor como denota DoC_{IR} como muestra la ecuación (4.9).

$$DoC_{IR} = (1/H_T) * \int_{t_i}^{t_f} \left\{ \varepsilon \sigma * [T_{IR}^4 - T_A^4] / [(\rho_p \cdot h) * (1 - V_f)] \right\} * dt \quad (4.9)$$

Donde, $\sigma = 5.66704 * 10^{-8} \text{ w m}^{-2} \text{ k}^{-4}$ es la constante de Estefan Boltzmann. T_{IR} es la temperatura de pixel instantánea capturada mediante imágenes térmicas. T_A es la temperatura ambiente instantánea durante cada test expresado en Kelvin (K), ε es la emisividad que depende de las propiedades del contra-molde (esta puede variar entre cero y la unidad), t_i and t_f representan el tiempo de inicio y de finalización para el cálculo de DoC. H_T es 350 J/g , este es el calor total de la reacción el cual fue medido con un calorímetro diferencia modulado M-DSC Q1000 suministrado por TA Instruments. Asimismo, un filtro paso bajo es usado para procesar estos datos y eliminar el ruido en las imágenes térmicas.

Igualmente, la ecuación (1.1) se convierte en el DoC estimado por adquisición de flujo de calor a través de sensores cero-dimensionales y se denota como DoC_c como muestra la ecuación (4.10). Donde, $Q_c (\text{w/m}^2)$ es el flujo de calor medido por contacto.

$$DoC_c = (1/H_T) * \int_{t_i}^{t_f} \left\{ Q_c / [(\rho_p \cdot h) * (1 - V_f)] \right\} * dt \quad (4.10)$$

4.7.5 Análisis Comparativo del Curado Alcanzado en Zonas de Inyección y Venteo.

Se analizan tres tests y sus repeticiones, cada una de las cuales tiene diferente n (es decir; 2, 4 y 6 capas de fibra de vidrio). Durante las etapas de curado de los tests, el DoC instantáneo se estima por medio de dos técnicas diferentes de monitorización y mediante las ecuaciones (4.9) y (4.10) (ver la Figura 4.26 y la Figura 4.17).

El DoC en las áreas vecinas al inyector y al venteo son especialmente estudiadas en todos los tests. La Figura 4.17 a la Figura 4.29 muestran el DoC estimado como función del tiempo en las áreas antes mencionadas.

Por consiguiente, las curvas azules estiman el DoC en dos pixeles, así que ellos representan la posición más cercana a los sensores cero-dimensionales (cerca del inyector y venteo). En cada imagen térmica, los pixeles son evaluados de acuerdo a la ecuación (4.9). Adicionalmente, las curvas rojas representan el grado de curado DoC promedio, el cual resulta de calcular continuamente el grado de curado DoC de arriba y debajo de la pieza (ver Figura 4.26).

La característica común entre los seis tests ejecutados es la diferencia en los grados de curado DoC's a lo largo del molde, tanto en el inyector como en el venteo. El grado de curado DoC no es homogéneo a lo largo del molde físicamente confirmado a través de ambas técnicas de sensorización térmica. Se observa que la variación del grado de curado está relacionada con la variación de espesor a lo largo de la pieza. El espesor de la pieza es directamente afectado por los gradientes de presión en fabricaciones ejecutadas por Infusión de Resina (RI).

En pocas palabras, cuanto más gruesa es la placa, se alcanzan transferencias de calor más altas, lo cual por sí solo, no es suficiente para confirmar tasas más altas de polimerización, como se explicará más adelante. En zonas de más alta concentración de masa de resina una mayor liberación de calor, y probablemente dichas zonas alcanzan un mayor grado de curado DoC potenciado por el intercambio térmico.

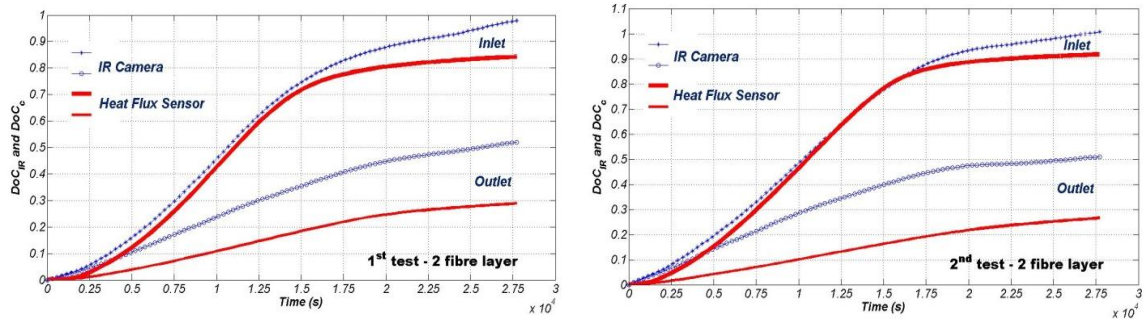


Figura 4.27. DoC alcanzado en el inyector y venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (2) capas /laminas de fibra de vidrio.

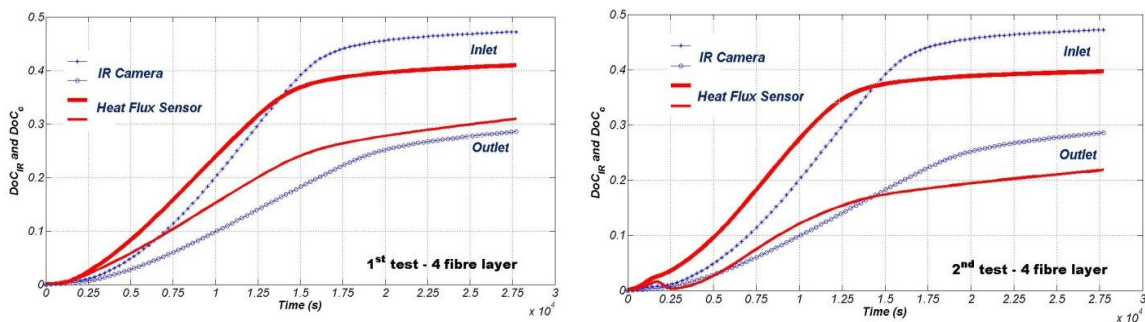


Figura 4.28. DoC alcanzado en el inyector y el venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (4) capas /laminas de fibra de vidrio.

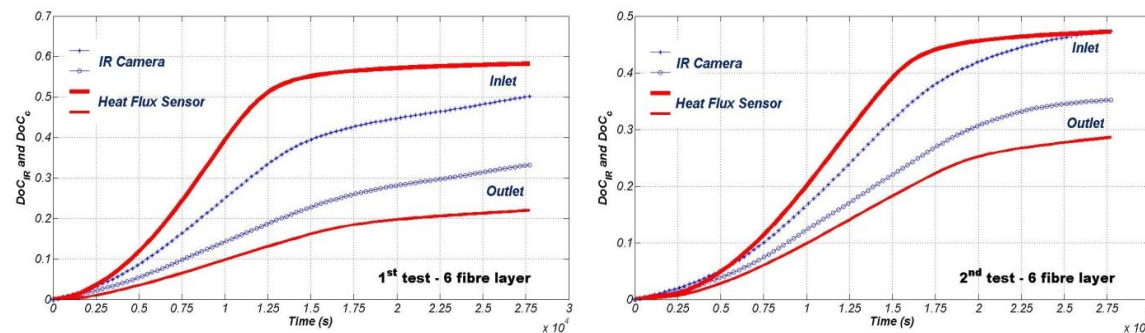


Figura 4.29. DoC alcanzado en el inyector y venteo. Tests ejecutados bajo condiciones de curado isotérmico usando (6) capas /laminas de fibra de vidrio.

Hay mayores transferencias de calor en las áreas vecinas al inyector, al parecer es siempre mayor que en áreas vecinas al venteo ya que hay más masa de resina y por consiguiente, más liberación de calor desde el inyector. Así que, se puede decir que el método de estimación de DoC usando la ecuación (4.9) basado en cámara térmica

infrarroja, arroja una aproximación importante del DoC en el inyector y venteo, no obstante, la exactitud de dicha estimación está condicionada a la difícil determinación online del espesor y la concentración de volumen de fibra, poros y resina, para cada zona-unidad-de-volumen de la lámina, como también de la transferencia de calor desde zonas aledañas. En efecto, se puede notar la variabilidad no-controlada de parámetros que afectan indudablemente el curado, ya que el primer test y su repetición, no arrojan resultados iguales a pesar de haberse tenido rigor científico en la ejecución de la experimentación, buscando hacer y configurar todo de la misma manera que el primer test, para cada pareja de test, a fin de buscar repetibilidad.

Considerando lo anterior, la exactitud del nuevo método de estimación del DoC podría ser mejorada. Esto se discute a continuación. Primero, los sensores cero-dimensionales tienen una sensibilidad del orden de $0,0001^{\circ}\text{C}$, mientras que la sensibilidad de la cámara térmica es de $0,1^{\circ}\text{C}$. Así que, las variaciones de temperatura menores que $0,1^{\circ}\text{C}$ no serán detectadas. Sin embargo, el error en las mediciones infrarrojas especialmente causado por la emisividad puede ser corregido mediante calibración in-situ o caracterización del ambiente de fabricación. Segundo, para todas las estimaciones mediante la cámara, un espesor promedio medido en cada placa fue usado (ver Tabla 4.2). Por consiguiente, asociando el espesor de cada pieza a su análisis termográfico podría mejorar la exactitud en las estimaciones del DoC.

4.8 Hacia una Monitorización de Calidad para Controlar el Grado de Curado (DoC) en la Fabricación de Piezas de Composite.

Considerando la sección anterior, sección 4.6, la estimación de grado de curado puede generalizarse a todo el molde o pieza partiendo de las medidas bidimensionales de calor, obtenidas en esa sección. Por tanto, aprovechando el método de calibración termográfico de la sección 4.6.2, basada en dos sensores de flujo de calor cero-dimensionales (ver Figura 4.18), puede ejecutarse una estimación simple del DoC (Degree of Cure), usando la ecuación (4.11). De esta manera, se consigue con la cámara térmica, la flexibilidad y versatilidad de medir instantáneamente el mapa bidimensional del flujo de calor, la temperatura (2D) y el grado de curado (2D), con la pieza en proceso. Se utiliza la instalación de la Figura 4.17 y los datos experimentales obtenidos desde la primera fabricación ejecutada, según Tabla 4.2.

4.8.1 Método de Monitorización DoC Usando Termografía Calibrada.

Para monitorizar el grado de calor (DoC_{2D}) de una pieza, tiene que ser calibrada la cámara térmica. Las referencias térmicas in-situ (sensores cero-dimensionales) sobre el molde ayudan en la tarea de calibración. Estas referencias, son requeridas ya que la cámara térmica arroja tan solo temperaturas aparentes, que no son exactas debido a la influencia de la emisividad, como se vio en la sección 4.6. A pesar de que el método se desarrolla, colocando las referencias térmicas, cerca del inyector T_{inc} y del venteo T_{onc} u demás lugares T_{pnc} a lo largo del molde (ver Figura 4.18). Estos pueden ser colocados, en cualquier sitio del molde bajo proceso, pero sus coordenadas espaciales han de quedar perfectamente registradas en la termografía. Por lo tanto, mediante los sensores cero-dimensionales como referencia in-situ (ver C, Figura 4.17) cada pixel de imagen puede ofrecer una medición de flujo de calor calibrado del proceso de curado.

Por consiguiente, las diferencias de temperatura (ΔT) son calculadas mediante restas consecutivas, así, $\Delta T = T - T_s$, donde T es la temperatura de contacto o no-contacto y T_s la temperatura ambiente. La calibración necesita conocer el error, como lo muestra la Figura 4.22, en cada instante como $e(t) = T_c(t) - T_{pnc}(t)$, donde $e(t)$ es el error, $T_c(t)$ es la temperatura de contacto y $T_{pnc}(t)$ es la temperatura aparente del pixel.

Los flujos de calor de pixel (Q) resultantes ya calibrados mediante la rutina de la Figura 4.21 son usados para estimar el DoC.

$$DoC = \frac{1}{H_T} * \int_{t_i}^{t_f} Q dt \quad (4.11)$$

La determinación del DoC durante un proceso exotérmico aparece en varios estudios como en los trabajos [228], [246] y la ecuación utilizada es la (4.11):

Donde, DoC es definido como la ratio entre la cantidad de flujo de calor Q generado, en el tiempo definido por t_i y t_f , y el calor total de la reacción, H_T . H_T es medido usando una DSC, aunque podría ser una caracterización hecha a medida, realizada con los instrumentos disponibles en la presente sección. Esta integración calcula el área bajo la curva de calor exotérmico, que es la cantidad de energía liberada durante el procesamiento. En fabricación de composites, esa energía aprovechada para comparar con H_T instantáneamente obteniendo una estimación del grado de curado instantáneo. Por consiguiente, la ecuación (4.11) se transforma en la ecuación (4.12), donde, Q_p

(w/m^2) es el flujo de calor de pixel que se estima mediante rutina de calibración mostrada en la Figura 4.21, y el DoC_p es el grado de curado relativo a cada pixel usado desde una imagen térmica.

$$DoC = \frac{I}{H_T} * \int_{t_i}^{t_f} (Q_p/\rho_p) \cdot z \cdot V_r \cdot dt \quad (4.12)$$

Para la fabricación ejecutada, el valor de H_T es $350J/g$, este es el calor total de la reacción que es medido con una M-DSC Q1000 de TA Instruments. Las otras variables son establecidas, ρ_p para la densidad del composite, z para el espesor y finalmente, V_r para la cantidad de resina en la muestra evaluada ($V_r = 1 - V_f$, donde V_f es el contenido de volumen de fibra). Un filtro de frecuencias bajas es usado para procesar datos que introducen ruido en las imágenes térmicas.

4.8.2 Resultados Experimentales

La Figura 4.30 muestra el mapa de DoCs de una placa cuadrada, obtenido con una cámara térmica en asocio con el algoritmo de la Figura 4.21 y la aplicación de la ecuación (4.12). Se observó que la variación del grado de curado DoC está altamente relacionada a la variación del espesor a lo largo de la pieza y este espesor es afectado por el gradiente de presión durante la infusión. Esto significa que las zonas donde la placa es más gruesa, alcanzan liberaciones de energía más grandes que debidamente comparadas con una referencia fiable, permitirían obtener sus de grados de curado. Los grados de curado más significativos podrían ser analizados con el efecto de masa local, ya que al concentrarse importantes masas de resina activa localizadamente, estas zonas liberan más calor. Se observa que el DoC, erróneamente en la proximidad del inyector alcanza tasas más altas de curado que en las proximidades al venteo, sin embargo, esto es debido a que el espesor (z) y la fracción volumétrica V_r en el inyector, son desconocidos y difíciles de evaluar. Por tanto, el cálculo de grado de curado es válido para zonas para las que se cumple el espesor z promedio utilizado para las estimaciones.

Se puede decir, que el método de estimación del DoC usando la ecuación (4.12), la cual se basa en los datos de la cámara IR, puede contribuir al mejoramiento de los datos que llegan al controlador dentro de un control de bucle cerrado. Por tanto, al usar un actuador térmico apropiado, la entrada de calor instantáneo aplicada al molde podría ser optimizada. De esta manera, controlar que toda el área-composite alcance las más altas tasas de grado de curado, DoC.

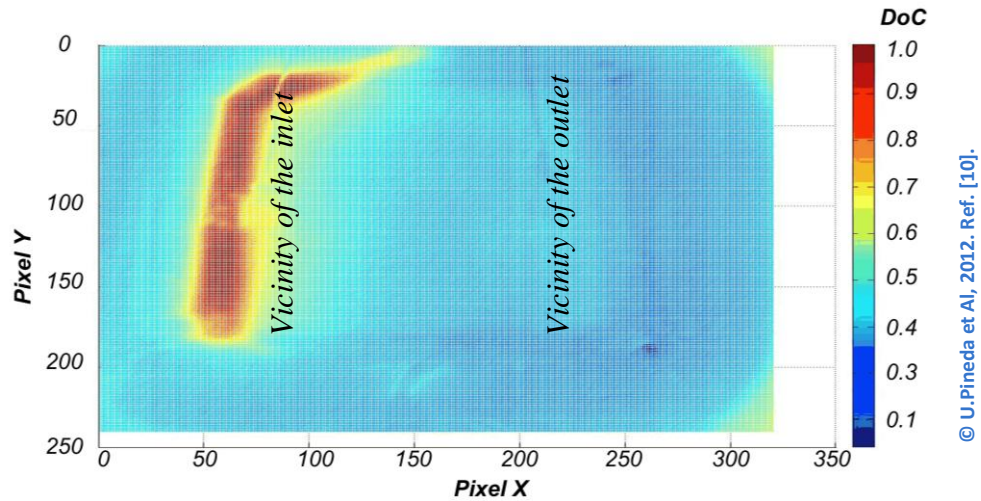


Figura 4.30 Mapa final de grados de curado, DoCs en la pieza final

4.9 Conclusiones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se evaluó la habilidad de las cámaras infrarrojas en la medición de los mismos parámetros que se pueden medir usando sensores de flujo de calor cero-dimensionales, durante el curado de una pieza. Con frecuencia, estos sensores puntuales son de dimensiones restringidas (puestos sobre el molde), respecto de las dimensiones de las piezas-composite. En particular, el grado de curado se calculó como un parámetro ejemplo. Para evaluarlo, mediante un Generador Artificial de Flujo de Calor Programable (Molde Heat PAG) basado en célula peltier, se simuló el comportamiento de la transferencia de calor de una pequeña pieza durante su fabricación, documentada en [34]. Mediante Heat PAG se puede simular la cinética de curado de cualquier resina limpia (neat resin) testada en la DSC (Differential Scanning Calorimeter) o a partir de datos térmicos capturados desde un molde dado, bajo proceso de curado. Se demostró como los sensores no-intrusivos (Cámaras térmicas infrarrojas) pueden detectar el fenómeno de transferencia de calor tal como lo hacen los sensores de flujo de calor cero-dimensionales por conducción. Sin embargo, se evidenció que las cámaras IR requieren una calibración apropiada a fin de obtener repetibilidad en las mediciones. Mencionado procedimiento, puede ser obtenido por medio de la caracterización de la emisividad y del entorno de la pieza a fabricar, como también, mediante la inclusión de sensores térmicos o de flujo de calor en la escena (molde o pieza) a monitorizar con la cámara IR. Para la medición aproximada de emisividad en moldes experimentales y/o pequeñas muestras, Heat PAG Mold podría llegar a ser aprovechado, utilizando el método de la cobertura de emisividad conocida, tal como se explicó en la sección 4.5.2.

A la luz de los resultados preliminares de la sección 4.4, [11]; se llevó a cabo la sección 4.6, [12], a través de la cual se demostró que por medio de un método de calibración in-situ es posible medir el flujo de calor bi-dimensional mediante técnicas no-intrusivas (cámaras térmicas). Para ello, se usó como referencia de calibración, sensores cero-dimensionales [105], como una técnica que arroja mediciones precisas y ha sido bastante probada en procesos LCM. Este método de medición aportó nuevas ideas para el mejoramiento de las técnicas de monitorización de los procesos de fabricación de piezas de material compuesto, especialmente cuando se usa la técnica de Infusión de Resina (RI). La gran flexibilidad y versatilidad que ofrecen los métodos alcanzados en el trabajo [12], como también la capacidad de monitorizar grandes áreas, así como medir el flujo de calor de diferentes lugares en un molde bajo proceso, en el mismo instante de tiempo, supera las limitaciones típicas exhibidas por los sensores térmicos cero-dimensionales. Por lo último, los métodos no-intrusivos despiertan especial interés en ámbitos científicos e industriales, ya que podrían ser extendidos a la monitorización del curado de piezas de composite de gran envergadura, así como ser mejor explotados para el estudio de la fenomenología física presente en los procesos LCM.

Con la capacidad de hacer mediciones de calor en cualquier parte del molde basados en estas técnicas de sensorización térmica (combinación técnicas intrusivas y no-intrusivas), obtenidas a través de las secciones 4.4 y 4.6, trabajos publicados en los [11], [12], se avanzó hacia la sección 4.7, un trabajo experimental publicado en [13], en el cual se estimó el grado de curado (DoC) mediante los flujos de calor obtenidos en las áreas cercanas al inyector y al venteo en cada placa de composite, sin embargo, no se calibra la cámara térmica para realizar mencionadas mediciones. Por lo tanto, se evalúa la precisión de la técnica termográfica respecto de la técnica con sensores cero-dimensionales. Especialmente se encontró que:

- La homogeneidad de la liberación de energía varía a lo largo de una pieza. Particularmente, este comportamiento fue identificado o confirmado por el DoC resultante en dos zonas de la misma. Las áreas vecinas al inyector, alcanzan erróneamente tasas de grado de curado (DoC) mayores que en áreas vecinas al venteo. Es un error de cálculo, ya que utilizan fracciones volumétricas y espesores promedio (V_r y z) para los cálculos de curado de ambas zonas, arrojando resultados incorrectos para el inyector y una buenas estimación para el venteo. Haciendo relevante, la cantidad de masa concentrada en el inyector y su termodinámica diferente en el curado de piezas, en general. Estas variaciones en la liberación de energía pueden inducir deformación de la pieza o estreses internos en el composite.

- La estimación más simple de DoC basada en imagen térmica es válida tan solo para el venteo, aunque no es exacta al comparar con los métodos de medición del DoC que usan sensores de flujo de calor cero-dimensionales. Esto, se confirma de acuerdo a las gráficas en la sección de resultados, discusión y trabajos futuros del trabajo [13]. No obstante, el parámetro medido denominado DoC_{IR} utilizando el algoritmo para el cálculo de DoC, arroja un excelente indicador para monitorizar la evolución física de la reacción química que presenta la pieza de matriz-refuerzo en proceso de polimerización, ofreciendo la posibilidad de monitorizar piezas más grandes. El error no es estimado y se deducen de estos resultados, la opción de mejorarlos, mediante calibración, esto es mejorando los resultados del trabajo [12], con la finalidad de monitorizar no solo unos cuantos pixeles, sino toda la imagen y así producir un mapa de calores y con este obtener un mapa de curados, a fin de avanzar hacia el control y optimización de la etapa de curado en procesos LCM.

Finalmente, aprovechando el método de calibración termográfico de la sección 4.6.2, basada en dos sensores de flujo de calor cero-dimensionales (ver Figura 4.18), se pudo estimar usando la ecuación (4.11), para estimar de forma simple el DoC (Degree of Cure) relativo a cualquier parte de la pieza, obteniendo un mapa bidimensional instantáneo de la evolución del curado. Este mapa, puede ser vinculado computacionalmente, siguiendo los procedimientos descritos para el sistema de monitorización AVPP, presentado en el capítulo 2. Así obtener, una monitorización online-interactiva de la pieza bajo proceso, en este caso del grado de curado. Aunque, como ya se dijo antes, este podría extenderse a cualquier otro parámetro-clave, que se considere importante según el diseño inicial. Nuevamente, los resultados son válidos para zonas aledañas al venteo, y a lo largo de la pieza, más no en la tubería y zonas aledañas al inyector, ya que la referencia de fracción volumétrica y espesor, no es válida.

Capítulo 5

Conclusiones. Discusión y Trabajos futuros.

5.1 Conclusiones.

En lo referente al primer objetivo de esta tesis, se ha conseguido definir un **marco computacional y tecnológico basado en VA⁶⁵**, que permite ejecutar monitorización completa y optimizada durante todas las etapas que conforman la fabricación de un composite usando procesos LCM-RIFT. Este nuevo enfoque de monitorización ofrece alta resolución espacial, temporal y mayor capacidad dimensional que metodologías de monitorización precedentes. Se definieron los requerimientos tecnológicos para determinar la variabilidad de diferentes **parámetros clave**, que intervienen en la impregnación y el curado-durante el procesado de piezas de grandes dimensiones. Este sistema aporta compatibilidad espacial-temporal entre un modelo numérico tridimensional de la pieza y los datos monitorizados desde las diferentes coordenadas relativas a la fabricación o moldeo. En esencia, en el capítulo 2, se describió la herramienta que determina, como realizar el vínculo online entre **virtualidad y realidad** durante el proceso de fabricación. La malla 3D de la pieza, se puede convertir en un sistema numérico de información basado potencialmente en la obtención, actualización o refresco de los datos reales del proceso de fabricación, adquiridos mediante el uso de diversas tecnologías de monitorización y medición, especialmente basadas en visión artificial de espectro visible e infrarrojo.

⁶⁵ VA – *Visión Artificial*.

El enfoque de esta metodología de monitorización resulta **flexible y versátil**. Flexible, ya que puede adaptarse a cualquier pieza sin necesidad de interactuar conductivamente con el molde ya que son técnicas no-intrusivas. Esto implica que pueden ser trasladables a otro tipo de geometría de forma directa. Además, permite la combinación y compatibilidad con otro tipo de tecnologías de naturaleza intrusiva (de dominio o área de monitorización restringida, local). Versátil, ya que podría adaptarse para incorporar integralmente la información producida en todas las etapas del proceso de fabricación. Se demuestra en la parte experimental del trabajo [17], donde se hizo un uso preliminar, de parte del marco computacional aquí definido. En ese trabajo, el diseño de proceso de la pieza fabricada es asistido computacional y tecnológicamente, para definir el canal óptimo de distribución [144], que ha de transportar la resina durante el llenado del molde [17]. El canal resultante se proyectó sobre el molde mediante un proyector lumínico. Esto es posible, gracias a que el modelo virtual tridimensional es una excelente aproximación de la realidad. Así, con facilidad el operario puede manipular y fijar las tuberías sobre el preformado (láminas de fibra) de la pieza, manteniendo rigor espacial y dimensional de acuerdo a las líneas de referencia proyectadas.

Respecto al segundo objetivo de la tesis que se desarrolla en el capítulo 3, se utilizó el marco computacional anteriormente definido explorando nuevas formas para la medición de parámetros y variables relativas al comportamiento del flujo de resina sobre tejidos anisotrópicos mediante visión artificial de espectro visible. Los resultados preliminares fueron publicados en [8]. En ese trabajo, se desarrollaron métodos de calibración dimensional para ejecutar mediciones espaciales. Esto último, permitió analizar las dimensiones y la forma de la zona parcialmente saturada—que produce el frente de flujo entre la zona seca y mojada, en el refuerzo-laminado de fibra. Esta zona es definida como zona de impregnación y se pudo evidenciar su gran variabilidad en el contorno del frente de flujo, revela las diferentes permeabilidades y/o mecánicas de impregnación. En este sub-apartado, se aportan mejoras en las técnicas existentes para medición de la permeabilidad (mediante la medición de los ejes principales de la elipse en refuerzos anisotrópicos) de refuerzos anisotrópicos. Las técnicas basadas en visión artificial presentadas en esta tesis para medición de la permeabilidad son versátiles y sistematizadas. Superan los enfoques basados en sensores cero-dimensionales con posiciones pre-fijadas para mediciones manuales muestreadas principalmente por operadores-humanos.

En relación al tercer objetivo de la tesis y que se compendia en el cuarto capítulo, se utilizó el marco computacional anteriormente definido para el estudio de indicadores de evolución del grado de curado. Se avanzó explorando la termografía infrarroja,

buscando su utilidad más allá del uso convencional para medir temperaturas: estimar temporal y espacialmente la variación del grado de curado de la pieza en proceso. Como primer paso, en el trabajo [11], se evaluó la habilidad de las cámaras infrarrojas en la medición de los mismos parámetros que se pueden medir usando sensores de flujo de calor de dimensiones restringidas y que suelen ser puestos espacialmente distribuidos sobre el molde bajo procesamiento. En particular, el grado de curado fue estimado como un parámetro ejemplo a partir del flujo de calor, tal como ha sido definido en múltiples trabajos en la literatura o como lo hace la técnica de caracterización calorimétrica DSC. Por tanto, mediante un Generador Artificial de Flujo de Calor Programable (Molde Heat PAG) basado en célula peltier, se simuló el comportamiento de la transferencia de calor de una pequeña pieza durante su fabricación, reportada en [34]. Mediante Heat PAG se podría simular la cinética de curado de cualquier matriz a partir de datos térmicos capturados desde un molde dado, bajo proceso de curado o desde caracterizaciones mediante DSC. Con ese trabajo se demostró como los sensores no-intrusivos (Cámaras térmicas infrarrojas) pueden detectar el fenómeno de transferencia de calor tal como lo hacen los sensores de flujo de calor por conducción. No obstante, se evidenció que las cámaras IR requieren, bien de una calibración apropiada o del conocimiento de la evolución de la emisividad durante el curado de la resina, a fin de obtener repetibilidad y veracidad en las mediciones de temperatura. En efecto, la optimización de las técnicas termográficas depende del conocimiento de las propiedades de radiación térmica, es decir de la emisividad de la superficie bajo inspección. La emisividad es un parámetro que se puede medir, sin embargo encarna cierta complejidad que requiere de un esfuerzo tecnológico no contemplado en esta investigación y que además implicaría la necesaria caracterización previa de la resina. Se hizo necesario calibrar la termografía mediante la inclusión de sensores térmicos o de flujo de calor en la escena a monitorizar con la cámara IR, y así caracterizar la transferencia de calor fiablemente.

A la luz de los resultados y conclusiones del trabajo [11], se llevó a cabo el trabajo [12], a través del cual se demostró que por medio de un método de calibración in-situ es posible medir el flujo de calor bi-dimensional mediante técnicas no-intrusivas (cámaras térmicas IR). Para ello, se usaron como referencia de calibración, sensores cero-dimensionales [105] que arrojan mediciones precisas y como método de detección ha sido bastante testado en procesos LCM. Este método de medición del flujo de calor nos aportó nuevas ideas para el mejoramiento de las técnicas de monitorización clásicas en LCM-RIFT. La gran flexibilidad y versatilidad que ofrecen los métodos alcanzados en el trabajo [12], como también la capacidad de monitorizar grandes áreas, así medir flujos de calor separados espacialmente con el mismo instrumento, en el mismo instante de tiempo, supera magníficamente las limitaciones típicas exhibidas por los sensores

térmicos de inspección local. Estas restricciones se explican especialmente debido a su dimensionalidad (la geometría, el tamaño) y las coordenadas de fijación (zona) sobre la pieza. Quedó definida, por tanto, la capacidad de hacer mediciones de calor en cualquier parte del molde basados en estas técnicas de sensorización térmica (combinación técnicas intrusivas y no-intrusivas), obtenidas mediante los trabajos [11], [12].

En otro trabajo experimental publicado en [13], se estimó el grado de curado (DoC) mediante los flujos de calor obtenidos en las áreas cercanas al inyector y al venteo en cada placa de composite. Se comparó la capacidad y la precisión de la técnica termográfica respecto de la técnica con sensores cero-dimensionales. Especialmente se encontró, variabilidad de la temperatura y flujo de calor a lo largo de la pieza, evidenciándose especialmente entre zonas aledañas al inyector y venteo. Lo cual, hace relevante las cantidades diferentes de masa concentrada en ambas zonas que ponen de manifiesto la necesaria consideración de la variabilidad de los espesores del molde propia de los procesos de infusión en bolsa y que no se ha realizado en esta Tesis. Ya que la variación del flujo de calor es proporcional a la variación del grado de curado, este trabajo propuso un algoritmo para la estimación del grado de curado basado en cámara térmica IR. Sin embargo, cabe aclarar que debido a que esta técnica de medición se ejecuta a través de la bolsa plástica típica como contra molde en procesos RIFT, y que su atenuación térmica es desconocida, las técnicas de monitorización del grado de curado presentadas, conducen a un DoC_{IR}^{66} . Finalmente, con la finalidad de monitorizar no solo una determinada área definida por unos cuantos píxeles como se desarrolla en [13], sino toda la imagen y así producir un mapa de calores y con este obtener un mapa de indicadores de-curados o grados de curado aproximados, se desarrolla el trabajo [10]. Ese trabajo se propone, apuntando a ofrecer calidad en la monitorización aportando elementos que permiten avanzar hacia el control y optimización de la etapa de curado en procesos LCM-RIFT.

5.2 Conclusions

As regards the first objective of this thesis, it has been possible to specify a **computational and technological framework based on AV⁶⁷**, which enables complete, optimized monitoring throughout all the stages involved in manufacturing a composite, using LCM-RIFT processes. This new monitoring approach provides high spatial and temporal resolution, and greater dimensional capacity than previous

⁶⁶ DoC_{IR} – Degree of Cure by InfraRed – Grado de Curado por método Infrarrojo

⁶⁷ AV – Artificial Vision

monitoring methodologies. The technological requirements were specified for determining the variability of different **key parameters** involved in impregnation and curing when processing large parts. This system provides spatial-temporal compatibility between a three-dimensional numerical model of the part and the data monitored from the different coordinates relative to the manufacturing or moulding process. In essence, Chapter 2 described the tool that specifies how to create the online link between **virtuality and reality** during the manufacturing process. The part's 3D mesh can be converted into a numerical system of information potentially based on obtaining, updating or refreshing the real data from the manufacturing process, acquired through the use of various monitoring and measurement technologies, especially based on visible spectrum and infrared artificial vision.

This monitoring and methodological focus is **flexible and versatile**. It is flexible since it can adapt to any part without the need to interact conductively with the mould, because these are non-intrusive techniques. This implies that they may be transferred directly to other types of geometry. It also allows for combination and compatibility with other intrusive technologies (domain or restricted, local area monitoring). It is versatile since it may be adapted to comprehensively incorporate the information produced at every stage of the manufacturing process. This is shown in the experimental section of the work [17], where preliminary use was made of part of the computational framework defined here. In that work, the design process of the manufactured part is assisted computationally and technologically so as to define the optimum distribution channel [144] to transport the resin during mould-filling [17]. The resulting channel is projected onto the mould by means of a light projector. This is possible because the three-dimensional virtual model is an excellent approximation of reality. Thus, the operator can easily handle and set the tubes on the part's preform (fibre sheets), strictly maintaining dimensions and space according to the planned baselines.

As for the thesis' second objective, described in Chapter 3, the previously defined computational framework was used, exploring new ways to measure parameters and variables as regards the behaviour of resin flow over anisotropic fabrics via visible spectrum artificial vision. The preliminary results were published in [8]. In this work, dimensional calibration measurement methods were developed for taking measurements of space. The latter allowed for analysis of the dimensions and shape of the partially saturated zone produced by the flow front between the dry and wet areas in the fibre reinforcement/sheet. This zone is defined as the impregnation zone. Its great variability in the flow front contour became clear, revealing different impregnation permeabilities

and/or mechanics. This sub-section provides improvements to the existing techniques for measuring the permeability of anisotropic reinforcements (by measuring the main axes of the ellipse in anisotropic reinforcements). The artificial vision-based techniques presented in this thesis for measuring permeability are versatile and systematized. They outperform approaches based on zero-dimensional sensors with pre-set positions for manual measurements sampled mainly by human operators.

As regards the thesis' third objective, which is summarized in the fourth chapter, we used the previously defined computational framework to study the evolution indicators of the degree of cure. Progress was made by exploring infrared thermography, looking at its usefulness beyond its conventional use in measuring temperatures: estimating the variation in the part's degree of cure in the process, in terms of time and space. The first step in the work [11] evaluated the ability of the infrared cameras to measure the same parameters that can be measured using heat flow sensors of limited dimensions that are usually spatially distributed over the mould being processed. In particular, the degree of cure was estimated as an example parameter based on the heat flow, as has been described in many papers in the literature or as is done by the DSC calorimetric characterisation technique. So, using a Programmable Artificial Heat Flux Generator (Heat PAG Mould) based on a Peltier cell, the behaviour of heat transfer in a small part during manufacture was simulated. This is reported in [34]. Through the Heat PAG, it was possible to simulate the kinetics of curing for any array by using heat data captured from a given mould undergoing a curing process or from characterisations by means of DSC. This work showed how non-intrusive sensors (infrared thermal cameras) can detect the heat transfer phenomenon just as heat flux sensors do by conduction. However, it is clear that IR cameras require either suitable calibration or knowledge of the evolution of the emissivity during the curing of the resin, in order to obtain repeatability and accuracy in the temperature measurements. Indeed, thermographic optimization techniques depend on knowledge of the thermal radiation properties, i.e. the emissivity of the surface under inspection. Emissivity is a parameter that can be measured, but it involves some complexity that requires technological work not considered in this research and which would also imply the necessary prior characterisation of the resin. It was necessary to calibrate the thermography by including thermal or heat flux sensors in the scene to be monitored with the IR camera, and thereby characterise the heat transfer reliably.

In light of the results and conclusions from the work [11], more work was carried out [12] by which it was shown that using a method of in-situ calibration it is possible to

measure the bi-dimensional heat flux by means of non-intrusive techniques (IR thermal cameras). To do so, zero-dimensional sensors [105] were used as a reference for calibration, which give accurate measurements and which as a detection method has been widely tested in LCM processes. This method of measuring heat flux provided us with new ideas for improving the classic monitoring techniques in LCM-RIFT. The great flexibility and versatility of the methods created in the work [12], as well as the ability to monitor large areas and measure heat fluxes that are spatially separate with the same instrument and at the same instant of time, greatly outperform the typical constraints shown by local inspection thermal sensors. These constraints are explained particularly by their dimensionality (geometry and size) and the set coordinates (zone) on the part. The ability for measuring heat anywhere on the mould based on these thermal sensor techniques is thus defined (a combination of intrusive and non-intrusive techniques), obtained by means of these works: [11], [12].

In another experimental paper published in [13], the degree of cure (DoC) was estimated by means of heat fluxes obtained in areas near the injector and vent in each composite plate. The ability and accuracy of the thermographic technique were compared with respect to zero-dimensional sensors. Most especially, the variability in temperature and heat flux was found throughout the part, becoming clear especially between areas near the vent and injector. This gives relevance to the different quantities of concentrated mass in both zones, showing the consideration required regarding the variability of the thicknesses of the mould itself in infusion processes in a bag and which have not been performed in this thesis. Since the variation of the heat flux is proportional to the variation of the degree of cure, this work suggested an algorithm for estimating the degree of cure based on an IR thermal camera. However, it is clear that because this measurement technique is carried out via a typical plastic bag as counter-mould in RIFT processes, and that its thermal attenuation is unknown, the techniques presented for monitoring the degree of cure lead to DoC_{IR}^{68} . Finally, so as to monitor not only a given area defined by a few pixels as done in [13], but rather the whole image so as to create a heat map and with this obtain a map of indicators of curings or approximate degrees of cure, other work [10] was carried out. This work is proposed with the aim of providing quality in monitoring, contributing elements that enable progress towards control and optimization of the curing stage in LCM-RIFT processes.

⁶⁸ DoC_{IR} – Degree of Cure by InfraRed

5.3 Discusión y Trabajos Futuros

En general, se puede observar en la literatura que las técnicas de monitorización-medición de parámetros de proceso para composites han sido optimizadas para moldes pequeños y caracterización de pequeñas muestras de materiales. Sin embargo y como se demuestra en esta tesis, su desempeño resulta insuficiente para piezas industriales de gran envergadura. Por tanto, las técnicas propuestas en esta tesis son muy **recomendables para la monitorización de la alta variabilidad de los parámetros de proceso que potencialmente presentan las piezas cuando son consideradas diversas zonas de una misma**. Además se puede vislumbrar, que este tipo de herramientas aportan valor particularmente en:

- La toma de decisiones (ciclos de temperatura de curado, seguimiento interactivo del frente de flujo de resina, mapa de permeabilidades instantáneo, etc.). Para controlar los parámetros de inyección (p.ej. velocidad del frente de flujo, presión, o estimar el contenido de porosidad on-line)
- El estudio de las fenomenologías físicas presentes en un procesamiento.
- La verificación de modelos numéricos, para avanzar hacia la estimación de las propiedades mecánicas de las piezas con mayor precisión.
- Avanzar hacia herramientas de monitorización óptimas en el control o actuación eficiente durante estos procesos.
- Evaluar-estimar la desviación de los parámetros de diseño de proceso y su realidad en fabricación.
- La determinación del grado de curado, o grado de solidificación de la pieza. Esto último, resulta de gran interés, ya que la polimerización de una pieza se evidencia por los cambios en las propiedades de los materiales que la conforman: matriz-refuerzo. Sin embargo, los resultados de esta tesis evidencian que es muy complejo determinar el grado de curado en piezas procesadas bajo RIFT a partir de una referencia de laboratorio, como es la DSC⁶⁹. Esta divergencia, se fundamenta en la inexistencia de técnicas eficientes para el control y medición del espesor, de la porosidad y de la masa activa en cada unidad local de volumen, visualizando la

⁶⁹ DSC – Differential Scanning Calorimetry. Técnica de Calorimetría de Barrido-Escaneado Diferencial. Los resultados de caracterización de resinas, suelen ser empleados habitualmente como referencia para planificar el ciclo de temperaturas de curado. En esencia define-caracteriza la curva de curado-polimerización que deberían seguir las piezas durante su procesamiento.

pieza en pequeñas fracciones-o-unidades de volumen. En una fabricación real, se desconocen cómo es afectado el curado, por la presencia de aditivos en la resina o el molde, así como las heterogeneidades en las concentraciones de matriz activa, en zonas del inyector y venteo, respecto al resto del molde. Todo esto hace muy compleja la estimación del grado de curado de una pieza a partir de una técnica concebida para la caracterización de pequeñas muestras de material, como lo es, la DSC. Sin embargo, con el uso de la cámara térmica se abre una nueva e interesante vía. Se puede asociar el grado de curado a una característica física del material, esto es la medida de emisividad a través de la cámara IR. Este parámetro no depende de calibraciones previas, está asociada directamente al cambio de de las propiedades de los materiales cuando estos pasan de estado líquido a estado sólido. En el futuro, los métodos basados en la medición de la emisividad, podrían constituir un set de técnicas fiables para cuantificar y controlar el proceso de curado de una pieza-composite.

- En general, el método de calibración in-situ de flujo de calor presentado en [12] podría alcanzar mayor precisión conociendo la cantidad de masa activa (resina) localmente concentrada por zonas a lo largo del molde. En sentido inverso, desde ya se puede vislumbrar un método de medición indirecto, en tiempo real del espesor de la pieza o conocer la cantidad de resina concentrada por unidad de área, materia de altísimo interés actual en este campo; debido a sus múltiples posibilidades de aplicación industrial. Por ejemplo, conocer la variabilidad típica del espesor y sus tolerancias aceptables en piezas procesadas mediante LCM-RIFT, convertiría estos procesamientos en alternativa viable a procesos más costosos como RTM o procesamientos en autoclave. Para esto último, es imprescindible controlar el grado de curado con la finalidad de garantizar que la resina activa libere toda su energía.
- Al terminar la etapa de curado, estimar qué dosis de calor adicional es adecuada, para finalizar el curado maximizando la rigidez de la pieza, es de gran importancia. Sin embargo, mencionada dosis de calor, suele ser desconocida. El post-curado se ejecuta con arreglo a las especificaciones técnicas informadas por el fabricante, ya que no hay una metodología que calcule el grado de curado alcanzado antes del post-curado y por tanto la dosis de calor faltante.

5.4 Discussion and Future Work

In general, it can be seen in the literature that monitoring/measuring techniques for process parameters for composites have been optimized for small moulds and

characterisation of small samples of materials. However, as demonstrated in this thesis, their performance is insufficient for large industrial parts. Thus, the techniques proposed in this thesis are **highly advisable for monitoring the high variability of the process parameters potentially seen in parts when different areas of the same one are considered**. Moreover, it may be that these tools particularly add value in:

- Decision-making (curing temperature cycles, interactive monitoring of resin flow front, instantaneous map permeabilities etc.). Controlling the injection parameters (e.g. flow front velocity, pressure, and estimating the content of porosity online).
- Studying the physical phenomenologies present in processing.
- Verifying numerical models to make progress towards estimating the mechanical properties of the parts with higher precision.
- Making progress towards optimal monitoring tools for controlling or acting efficiently during these processes.
- Evaluating/estimating the deviation of the process design parameters and their real situation in manufacturing.
- Determining the part's degree of cure, or degree of solidification. The latter is of great interest, since the polymerization of a part is shown by changes in the properties of the materials it is made of: matrix/reinforcement. However, the results of this study show that it is very difficult to determine the degree of cure for parts processed with RIFT using a laboratory reference such as the DSC⁷⁰. This divergence is based on the lack of efficient techniques for controlling and measuring the thickness, porosity and active mass in each local unit of volume, visualizing the piece in small fractions or units of volume. In real manufacture, one does not know how the curing is affected by the presence of additives in the resin or mould, or the heterogeneities in the active matrix concentrations in the injector and vent zones, compared to the rest of the mould. All of this makes it very difficult to estimate a part's degree of cure using a technique devised for characterising small samples of material, such as DSC. However, by using the thermal chamber an exciting new path opens up. The degree of cure can be associated with a physical characteristic of the material: the emissivity measured through the IR camera. This parameter is not

⁷⁰ DSC – Differential Scanning Calorimetry. The results from characterisation of resins are commonly used as a reference to plan the curing cycle temperatures. Essentially, this defines/characterises the curing/polymerization curve that the parts should follow when they are being processed.

dependent on previous calibrations, but is associated directly with the change in properties of materials when they go from a liquid state to a solid state. In future, methods based on measuring emissivity may provide a set of reliable techniques for quantifying and controlling the curing process of a composite part.

- In general, the method of in-situ calibration of heat flux presented in [12] could achieve greater accuracy by knowing the amount of active mass (resin) locally concentrated in zones throughout the mould. Conversely, one can now envision a real-time, indirect measurement method for the thickness of the part and know the amount of resin concentrated in a unit of area. This is currently of great interest in this field due to its many possibilities for industrial applications. For example, by knowing the typical variability of the thickness and its acceptable tolerances in parts processed by LCM-RIFT, these processes would become a viable alternative to more expensive processes such as RTM and autoclave processing. For the latter, it is essential to control the degree of cure in order to ensure that the active resin releases all of its energy.

After the curing step, it is very important to estimate the necessary amount of additional heat to complete the curing and maximize the part's rigidity. However, this amount of heat is not usually known. Post-curing is performed in accordance with the technical specifications reported by the manufacturer, since there is no method for calculating the degree of cure reached before the post-curing and hence the necessary dosage of heat.

Anexos del Capítulo 1

I. Materiales Compuestos.

Se conoce como materiales compuestos a aquellos que son una combinación de dos o más materiales. La definición de materiales compuestos se puede restringir a aquellos en los que una sustancia componente es el refuerzo, conocido como fibra o preforma, soportado por otra que actúa como material aglutinante, conocido como matriz o resina. La combinación de diferentes resinas (normalmente se usan polímeros o metales ligeros), con distintos materiales o disposiciones de fibra (fibra de vidrio, de carbono, orgánicas o de polímeros, entre otras) permite conseguir materiales con propiedades mecánicas muy especiales que se adaptan a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño. Existe una gran cantidad de combinaciones posibles y, por tanto, muchos tipos de compuestos. Se pueden distinguir en función de su tipología, fibras cortas o largas, continuas o discontinuas, orientadas o con disposición aleatoria, una sola capa o laminados multicapas, o bien en función del tipo de sustancias componentes. Normalmente estos compuestos se presentan en forma de laminados unidireccionales (todo el refuerzo en la misma dirección) o en laminados bidimensionales (laminas apiladas con el refuerzo en distintas orientaciones). También es común un laminado con orientación aleatoria. En la Figura - Anexo I.1 se muestran varios ejemplos de preformas.

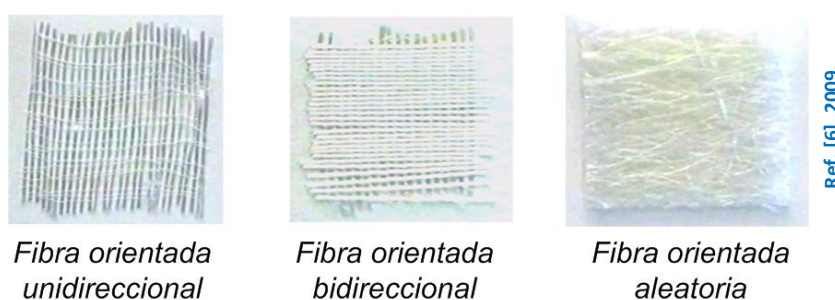


Figura - Anexo I.1 Preformas usualmente utilizadas

Las fibras son las responsables de las propiedades estructurales del composite. Sobretudo logran que el material compuesto tenga unas elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal. Las principales fibras que se utilizan en plásticos reforzados son de naturaleza cerámica, como por ejemplo las

de vidrio, las de carbono y las de boro. También se usan comúnmente algunas fibras de naturaleza orgánica como las de aramida. La Tabla - Anexo I.1 muestra un listado de las más comunes, así como sus propiedades mecánicas.

Material	Densidad ρ , [g/cm ³]	Módulo elástico E , [GPa]	Resistencia tracción σ_r [MPa]	Alarga- miento [%]	Coef. Poisson ν	Módulo específico [E/ ρ]	Resist. específica [σ_r/ρ]
<i>Fibra vidrio</i>							
E-Glass	2,54	72,4	3450	4,8	0,20	28,5	1,36
S-Glass	2,49	86,9	4300	5,0	0,22	34,9	1,73
<i>Fibra carbono</i>							
AS-1 (*)	1,80	228,0	3100	1,32	—	126,7	1,72
AS-4 (*)	1,80	248,0	4070	1,65	0,20	137,8	2,26
IM-7 (*)	1,78	301,0	5310	1,81	0,20	169,1	2,98
P-100 (‡)	2,15	758,0	2410	0,32	0,20	352,5	1,12
T-40 (‡)	1,81	290,0	5650	1,80	—	160,2	3,12
T-300 (‡)	1,76	231,0	3650	1,40	0,20	131,3	2,07
<i>Fibra boro</i>							
	2,70	393,0	3100	0,8	0,20	145,6	1,15
<i>Fibra aramida</i>							
					—		
Kevlar 49 (†)	1,45	131,0	3620	2,8	0,35	90,3	2,50
Kevlar 149 (†)	1,47	179,0	3450	1,9	—	121,8	2,35

Ref. [6], 2009.

Tabla - Anexo I.1. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes.

Las fibras de vidrio tienen una rigidez específica no superior a la de los metales tradicionales, pero tienen amplia aceptación debido a su alta resistencia específica y a su bajo coste. Las fibras de carbono presentan a su vez unas excepcionales propiedades de rigidez y resistencia. Las fibras de boro, presentan una elevada rigidez y resistencia específica pero una gran fragilidad. Las fibras de aramida tienen una elevada flexibilidad mostrando muy buenas propiedades de resistencia al impacto. En cambio, no presentan propiedades de rigidez excepcionales.

La matriz ó resina es el material aglutinante que permite a las fibras trabajar de forma conjunta, transmitiendo los esfuerzos de unas a otras. Las matrices de polímero tienen como principales limitaciones la pérdida de propiedades a alta temperatura, su susceptibilidad medioambiental (son afectadas por la humedad, las radiaciones, etc.), y la baja resistencia al cortante. Las matrices poliméricas pueden ser divididas en dos grupos: las termoplásticas y las termoestables. Los termoplásticos se reblandecen con la aplicación del calor y pueden ser re-moldeadas con la temperatura y presión adecuada. Aunque su proceso de producción limita su uso en composites de fibras largas, son especialmente indicadas para ser utilizadas en aplicaciones donde es necesario mucho volumen a bajo coste. Normalmente, el rango de temperatura no supera los 225°C. En cuanto a los termoestables, polimerizan (proceso de curado) en el mismo momento de la

fabricación y no se reblandecen con el calor. Su estado líquido antes del curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas. Los termoestables más usados como matriz son el poliéster, el epoxi y las poliamidas. El poliéster se usa principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones hasta los 100°. Los epoxies resultan más caros pero tienen mejor resistencia a la humedad, menos variaciones dimensionales durante el curado y pueden aguantar temperaturas de uso hasta 175°C, La poliamida permite aplicaciones en temperaturas elevadas, (hasta 300°C), pero requiere un proceso de producción más complicado. En la Tabla - Anexo I.2 se muestra un listado de las matrices más comunes con las propiedades que las caracterizan.

Material	Densidad	Módulo elástico	Resistencia tracción	Alargamiento	Coef. Poisson	Módulo específico	Resist. específica
	ρ , [g/cm ³]	E_s [GPa]	S_b [MPa]	[%]	ν	$[E/\rho]$	$[S_b/\rho]$
<i>Termoplásticos</i>							
PEEK (*)	1,30 – 1,32	3,24	100,0	50	0.4	2,5	76,3
PPS (‡)	1,36	3,3	82,7	4	—	2,4	60,8
<i>Termoestables</i>							
Poliéster	1,1 – 1,4	2,1 – 3,4	34,5 – 103,5	1 – 5	—	2,2	55,2
Epoxi	1,38	4,6	58,6	—	0,36	5,5	74,0
Poliamida	1.46	3,5	103,0	—	0,35	2,4	70,5

Ref. [6], 2009.

Tabla - Anexo I.2 Propiedades mecánicas de las matrices, resinas más comunes.

El diseño de piezas de materiales compuestos es considerablemente más complejo que el diseño de piezas de materiales tradicionales. Además de diseñar la geometría del elemento, se debe de diseñar también el propio material. Por lo tanto, en el diseño de una pieza de material compuesto es habitual diseñar la geometría y la configuración de los componentes, de forma que se aprovechen mejor las cualidades de este tipo de materiales, reforzando las direcciones con mayor nivel de esfuerzo. Así, se debe empezar por definir cada uno de los materiales componentes, la orientación del refuerzo en cada lamina u orientaciones del tejido, el espesor de cada una de las laminas y, finalmente, la secuencia de apilado óptima. Un aspecto importante durante el diseño es comprobar el grado de compatibilidad del refuerzo con el método de producción y la geometría del componente. Los tejidos de refuerzo deben ser seleccionados considerando su aptitud a acomodarse a las curvaturas de la geometría del componente. Tradicionalmente, esta labor se ha realizado con métodos basados en el conocimiento empírico. Además, como el número de combinaciones posibles de compuestos es

prácticamente ilimitado, la caracterización mediante experimentación se hace muy costosa por no decir imposible. Esta dependencia de la experimentación frena la generalización del uso de los compuestos en aplicaciones más corrientes.

II. Clases de Moldeos.

Tomado de la referencia [6]. La elección de un proceso de fabricación de materiales compuestos queda determinada por diversas consideraciones. Algunas de estas son: las características y propiedades del material; la forma, tamaño y espesor de la pieza; los requerimientos en la tolerancia dimensional y el acabado superficial; los requerimientos de funcionamiento de la pieza; el volumen (cantidad) de producción, etc. Con carácter general podemos decir que el moldeo de un material compuesto consta de tres fases, que pueden ser simultáneas o alternativas, en función del procedimiento que se elija:

- Impregnación del refuerzo por la resina, que corresponde a la constitución de un material compuesto exento de inclusiones de aire.
- Adaptación de dicho material compuesto a las formas y dimensiones deseadas, con la ayuda de un molde.
- Endurecimiento del material y desmoldeado de la pieza final.

El proceso de curado o solidificación de las resinas se inicia partiendo del estado líquido de las mismas, mediante aditivos químicos (sistema catalítico), pasando siempre por estados intermedios de gelificación hasta llegar a la estructura final, completamente entrecruzada en estado sólido. Esta transformación es irreversible y se produce a temperatura ambiente, aunque la aportación de calor en la fase final del proceso permite reducir los tiempos de polimerización, y por tanto de moldeo. Según [24], los procesos de fabricación de materiales compuestos, se pueden clasificar en dos grupos, procesos en molde abierto y procesos en molde cerrado.

Procesos en molde abierto: En este grupo se clasifican aquellos procesos que cuentan con un molde como único elemento para su fabricación, estos pueden ser:

Moldeo por contacto a mano (hand lay-up): El moldeo por colocación manual, o moldeo por contacto es denominado así debido a las bajas o nulas presiones que se necesitan, siendo la primera técnica que se utilizó en el laminado de los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Aun a día de hoy es uno de los procesos más utilizados. En producciones de series industriales cortas o de piezas de gran superficie, es el

método más económico debido a su relativa sencillez y no requerir mano de obra excesivamente especializada. Por el contrario, presenta los inconvenientes de un ambiente de trabajo molesto y nocivo por la emisión de gases, producción lenta y acabado fino solo por una de las caras. Dentro de este proceso se pueden diferenciar dos técnicas, el conocido como “*wet lay-up*”, donde la impregnación de el refuerzo con la resina se hace con rodillos y el “*spray lay-up*” o moldeo por proyección, donde la impregnación se realiza mediante pistola. La principal diferencia entre ambas técnicas es que en el *spray lay-up*, la viscosidad debe de ser baja para permitir una buena pulverización e impregnación. En este tipo de procesos, la fibra y la resina se suelen pulverizar a la vez. En la Figura - Anexo II.1 se muestran dos instantáneas de este tipo de procesos



Figura - Anexo II.1 Moldeo por contacto a mano (*hand lay-up*).

Prepreg: La principal característica de este tipo de proceso de fabricación es que la resina y la preforma han sido pre-impregnadas a priori y almacenadas, generalmente a bajas temperaturas (-20°C). Este tipo de proceso tiene su principal ventaja en el control sobre el porcentaje fibra/resina, siendo muy utilizado para la fabricación de piezas estructurales en la industria aeronáutica, energía eólica, productos de alta competición, etc. Obviamente no todo son ventajas, la complicada formulación de las resinas, junto con la necesidad de almacenaje y transporte en lugares refrigerados, hacen que la utilización de este tipo de materiales este limitada a mercados muy definidos, debido en gran manera a su alto precio.

El proceso de fabricación es bastante sencillo. Este comienza con el marcado y corte de la lámina individual con el perfil deseado, para ser apilada capa a capa sobre el molde, ver Figura - Anexo II.2(izquierda). Cada cierto número de capas, se procede a compactar el conjunto mediante la técnica de vacío, para eliminar el aire atrapado en el laminado. La frecuencia de compactación depende de la geometría de la pieza. Una vez

terminado el laminado, se coloca sobre él un film poroso, que permitirá la expulsión de los componentes volátiles que se produzcan durante el curado de la resina. A continuación se coloca una bolsa de vacío, con los sellados pertinentes, y la pieza queda preparada para el curado. Para la aplicación simultánea de la presión y el calor, se utiliza un autoclave, Figura - Anexo II.2 (derecha). Estos sistemas están compuestos de una cámara presurizada, sistema de aplicación del vacío, dispositivos de calentamiento y sistemas de control de los parámetros del curado.



Figura - Anexo II.2 Prepreg (izquierda). Autoclave (derecha).

Entre los materiales compuestos de altas prestaciones mecánicas, y los de carácter industrial existe una amplia gama de materiales de elevadas-medias prestaciones, con propiedades próximas a los de altas prestaciones y costes muy inferiores. Este es el caso de los pre-impregnados que se procesan mediante laminación o enrollado, curando mediante métodos alternativos al autoclave. Estos métodos alternativos nos podemos encontrar, el curado en horno, mediante intercambiadores de calor, microondas, etc. El uso de estos materiales a costes muy competitivos se está imponiendo en industrias como la automoción, marina, energía o deporte frente al aluminio o acero.

Procesos en molde cerrado: En este grupo se clasifican todos aquellos procesos de transformación que cuentan con un molde y contra-molde como elementos para la fabricación. El molde es fabricado de materiales rígidos mientras que el contra-molde puede ser fabricado en materiales rígidos, semi-rígidos o flexibles, estos son:

Pultrusión: En este proceso, las fibras de refuerzo se presentan en forma de bobinas o rollos para favorecer el flujo continuo de material. Estas bobinas se van desenrollando y pasando por un tanque para que estas se impregnen de resina. Estas fibras impregnadas se introducen en el molde donde son comprimidas hasta obtener la fracción de volumen deseada. Este moldeo debe de asegurar el curado del material en un tiempo relativamente corto. Para ello se suelen colocar alrededor del molde, placas calefactoras

que provocan el calentamiento de la pieza para favorecer la reacción de polimerización de la resina.

Prensa en frío y prensa en caliente: El moldeado por prensa en frío es un proceso de moldeo que utiliza baja presión y molde con ausencia de calor. Su aplicación puede ser cualquier producto con una forma relativamente simple que pueda ser realizado en molde abierto pero que necesite mayor precisión en cuanto al espesor y buen acabado en ambas caras. El proceso es bastante simple, la preforma se coloca en una cara de la herramienta, se mete la resina sobre esta y se cierra la herramienta bajo presión hasta que la resina cura. La prensa en caliente es un proceso similar a la prensa en frío descrita anteriormente, con la excepción de que en este caso el molde es calentado. Este proceso está especialmente diseñado para resinas que curan a altas temperaturas como el epoxi y las resinas fenólicas.

Moldeo por compresión de pre-impregnados: Este proceso consiste en el moldeo de una resina termoestable reforzada generalmente con fibra de vidrio. La pieza final se obtiene a través de la polimerización de la resina mediante un proceso combinado de presión y temperatura. Este proceso es el más utilizado para la fabricación de materiales compuestos con resinas termoestables. Esto es debido a su alta capacidad de automatización, excelente acabado superficial por ambas caras y la posibilidad de obtener geometrías complejas. En este proceso se utiliza normalmente molde y contra-molde calientes.

Moldeo por inyección de termoestables: En este proceso, el material compuesto formado por las fibras, la matriz termoestable y las cargas, toma la forma de gránulos. El material compuesto es transportado al molde mediante un tornillo sinfín donde, antes de ser introducido se calienta mediante un circuito cerrado de agua o aceite. Este calor hace que el compuesto se mantenga en estado viscoso. Cuando el molde está completamente lleno, se mantiene una elevada presión durante unos segundos para minimizar cambios dimensionales y asegurar las tolerancias de fabricación. El molde se calienta mediante resistencias eléctricas.

RIM y RRIM: El proceso RIM (*Reaction Injection Molding*), desarrollado a final de los años 1970, es un proceso de moldeo por inyección en el que dos reactivos de baja densidad mezclados previamente son inyectados a baja presión en un molde previamente cerrado. Dentro del molde, se produce la reacción de los reactivos produciéndose la polimerización y el curado final de la pieza. El proceso RRIM (*Reinforced Reaction Injection Molding*) es un proceso similar al RIM pero añadiendo refuerzo en el molde. El tipo de refuerzo suele ser fibra molida o hilos cortados en un

porcentaje entorno al 20%. Una variante del RRIM es el SRIM donde la principal diferencia está en que el material de refuerzo es en una estructura preformada. Estos procesos se utilizan sobre todo en los casos en los que la resina a inyectar es una resina de poliuretano, que permite tiempos de ciclo más cortos que los de poliéster, debido a la propia naturaleza de la reacción química.

RTM: El RTM, o moldeo por transferencia de resina han ido ganando popularidad en la industria aeroespacial, automovilística, militar y de infraestructuras. De hecho, el RTM nació a mediados de la década de los 40, pero no llegó a ser comercialmente competitivo hasta los 60 y 70, empezando a ser usado para fabricar bañeras, teclados de ordenador, contenedores, etc. Este proceso solo es rentable para un número de piezas entre 500 a 50.000 por año. Este proceso de molde cerrado utiliza baja presión, permitiendo fabricar piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidades y tamaños. La principal diferencia con el resto de procesos es que el refuerzo seco y la resina se juntan dentro de un molde para formar una pieza de material compuesto. El refuerzo (fibra) se coloca dentro de la cavidad del molde y, después se cierra. Un tubo conecta el molde cerrado con un depósito de resina, la cual es bombeada o transferida dentro del molde para impregnar la fibra donde, finalmente se produce el curado.

Los procesamientos modernos de fabricación se basan en aplicaciones de molde cerrado y son conocidos genéricamente como LCM (Liquid composite Moulding processes). Los más utilizados son el RTM y sus derivados, que se analizan en el siguiente punto y que son los procesos tratados en esta tesis.

III. Procesos LCM

Las técnicas de moldeo de composites con resina líquida (LCM) abarcan una gran variedad de procesos derivados del RTM. Todos estos procesos se están utilizando cada vez más en la industria naval, aeroespacial automovilística, de construcción, etc., debido principalmente a su capacidad para obtener piezas complejas de gran calidad mediante materiales poliméricos reforzados con fibras de vidrio o carbono. Toda la familia de procesos LCM pretenden conseguir la impregnación de la resina líquida sobre un tejido poroso de refuerzo para obtener un material compuesto. Necesariamente esta impregnación debe realizarse antes de que la resina gelifique. Por lo tanto, las resinas termoplásticas son utilizadas en mucha menor medida que las termoestables debido a su alta viscosidad, ya que necesita altas presiones de moldeo. Uno de los principales

atractivos de los procesos LCM es el empleo de bajas presiones, permitiendo disminuir el coste de procesado, fabricación del molde y utillaje empleado.

La principal novedad introducida en el proceso RTM, que lo diferenció del resto de procesos de molde cerrado, fue la introducción del refuerzo seco, impregnándolo de resina después, cuando el molde ya estaba sellado. En este proceso, las dos mitades del molde son rígidas. Utiliza la cavidad que hay entre el molde y el contra-molde para definir la geometría de la pieza a fabricar y donde se sitúa la preforma o fibra, ver Figura - Anexo III.1.

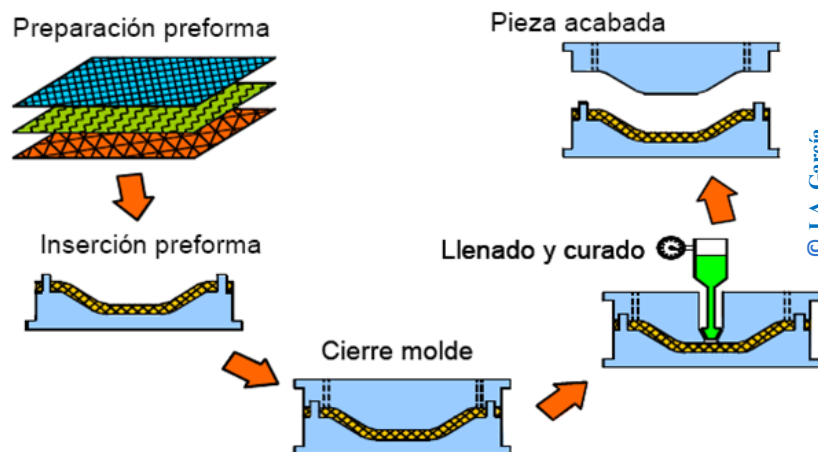


Figura - Anexo III.1 Esquema del proceso RTM.

La resina es inyectada en la cavidad por una o varias boquillas desde un depósito presurizado mientras que el aire contenido en el interior se escapan por otras boquillas, generalmente puestas a presión atmosférica, empujado por la resina. Cuando el molde se ha llenado, se detiene la inyección y el molde no se abre hasta que la resina ha completado su curado. La etapa de curado puede iniciarse, bien por el calentamiento del molde, que también calienta la resina mientras fluye, o bien, mediante la adición de agentes químicos de polimerización o inhibidores, que permiten retrasar el curado e iniciarlo una vez la resina ha completado el llenado del molde.

Esta técnica de fabricación de materiales compuestos tiene varias limitaciones. Una de ellas es la necesidad de inyectar la resina mediante presión. Esto obliga a que los cerramientos del molde, así como el molde y contra-molde deban de estar diseñados para soportar las presiones a las que se verán sometidos. Una de las variantes del RTM que evita esta necesidad son las técnicas conocida como RTM-Light, VARTM (Vacuum-Asisted RTM) o VARI (Vacuum-Asisted Resin Infusion). Aunque existen diferencias entre ellas, suele ser habitual hablar de ellas como una sola. La principal

diferencia es que la resina no es inyectada a presión sino que se realiza un proceso de infusión por vacío. De esta manera el flujo de resina dentro del molde viene ayudado por la depresión que hay en la cavidad no siendo necesarias presiones de inyección elevadas, ya que existe la ayuda del vacío. En estos procesos, las fibras son situadas en un lado del molde y se coloca una tapa que puede ser rígida o flexible, usualmente fabricada de nylon, formando un sellado hermético para provocar el vacío. El ciclo de moldeo es más largo que en el proceso RTM. Estos procesos nacieron en la industria aeroespacial a finales de los 80 para la fabricación de lotes cortos o piezas muy grandes, donde el uso del proceso RTM introduce un elevado coste en la pieza final. La inyección mediante vacío exige resinas de poliéster con características muy particulares en cuanto a viscosidad (máximo 2 poises a 20°C). El sistema catalítico está basado en peróxidos en combinación con un acelerador de deoctoato de cobalto

Otra variante del RTM que fue desarrollada a mediados de los 80 es el llamado SCRIMP (Seeman Composite Resin Infusion Molding Process). El proceso es similar al VARTM, pero con algunas diferencias. La más importante es la incorporación de una membrana difusora que permite la difusión de la resina a lo largo de la longitud y espesor de la pieza, incluyendo sándwiches.

Siguiendo en la línea de reducir la presión necesaria para impregnar la preforma con resina, una técnica interesante es la denominada LPRIM (Low Pressure Infusion Molding). En este proceso se utiliza una bolsa de vacío patentada, unida a los extremos del molde. La presión para introducir la resina al interior del molde se genera simplemente colocando el depósito de resina a una cota ligeramente superior a la del molde. Esta pequeña presión combinada con la textura de la bolsa y el vacío permite a la resina fluir entre la fibra. Evidentemente los tiempos de llenado son lentos (un barco de 20 m puede costar de 12 a 15 horas).

Los procesos de infusión mediante vacío han supuesto una importante revolución, sobre todo para la fabricación de piezas en lotes pequeños, o incluso piezas unitarias de gran tamaño. Todavía a día de hoy siguen apareciendo variantes de esta técnica. En [26] se presenta una revisión de las distintas técnicas o variantes existentes que utilizan vacío. En [26] se catalogan 16 variantes de esta técnica. En general, se conoce a los procesos que trabajan con vacío como VI (Vacuum Infusion) ó VIP (Vacuum Infusion Processes). En la Figura - Anexo III.2 se muestra un esquema de este proceso.

El proceso de infusión se puede descomponer en varias etapas, similares al RTM. Dado un molde, se coloca el refuerzo y las boquillas por donde entrara la resina y por donde se hará el vacío. El molde se sella mediante una bolsa de plástico quedando dispuesto

para ser infusionado. Cuando el molde está lleno y la resina ha curado, la bolsa se retira y el molde está preparado para desmoldarse.

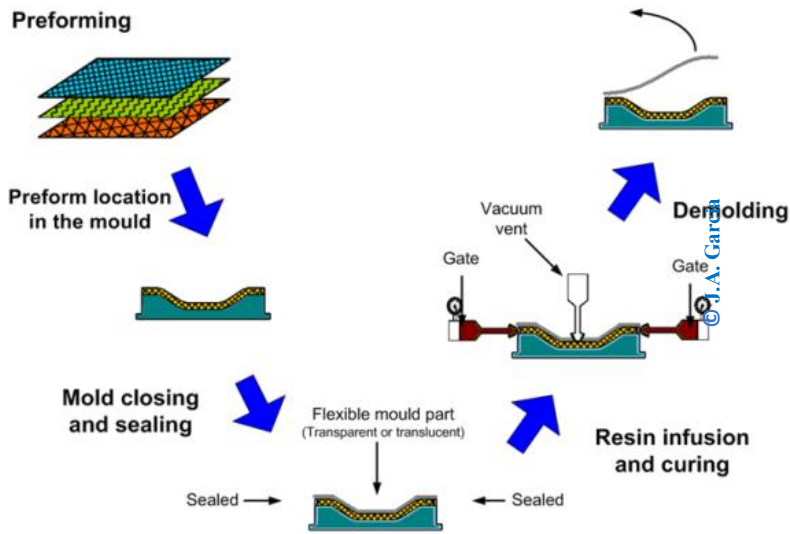


Figura - Anexo III.2 Esquema de los procesos de infusión por vacío.

IV. Modelo Analítico de Transporte de resina en laminados de fibra, durante la fabricación de piezas-composite usando LCM-RIFT.

La etapa de llenado de un molde, consiste en la introducción de un fluido viscoso (resina termoestable acelerada-catalizada) a través de un medio poroso (refuerzo de fibras). Para entender y simular los fenómenos relacionados con los procesos de inyección de refuerzo (LCM), se hace referencia a la dinámica de fluidos y procesos de transporte en medios porosos. El modelo general para el flujo de un fluido newtoniano en un refuerzo de fibra es la ecuación de Darcy. Despreciando el efecto en especial de la fuerza de la gravedad, se puede formular como en la ecuación (IV.1).

$$\vec{v} = \frac{\vec{V}_D}{\phi} = \frac{\bar{K}}{\phi \mu} \nabla P, \quad \bar{K} = f(\phi(P_{compactación})) \tag{IV.1}$$

Donde \vec{v} es la velocidad superficial, \vec{V}_D es la velocidad de Darcy, \bar{K} el tensor permeabilidad, μ la viscosidad dinámica, ∇P el gradiente de presión, ϕ es la porosidad.

V. Modelo Analítico de Transferencia de calor durante el curado de piezas-composite usando LCM-RIFT

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, si es asumida una temperatura instantánea en equilibrio entre las fibras y resina en cada instante de tiempo [247], la temperatura transitoria del composite puede ser evaluada mediante la ecuación de conducción de calor de Fourier. En un análisis a través del espesor, la temperatura absoluta $T(z,t)$ en la posición z y en el tiempo t a través del espesor de la pieza total (Z_T) se define según la ecuación (V.1):

$$\tilde{\rho} \cdot \tilde{C}_p \frac{\partial T}{\partial t} = \tilde{k} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \phi \rho_r H \quad \cdot \quad 0 \leq z \leq Z_T \quad (\text{V.1})$$

Donde $\tilde{\rho}$ es la densidad, \tilde{C}_p el calor específico y \tilde{k} es la conductividad térmica del composite. Estas son definidas como las propiedades efectivas obtenidas por la regla de mezcla [228], [247].

$$\begin{aligned} \tilde{C}_p &= C_{p_r} w_r + C_{p_f} w_f & \tilde{\rho} &= \frac{\rho_r \rho_f}{\rho_r w_r + \rho_f w_f} \\ \tilde{k} &= \frac{k_r k_f}{k_r w_r + k_f w_f}, & w_r &= \frac{\phi / \rho_f}{\phi / \rho_f + (1 - \phi) / \rho_r}, & w_f &= 1 - w_r \end{aligned} \quad (\text{V.2})$$

Además en las ecuaciones (V.2), ϕ es la porosidad, w_r y w_f denotan las fracciones de masa de resina y fibra, respectivamente. El subíndice f quiere decir fibra, y r para resina. Cabe anotar que para el caso tridimensional, la conductividad térmica del composite puede ser diferente para cada dirección (p. ej., longitudinal /transversal). El último término del lado derecho de la ecuación (V.1) representa una fuente de calor producida por los enlaces químicos de la polimerización de la resina. Este término fuente se asume proporcional a la rapidez de la reacción, como lo muestra la ecuación (V.3), [39].

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = \frac{d\alpha}{dt} \cdot H_T \quad (\text{V.3})$$

Donde, $d\alpha/dt$ es la rapidez de la reacción o ratio de conversión, y H_T es el total o el último calor de la reacción durante el curado. Las mediciones térmicas durante el curado se han mantenido como una buena y fiable metodología para caracterizar la reacción de polimerización de las resinas termoestables. Si la difusión de las especies químicas es despreciada, el grado de curado α (o conversión de resina) puede ser definido como sigue, [39].

$$\alpha = \int_0^t \frac{d\alpha}{dt} \cdot dt \quad , o \quad \frac{d\alpha}{dt} = f(T, \alpha) \quad (V.4)$$

Con la finalidad de resolver la ecuación (V.1), la dependencia de la rapidez de la reacción debe ser modelada como una función de la temperatura y del grado de polimerización. Como describieron en [248]. El análisis completo se basa en una interpolación lineal entre calores específicos de curado y no-curado, [228].

Como se muestra anteriormente por la ecuación de balance de energía, la transferencia de calor en medios porosos son complejas porque tienen que interactuar con cinco fenómenos: la hidrodinámica (velocidad del frente de resina adecuado para infiltrar las fibras del refuerzo, presión de compactación del refuerzo), la infiltración de la resina, la reacción de curado, y el comportamiento viscoelástico del material. La interacción entre estos cinco fenómenos se ilustra en la Figura 1.3. Esta ha sido inspirada en base al estudio de las siguientes referencias [3], [15], [249].

Existen principalmente dos modelos para modelar la cinética del curado como una función $f(T, \alpha)$ con evolución en el tiempo. Los modelos mecanísticos y fenomenológicos. Los modelos fenomenológicos no tienen en cuenta las diversas interacciones entre las especies químicas. Por su parte, los modelos mecanísticos se construyen a partir de un estudio detallado de las especies físico-químicas que intervienen en la reacción. En atención a que las reacciones de resinas termoestables son bastante complejas, los modelos mecanísticos requieren más parámetros cinéticos que los fenomenológicos. Por consiguiente, los modelos fenomenológicos son los más utilizados en los procesos LCM para caracterización del curado de resinas termoestables. Aunque varias reacciones simultáneas ocurren durante el proceso de curado, los modelos simples han sido desarrollados en base a la asunción de que solamente una reacción puede representar el proceso de curado completo. Esto significa, que es un método fiable más no exacto, es una buena aproximación que permite

cuantificar la energía que desarrolla una polimerización. La información de esta sección puede ser ampliada al final, en el anexo <<Modelos cinéticos de curado>>.

VI. Fenomenología que gobierna el Curado de piezas-composite usando LCM-RIFT

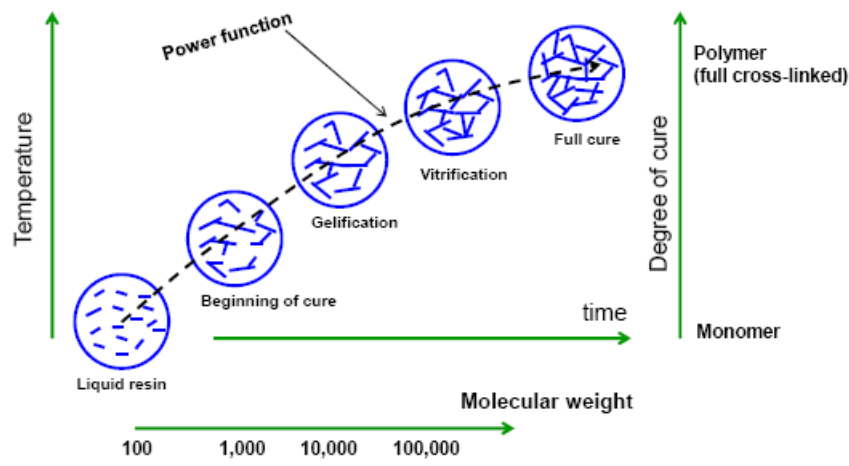
En esta sección, se aborda la fenomenología de curado que presentan los materiales inmersos en las piezas moldeadas durante la polimerización. Como tal, el término, polimerización, toma su significado de la red de enlaces que se presentan a causa de una reacción química, que específicamente genera algún tipo de resina y un material catalizador-endurecedor, lo cual promueve también un proceso de cambios físicos en estos, denominado curado, hasta el punto de consolidar un sólido endurecido-curado. Partiendo de dicha definición, se puede intuir el proceso de curado que se presenta durante el procesamiento de piezas que integran una matriz polimérica. Dicha matriz polimérica suele ser de origen orgánico, normalmente plásticos derivados del petróleo, gas o vegetales, y pueden ser de naturaleza, termoestable, termoplástico o elastómero. En esta tesis, la experimentación y los métodos han sido enfocados al curado de matrices poliméricas termoestables.

Al tenor de lo anterior, para producir este tipo de piezas, es muy importante entender el comportamiento de dichos materiales. El papel que juega la matriz termoestable es fundamental, ya que liga el refuerzo de fibra, persiguiendo principalmente los siguientes propósitos: Dar forma a la pieza, estabilizar el refuerzo, transferir cargas y proteger las fibras. El comportamiento físico de la pieza en proceso de curado, en atención al comportamiento de su matriz termoestable, se caracteriza por la liberación de calor, como se detalla en el anexo <<Caracterización de la cinética de curado de resinas termoestables>>. El curado es un fenómeno físico-químico que convierte una mezcla líquida en un sólido [250], irreversiblemente, como lo muestra la Figura - Anexo VI.2. Principalmente el tipo de matriz termoestable que usan los componentes, pueden ser: epoxi, poliéster, fenoles y viniléster. Estas tienen que ser catalizadas mediante algún tipo de acelerador-catalizador, el cual propicia los cambios físico-químicos que caracterizan el curado de la pieza por polimerización. El curado de piezas-composite además de obedecer a una reacción química, ocurre como respuesta a una combinación de temperatura, presión y tiempo. Estos últimos, pueden llegar a ser controlados con la finalidad de alargar o acortar el ciclo de curado de las piezas, impactando potencialmente la curva de productividad en la industria. Por ello, para el curado de piezas de composite, se utilizan generalmente las siguientes técnicas:

- Curado a temperatura ambiente.
- Curado en horno (temperatura controlada).
- Curado en autoclave (presión, y vacío controladas)
- Curado en microondas.
- Curado con E-beam (electron-beam) o haz de electrones. Es mucho más rápido (del orden de minutos, no llega a horas), incrementa muy poco la temperatura, reduciendo los estreses térmicos, económicamente muy costoso, se requieren resinas especializadas.

Concurrentemente, aplicar un ciclo de curado adecuado a la pieza, según recientes investigaciones, parece no ser suficiente para disminuir los problemas típicos por sometimiento a zonas específicas de la pieza a termodinámicas no óptimas. Por esto, se pueden producir problemas en la pieza final, tales como: tensiones superficiales, delaminaciones, curados incompletos, deformaciones, entre otros.

Los problemas relativos al curado pueden dividirse en dos: a) Problemas por defectos del material y b) Problemas por proceso ineficiente. La literatura científica discute sobre todo problemas del tipo a), [46].

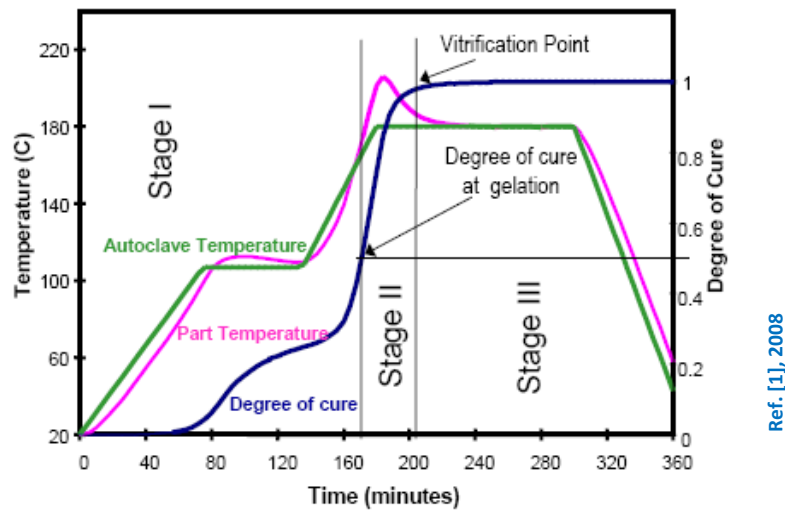


Ref. [1], 2008

Figura - Anexo VI.1. Esquema que ilustra el curado de resinas termoestables.

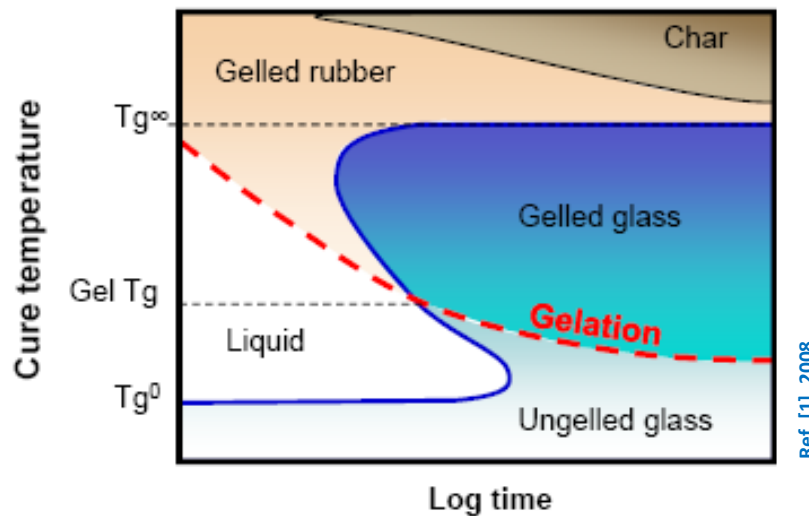
No obstante, los problemas debidos a la ineficiencia del proceso atañen específicamente al control de las variables inmersas en una fabricación: presión, caudal, porosidad, curado, difusividad térmica, conductividad térmica, temperatura ambiente, temperatura

del molde, entre otras. Por esto, la capacidad de controlar los cambios físicos durante el curado, es determinante para el éxito de una fabricación. Lo anterior, resalta el papel que juega la investigación, el desarrollo y la innovación en técnicas de monitorización para esta clase de fenómenos físicos.



Ref. [1], 2008

Figura - Anexo VI.2 Comportamiento típico de una pieza durante el ciclo de curado.



Ref. [1], 2008

Figura - Anexo VI.3. Diagrama (TTT): Tiempo – Temperatura – Transformación.

Observando la Figura - Anexo VI.2 y la Figura - Anexo VI.3, se puede determinar que el comportamiento físico de la pieza que fue curada según las curvas de la Figura - Anexo VI.2.

- En la primera etapa de la Figura - Anexo VI.2, la matriz se caracteriza por un comportamiento viscoso, donde el **grado de curado** (α), es menor que el **grado de**

curado en el tiempo de gel (α_{gel}), y la *temperatura de la pieza* (T_p) como la *temperatura del autoclave* (T_a) son menores que la *temperatura en el tiempo de gel* (T_{gel}). Pudiéndose escribir como sigue, $\alpha < \alpha_{gel}$, y $T_p < T_g > T_a$.

- Durante la segunda etapa el comportamiento de la matriz, es como de caucho, $\alpha > \alpha_g$; $T_p > T_{gel} < T_a$.
- Finalmente en la tercera etapa la resina tiene un comportamiento como de vidrio, $\alpha > \alpha_{gel}$; $T_p > T_g < T_a$ durante 120 min, después de esto se invierte quedando así $T_p > T_{gel} > T_a$. A partir de ahí, se inicia la relajación térmica del molde. No obstante, es justo en la tercera etapa donde se ha de lograr el curado completo de la pieza, normalmente incluyendo algún ciclo de post-curado. De ahí la importancia, de conocer el grado de curado alcanzado en cualquier momento, para valorar la necesidad de post-curado o no.

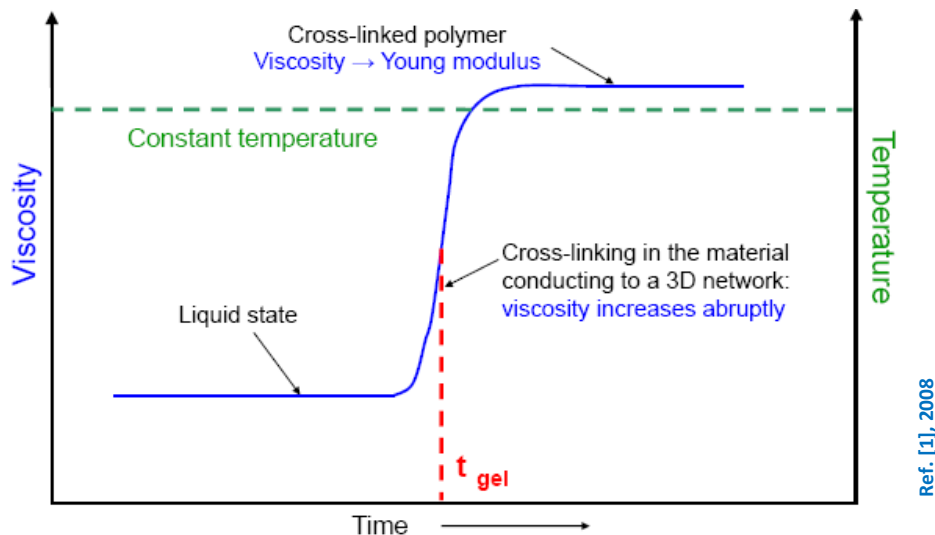


Figura - Anexo VI.4. Reología de una matriz termoestable durante un llenado de molde y curado isotérmico.

En la Figura - Anexo VI.4, tomada de la referencia [1] la gelificación incrementa las redes de un polímero tridimensional que está limitado por la movilidad molecular. Solamente ocurre transformación física en matriz termoestable, cuando se convierte de líquida a un estado similar al caucho, lo que coincide con las etapas uno y dos de la Figura - Anexo VI.2. Así, siempre que el estado del peso molecular (MW) tienda a infinito, la viscosidad crecerá a un valor infinito. En la Figura - Anexo VI.4, se puede observar que el *tiempo de gel* (t_{gel}) ocurre cuando la viscosidad tiende a infinito.

La información más importante que el fabricante debería cuidar es:

A) La evolución y final de la conversión (grado de curado), relativo a la cantidad de enlaces químicos que ocurren durante el curado. B) El punto de gel donde un cambio de fase de cómo-líquido a estado cómo-sólido, tiene lugar. C) La temperatura de transición vítrea, que indica el cambio de fase de la matriz de estado cómo-gel, a estado cómo-plástico. D) El proceso-inducido de deformación residual que causa distorsión estructural y acumulación de deformación intrínseca. En suma, la realización de la monitorización en tiempo real de la cinética de curado piezas de fibra/matriz termoestable requiere mediciones de diferentes cantidades, [97]. Es así como la caracterización de las resinas termoestables ha estado basada principalmente en el estudio de sus propiedades térmicas y sus cambios físicos.

VII. Modelos cinéticos de curado

El curado de resinas termoestables, clásicamente se ha intentado explicar desde su fenomenología física, tanto como química. El mecanismo de enlaces químicos de las resinas termoestables es muy complejo debido a la interacción relativa entre la cinética química y los cambios de las propiedades físicas; realmente esto todavía no ha sido perfectamente entendido. Existe bastante literatura con estudios de modelos cinéticos de curado de resinas. Por lo que dos modelos cinéticos diferentes son usados: fenomenológicos (a nivel macroscópico) y mecánicos (a nivel microscópico), [251], [252].

Los modelos fenomenológicos son semi-empíricos y de ahí que no provean una clara descripción del proceso de curado y la química involucrada, lo cual es importante para entender el proceso de formación de la red polimérica. Los modelos mecánicos son más representativos de la cinética de curado de las resinas ya que son basados sobre estudios estequiométricos de equilibrio de los reactantes involucrados en las reacciones. Como consecuencia, estos son mucho más complejos que los modelos fenomenológicos, pero pueden representar mejor la cinética de curado. La comprensión de la mecánica y cinética de curado es uno de los pasos más importantes en evaluación de la relación propiedad –estructura de las resinas termoestables. Así, resulta útil conocer todas las reacciones posibles para un sistema particular y controlar las condiciones de procesamiento con el fin de favorecer las reacciones específicas que dan propiedades mecánicas superiores o deseadas. Los modelos cinéticos requieren un balance entre los conceptos químicos y el empirismo de la práctica. Sin embargo, debido a la simplicidad de los modelos fenomenológicos estos son ampliamente usados para describir la cinética del curado de resinas termoestables. Es más simple calcular todos los efectos

químicos con unos cuantos parámetros empíricos, incluso aunque esos parámetros solo sean válidos para resinas específicas en un cierto rango de temperaturas.

La literatura es unánime considerando los valores de los parámetros, tales como A , E_a , m y n , incluso para los mismos sistemas. Dichos parámetros medidos desde una resina preparada (neat resin en Inglés) algunas veces varía sustancialmente debido a la presencia de fijadores de fibra a medida o manipulaciones inadecuadas de la resina, de ahí que, el curado de piezas LCM pueden ser diferentes de un lote a otro, [34]. La literatura científica sobre modelos cinéticos, [253], revela el abismo entre la caracterización de la resina y el proceso de simulación en entorno industrial. El modelo cinético más ampliamente usado fue publicado por Kamal and Sourour. Este contiene seis parámetros que son difíciles de validar. Otros modelos son mejorados al considerar el máximo grado de curado dependiente de la temperatura de proceso. Por consiguiente, la resina no estará completamente curada por debajo de una temperatura crítica de proceso, [253]. La cinética de curado en general basada en modelos fenomenológicos, se puede explicar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k(T) \cdot F(\alpha) \quad (\text{VII.1})$$

Donde, α es una fracción de la conversión del grupo reactivo, denominado alcance o grado de curado, t es el tiempo de la reacción. $F(\alpha)$ – Función que representa la cantidad de resina que reaccionó o curó, la cual es determinada para cada sistema. Las variaciones de $F(\alpha)$ pueden ser encontradas, dependiendo del tipo de resina termoestable y de las condiciones de experimentación. Ya que, el curado de una resina es un proceso exotérmico, el grado de curado α puede ser vinculado al calor liberado (entalpía) durante la reacción de los componentes (básicamente un monómero y un agente de curado). Es común que este término integre dos exponentes, m y n , los cuales son el orden de la reacción. Estos exponentes pueden ser una función de temperatura o no, según trabajos citados en [254]. El orden de la reacción en un sentido estricto es contante para cada sistema. Durante el curado, sin embargo, muchas reacciones pueden ocurrir simultáneamente, como resultado, el orden de la reacción en modelos fenomenológicos es en realidad un valor efectivo que representa todas las reacciones. Asimismo, k es una constante, definida por una ecuación tipo Arrhenius como en la ecuación (VII.1)

$$k(T)=A.e^{\left(\frac{E_a}{R.T}\right)} \quad (\text{VII.2})$$

En la ecuación (VII.2), A es el factor de frecuencia o constante pre-exponencial. E_a la energía de activación. R la constante universal de gas. T es la temperatura de procesamiento en kelvin.

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_R} \quad (\text{VII.3})$$

En la ecuación (VII.3), ΔH_t es la entalpía en un tiempo específico. ΔH_R es la entalpía total (o el calor total de la reacción), al final del proceso de curado cuando $\alpha = 1$. ΔH_R es una constante para una resina en particular. Este calor total puede ser calculado también como el área bajo la curva que representa la energía total liberada. El grado de curado (α) es escalado entre cero y uno, así α puede ser $0 \leq \alpha \leq 1$.

Las ecuaciones (VII.4) representan la función de la cantidad de resina que ha reaccionado para cada sistema. Las variaciones de $F(\alpha)$ pueden ser encontradas dependiendo del tipo de resina termoestable y de las condiciones experimentales.

$$F(\alpha) = (1-\alpha)^n$$

or

$$\quad \quad \quad (\text{VII.4})$$

$$F(\alpha) = (1-k_2 \alpha^m) \cdot (1-\alpha)^n$$

Teniendo como base las ecuaciones (VII.1), (VII.2), (VII.3), (VII.4) antes mencionadas, los modelos cinéticos de curado disponibles actualmente, pueden ser resumidos en la Tabla - Anexo VII.1

La única vía para validar los modelos cinéticos es medir experimentalmente el grado de curado como una función del tiempo y la temperatura. Esto puede ser hecho a nivel macroscópico y microscópico mediante monitorización química, física (usando índice de refracción, densidad, viscosidad, o propiedades eléctricas), mecánica o cambios de propiedades en el tiempo, [254]. Más adelante se revisarán las diferentes técnicas de monitorización disponibles en la literatura.

Para diseñar el ciclo óptimo de curado, con la finalidad de someter cada pieza a ciclos térmicos óptimos es necesario obtener los parámetros de la cinética de curado, los cuales son usualmente medidos offline mediante caracterización por el método de Calorimetría de Escaneado Diferencial (DSC – Differential Scanning Calorimetry) o espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier.

Ref. [5], 2006

$\frac{d\alpha}{dt} = k_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T}\right)} \cdot \alpha^m \cdot (\alpha_{max}(T) - \alpha)^n \cdot F(\alpha)$	<i>Autocatalytic</i>
$\frac{d\alpha}{dt} = \left(k_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T}\right)} + k_2 \cdot e^{\left(\frac{-E_2}{T}\right)} \cdot \alpha^m \right) \cdot (\alpha_{max}(T) - \alpha)^n \cdot F(\alpha)$	<i>Kamal - Sourour</i>
$\frac{d\alpha}{dt} = \left(k_1 \cdot e^{\left(-E_1 \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} - 1\right)\right)} \right) \cdot G(\alpha) \cdot (\alpha_{max}(T) - \alpha)^n \cdot F(\alpha)$	<i>Ruiz</i>
$\frac{d\alpha}{dt} = \left(k_1 \cdot e^{\left(-E_1 \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} - 1\right)\right)} \right) \cdot G(\alpha) \cdot F(\alpha)$	<i>J.L Bailleul</i>
$\frac{d\alpha}{dt} = k_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T}\right)} \cdot (\alpha_{max}(T) - \alpha)^n \cdot F(\alpha)$	<i>Nth-order</i>
$\frac{d\alpha}{dt} = k_3 \cdot e^{\left(\frac{-E_3}{T}\right)} \cdot I_0 \cdot ((\alpha_{max}(T) - \alpha)) \cdot \beta \cdot F(\alpha)$ $\frac{d\beta}{dt} = k_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T}\right)} - \left[k_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T}\right)} + k_2 \cdot e^{\left(\frac{-E_2}{T}\right)} \right] \cdot \beta$	<i>Mechanistic</i>
$F(\alpha) = \frac{1}{1 + E^{(E_1(\alpha - \alpha_c))}}$	<i>Diffusion</i>
$W(T) = t_{ref} - \int_0^{nd} e^{\left(-B \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} - 1\right)\right)} \cdot dt$	<i>Inhibition - decomposition</i>
$\alpha_{max}(T) = 1 - (1 - Min^{curing}) \cdot \left(\frac{T_g - T}{T_g - B}\right)^A$	<i>Maximum degree of cure</i>
$F(\alpha) = \frac{1}{1 + e^{[E(\alpha - \alpha_c)]}}$	<i>Diffusion controlled reaction</i>

Tabla - Anexo VII.1. Resumen de Modelos Cinéticos de Curado disponibles en la literatura.

VIII. Caracterización de la cinética de curado de resinas termoestables.

Entender la cinética de curado de resinas termoestables ha llegado a ser imperativo, para la obtención de parámetros que validan modelos de comportamiento del curado de resinas. Por tanto la DSC (Calorimetría de Escaneo Diferencial) es una técnica importante para caracterización del comportamiento de resinas termoestables. Hay bastante literatura que informa sobre la cinética de las reacciones, [109]. Típicamente, mediante mediciones de flujo de calor se caracteriza la entalpía de la reacción exotérmica de curado para cada tipo de resina, tal como muestra la Figura - Anexo VIII.1

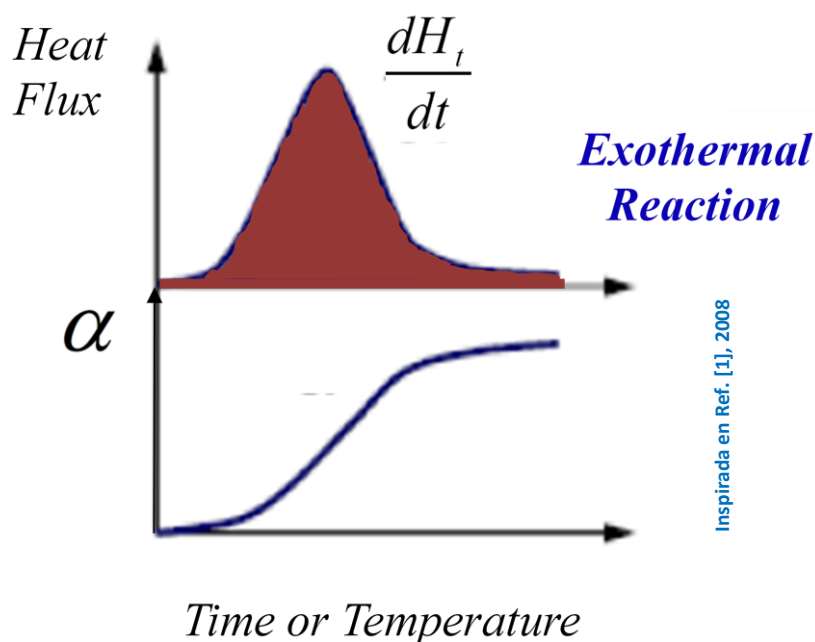


Figura - Anexo VIII.1. Proceso exotérmico que describe el curado de resinas termoestables.

El calor de la reacción es una propiedad fundamental de los termoestables que ha de ser medida para la estimación de la proporción de material convertido a sólido, y también para determinar parámetros cinéticos. Se debe de tener mucho cuidado en proceso de preparación de la muestra para obtener información lo más exacta posible, ya que esta afectará el resultado de los análisis cinéticos.

Esta técnica es la más ampliamente utilizada para obtener el grado de curado (Degree of cure – α o DoC) y rapidez de la reacción del material, tanto como el calor específico (flujo de calor) de las resinas termoestables. Se basa en la medición del voltaje diferencial (convertido a flujo de calor) necesario para obtener el equilibrio térmico

entre una muestra (resina activada) y una referencia inerte, ambas puestas dentro del calorímetro. Como resultado, se obtiene un termo-grama, como lo muestra la Figura - Anexo VIII.1. De esta manera en la gráfica de la Figura - Anexo VIII.1, el área bajo la curva completa, representa el calor total liberado de la reacción, ΔH_r , y el área sombreada representa la entalpía a un tiempo específico, $\Delta H_r(t)$. En el caso de una DSC modulada, la técnica se denomina, análisis MDSC (Modulated Differential Scanning Calorimetry), en la que el flujo de calor puede ser separado en reversible y no-irreversible. La parte no-reversible corresponde al calor liberado por la reacción química; la parte reversible se relaciona con las propiedades térmicas del material, específicamente con los cambios en la capacidad específica de la muestra.

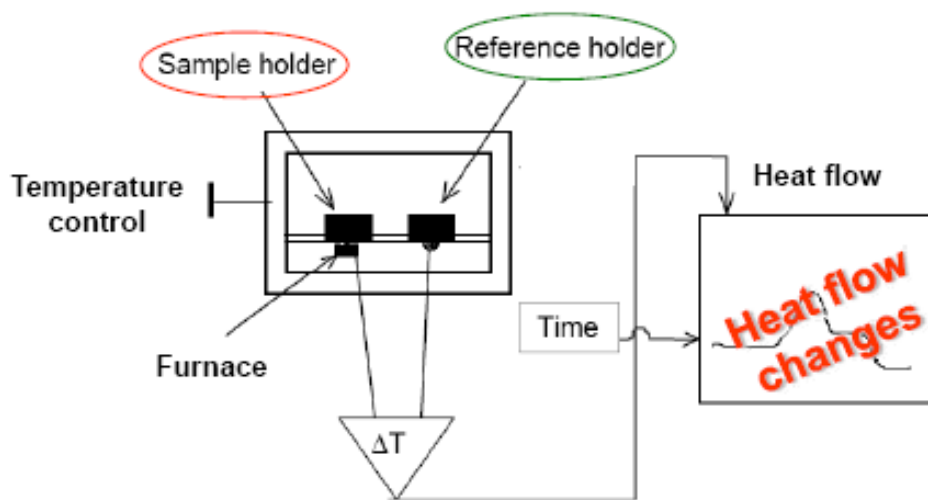


Figura - Anexo VIII.2. Principio de operación de la DSC⁷¹.

La técnica DSC puede ser operada bajo condiciones isotérmicas o no-isotérmicas. En esta sección solo abarcaremos la DSC en condiciones isotérmicas, ya que la mayoría de los procesos LCM son ejecutados a temperatura constante, esto es condiciones isotérmicas. Por ello, la temperatura de las piezas de pared-delgada es determinada por sensores de temperatura, y así las condiciones isotérmicas para la resina pueden ser aseguradas durante la inyección y el curado. Esto implica que los test DSC para caracterización de resina pueden ser ejecutados isotérmicamente a la temperatura de proceso. Con temperatura constante, la validación de los modelos cinéticos es más fácil, que para piezas de gran espesor.

De esta manera, bajo condiciones isotérmicas, la DSC puede ser operada usando dos métodos, complementarios, así:

⁷¹ http://erftcomposites.com/uploads/CureKinetics_presentation.pdf

Método 1: Una muestra es puesta dentro del calorímetro previamente calentado (rápidamente equilibrado) o dentro de un calorímetro no-calentado, cuya temperatura es elevada lo más rápidamente posible a la temperatura de curado. Así, es posible monitorizar, simultáneamente α and $\delta\alpha/\delta t$. Ver ecuaciones (VIII.1) y (VIII.2).

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial t}\right)_T + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T}\right)_t \cdot \frac{dT}{dt} \quad (\text{VIII.1})$$

En la ecuación (VIII.2), α es el grado de curado o tasa de conversión, T es temperatura de la reacción, t es el tiempo.

Esta ecuación, permite calcular el grado de curado, ya sea con el método 1 o 2.

$$\alpha = \frac{\Delta H_r - \Delta H_{res}}{\Delta H_r} \quad (\text{VIII.2})$$

La ecuación (VIII.2), permite calcular el grado de curado cuando se usan los métodos 1 y 2. Donde, ΔH_r es el calor total de la reacción, ΔH_{res} es la entalpía residual, y α es el grado de curado o tasa de conversión.

Método 2: Una muestra es curada para varios ciclos de tiempo hasta no detectar más curado. Las muestras son entonces escaneadas (rampas de calor en el rango desde 2 a 20°C/min) a fin de medir la entalpía residual ΔH_{res} . El grado de curado es calculado directamente mediante la ecuación (VIII.2), pero no la rapidez de la reacción, la cual es obtenida mediante tangentes a la curva de α versus el tiempo. Para reacciones con calores exotérmicos pequeños, este método debería ser utilizado en lugar del método 1

Anexos del Capítulo 2

A continuación se anexan las técnicas de calibración geométrica, ejecutadas en la presente tesis, para cámaras sensibles a rangos espectrales visibles e infrarrojos. Se pueden extender a cámaras sensibles a otros rangos espectrales.

IX. Calibración Dimensional para Moldes 2.5D.

Al utilizar todos los componentes de la visión artificial descritos de forma simultánea, o varios de ellos, es necesario realizar una calibración previa, [6]. Para poder aplicar el algoritmo de calibración, es necesario marcar varios puntos sobre el molde que puedan ser detectados por todos los elementos, ver Figura 2.9. Previo a ello, primero es necesario definir el modelo matemático que nos permita trasladar el sistema de coordenadas real al sistema de coordenadas local de cada dispositivo, para ello se utiliza formalización matemática.

En el espacio cartesiano donde está representada la geometría del molde, los puntos están representados mediante el vector $[x, y, z]^T \in R^3$. En el espacio proyectivo, los puntos están representados mediante cuatro coordenadas $\lambda[x, y, z, 1] \in P^3$ donde λ es un número real. Esto implica que un punto en el espacio euclídeo tiene infinitas representaciones en el espacio proyectivo. Esta representación se conoce como coordenadas homogéneas, donde dos cuádruplas representan el mismo punto, si y solo si, estas son proporcionales. Una de las ventajas de trabajar en coordenadas homogéneas es el hecho de que las transformaciones intrínsecas de la geometría proyectiva se pueden representar como sigue:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Y}' \\ \mathbf{Z}' \\ \lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (\text{IX.1})$$

Donde los valores $[X, Y, Z, \lambda]^T$ son las coordenadas asociadas con el sistema de referencia inicial $[X', Y', Z', \lambda']^T$. Estas coordenadas están asociadas mediante un nuevo sistema de referencia caracterizado por la matriz de escalado-rotación $R_{3 \times 3}$ y la matriz de traslación $T_{3 \times 1}$. En nuestro caso particular, calibración de los sistemas de visión artificial, es necesario conocer el sistema de referencia de los planos 2D que tienen las cámaras, IR y visible, y el proyector, ver Figura 2.9. A través de la formulación anterior, es simple obtener la proyección cónica de objetos 3D a planos 2D.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ \lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (\text{IX.2})$$

Así pues, el objetivo de la calibración es conocer el sistema de referencia de cada elemento, obteniendo la relación entre el sistema de referencia 3D y cada uno de los sistemas de referencia 2D. Para ello, se necesita obtener la matriz que representa las transformaciones proyectivas que permiten obtener la correspondencia entre ellos.

En nuestro caso particular, la cámara visible y el láser están colocados en la misma caja, ver Figura 2.9, permitiendo conocer este sistema de transformación mediante las dimensiones constructivas del sistema. Este sistema nos da una medida muy precisa de la posición de los píxeles sobre la escena donde el sistema de referencia global, $[X, Y, Z]$ está ubicado en el láser, ver Figura 2.9. Así pues, la malla obtenida mediante la cámara se toma como referencia en nuestro sistema. Esto reduce el problema de la calibración en conocer la transformación al resto de dispositivos, la cámara térmica y el proyector. Los pasos a seguir para computarlo son;

- 1.- *Traslación-rotación*: Transformar los puntos desde el sistema de referencia 3D a un sistema de referencia auxiliar colocado en el mismo punto que el sistema 2D.
- 2.- *Proyección*: Proyectar los puntos 3D al plano 2D, sensor físico del dispositivo.
- 3.- *Traslación-escalado*: Cambiar el sistema de unidad, de milímetros a píxeles, y encontrar el origen de coordenadas del sistema.

Estos pasos se pueden formular como;

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ ' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{2 \times 2} & T_{2 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ ' \end{bmatrix} \quad (\text{IX.3})$$

Esta expresión se puede reescribir como;

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ \lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (\text{IX.4})$$

Donde cada parámetro $a_1 \cdots a_n$ es un grado de libertad de este tipo de transformación.

X. Cálculo de los parámetros de calibración en transformaciones 3D a 2D.

De acuerdo con [6]. Una vez determinado el modelo matemático, para definir completamente la transformación, es necesario calcular los parámetros $a_1 \cdots a_n$. Para ello, existen una gran variedad de métodos, ver [201]. En este caso, dada la naturaleza de los datos y la estructura de los equipamientos a calibrar, los parámetros se van a calcular mediante métodos de optimización lineales. Estos métodos nos permiten trabajar con redundancia en los datos, asegurando buenos resultados en el cómputo. El método de aproximación lineal consiste en; dado una serie de correspondencias, $(u, v)_i \hat{A} \square (x, y, z)_i$, existe una única matriz A , la cual satisface la siguiente ecuación;

$$\begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{X.1})$$

Donde “ \times ” representa el producto vectorial. Esta expresión representa tres ecuaciones lineales, cada una de ellas, linealmente dependientes de las otras dos. Así pues, no pueden utilizarse solas en el cálculo de los parámetros. Sin embargo, cada correspondencia nos proporciona dos restricciones lineales del proceso de calibración;

$$\begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i \acute{a}x_i & -u_i \acute{a}y_i & -u_i \acute{a}z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & z_i & 1 & -v_i \acute{a}x_i & -v_i \acute{a}y_i & -v_i \acute{a}z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (\text{X.2})$$

Así pues, para el proceso de calibración serán necesarios como mínimo 6 correspondencias $(u, v)_i$ \square $(x, y, z)_i$ para estimar los 11 parámetros. Cuanto mayor sea el número de correspondencias, mayor redundancia tendremos en la información, así mayor precisión tendremos en la estimación de los parámetros.

XI. Mallado de un molde mediante la matriz foto-sensible de las cámaras. Asociación de técnicas de visión artificial y el método de elementos finitos - FEM.

Según la referencia [6]. Hasta la fecha, los píxeles de la matriz sensitiva de las cámaras han sido definidos como sensores puntuales de presencia de flujo, [53], [59], [60], [61], [148], [149]. En [141], [142], se asocian los píxeles de las imágenes para calcular parámetros asociados al preformado de la pieza pero la información obtenida no se relaciona con técnicas numéricas del lote de procesos. En [6], el autor definió la asociación entre píxeles y nodos usando cámaras de espectro visible, en la presente sección se amplía mencionada concepción, para ser aplicada a cámaras infrarrojas. Por tanto, en lugar de hablar simplemente de un CCD, hablaremos en adelante de una matriz foto-sensible o de foto-

sensores. En base a ello, si consideramos la matriz de foto-sensores de una cámara sensible a cualesquiera rango del espectro electromagnético, como una matriz de nodos, estos se pueden relacionar entre sí de la misma forma que se relacionan los nodos de la malla utilizada en la simulación por elementos finitos. Mediante la relación entre píxeles, sería posible definir cualquier tipo de geometría de elemento finito, triángulo cuadrado, hexágono, etc. Lo habitual, es utilizar elementos finitos triangulares en la simulación. Así pues, sin pérdida de generalidad, en esta sección se focaliza en este tipo de elementos finitos, ver Figura - Anexo XI.1.

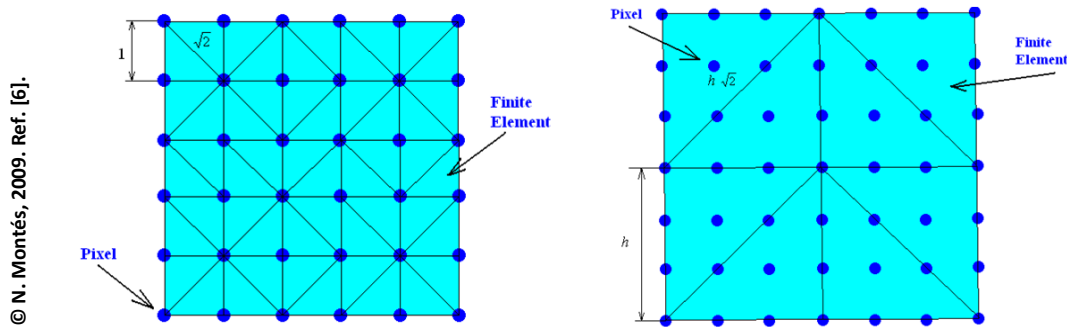


Figura - Anexo XI.1. Elementos finitos sin agrupar píxeles (izquierda). Agrupándolos (derecha).

En la definición de una malla sobre la matriz de píxeles de la cámara es posible seleccionar el nivel de precisión de los elementos. El nivel de precisión más alto implica considerar que todos los píxeles sean nodos, Figura - Anexo XI.2 (izquierda). A partir de ahí, se puede considerar que varios píxeles estén dentro de cada elemento finito definido por un grupo reducido de píxeles, Figura - Anexo XI.2 (derecha). La definición de píxeles a elementos finitos es simple. Dado un matriz de foto-sensores con P, Q píxeles, Figura - Anexo XI.3 (izquierda), y conociendo la forma típica de definir los elementos finitos en una malla, Figura - Anexo XI.3 (derecha), solo es necesario relacionar los píxeles de esa forma.

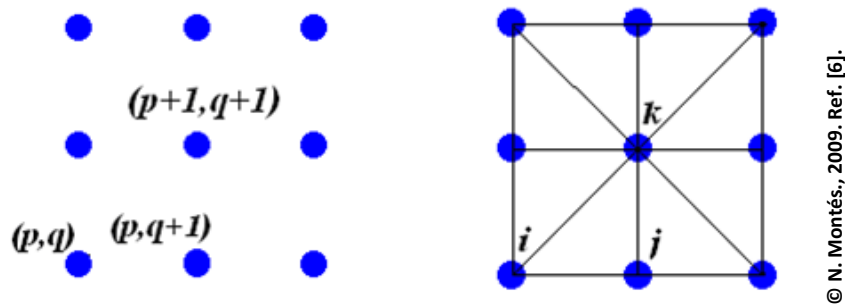
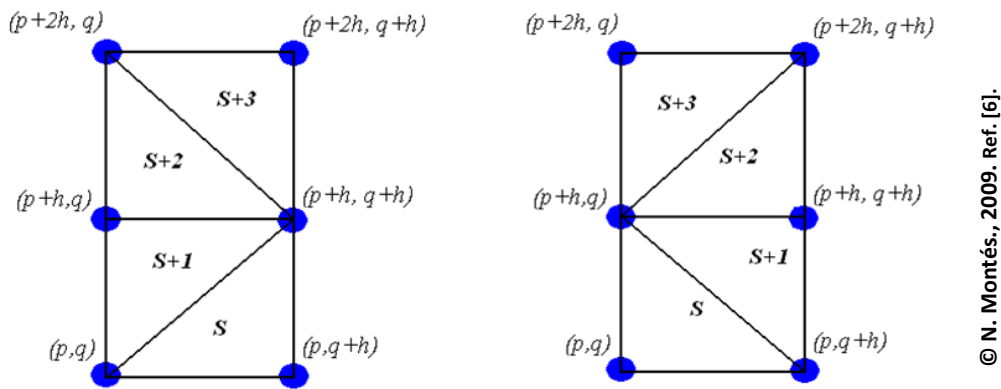


Figura - Anexo XI.2. Conversión de píxeles a elementos finitos.

La mejor malla que se puede construir para la simulación por elementos finitos es una malla uniforme y simétrica. Para obtener este tipo de malla en la matriz foto-sensible, los píxeles se deben de asociar de forma distinta entre una columna y la adyacente, ver Figura - Anexo XI.3.

Donde h es el incremento entre los píxeles usados como nodos. Si $h=1$, todos los píxeles serán nodos de la malla resultante, ver Figura - Anexo XI.1. La siguiente tabla formula cada elemento finito en función de este parámetro y su posición en el CCD con respecto a sus vecinos;

Los píxeles que están dentro de cada elemento finito se asocian con el elemento finito que los contiene mediante una tabla. El algoritmo necesario para generar una malla simétrica en la matriz de foto-sensores de la cámara se resume en la siguiente figura.



© N. Montés., 2009. Ref. [6].

Figura - Anexo XI.3. Generación de elementos finitos. Columna k (izq.), columna $k+1$ (der.).

	Columna k	Columna $k+1$
FE_s	$(p, q), (p, q + h), (p + h, q + h)$	$(p, q), (p, q + h), (p + h, q)$
FE_{s+1}	$(p + h, q), (p, q), (p + h, q + h)$	$(p + h, q), (p, q + h), (p + h, q + h)$
FE_{s+2}	$(p + 2 \cdot h, q), (p + h, q), (p + h, q + h)$	$(p + h, q), (p + h, q + h), (p + 2h, q + h)$
FE_{s+3}	$(p + 2 \cdot h, q), (p + h, q + h), (p + 2 \cdot h, q + h)$	$(p + h, q), (p + 2h, q + h), (p + 2h, q)$

© N. Montés., 2009. Ref. [6].

Tabla - Anexo XI.1. Definición de los elementos finitos mediante asociación de píxeles.

Este algoritmo establece una malla adimensional en el sensor, matriz de foto-sensores de la cámara. La dimensión de los elementos finitos es $\sqrt{2 \cdot h}$ en la diagonal de cada elemento

finito y h en la dirección vertical y horizontal, ver Figura - Anexo XI.1. El valor de h depende de la distancia entre los sensores en la matriz foto-sensible, obtenido de la hoja de características, y del número de píxeles usados en el elemento finito. Si colocamos una geometría 2D, en paralelo con la matriz foto-sensible, la malla adimensional se puede proyectar sobre la escena, obteniendo el mallado de la escena. En el ejemplo mostrado en la Figura - Anexo XI.5 se ha utilizado una cámara con 640x480 píxeles, seleccionado $h=10$.

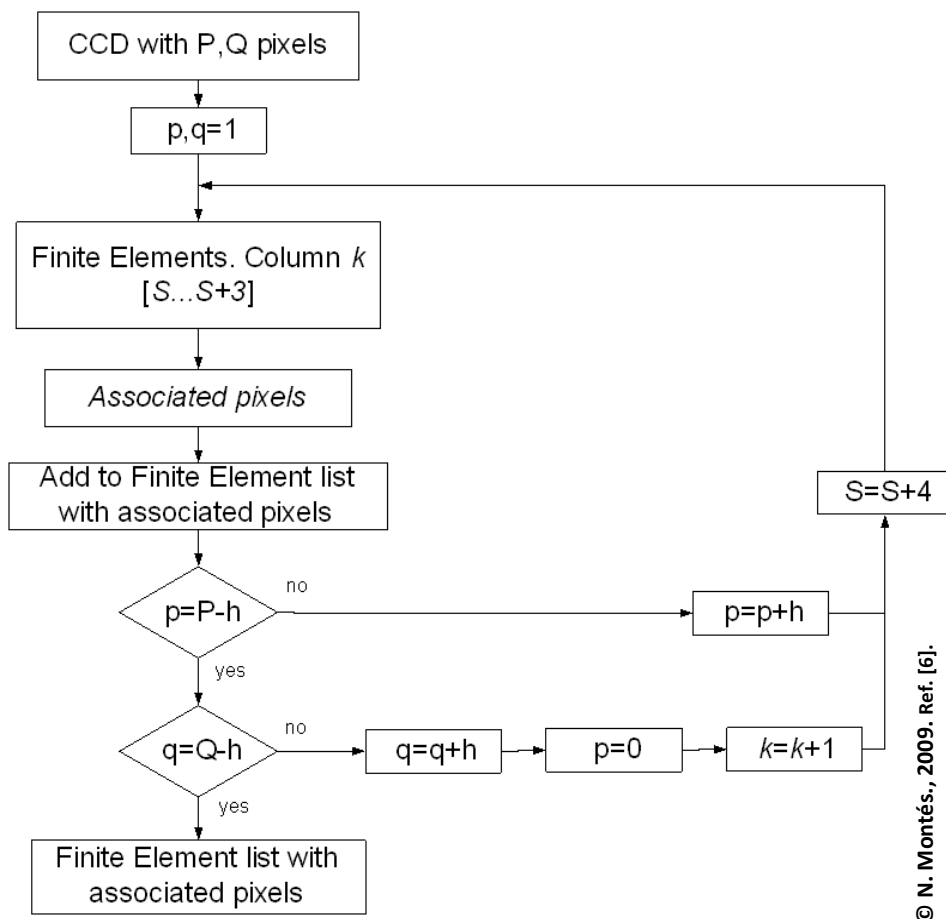


Figura - Anexo XI.4. Algoritmo de mallado con una cámara.

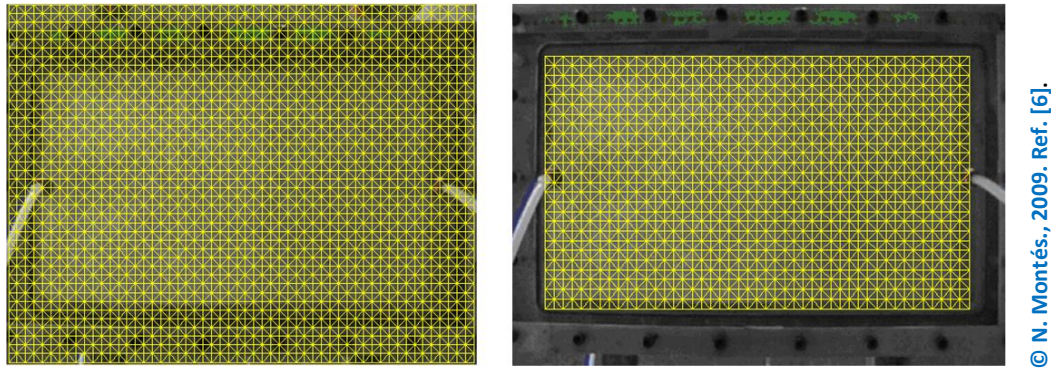


Figura - Anexo XI.5. Discretización de la escena (izquierda). Discretización del molde (derecha)

Esta discretización del molde nos permite sensorizarlo como si de una simulación se tratara, donde los píxeles contenidos en cada elemento finito se usan para medir de forma precisa la fracción volumétrica ocupada en cada instante de tiempo por el fluido.

Si en vez de utilizar la cámara como mallador de la geometría, preferimos utilizar una discretización previamente realizada, simplemente tenemos que asociar cada elemento finito a los píxeles que corresponden. El siguiente sub-apartado explica este proceso.

XII. Mallado de un molde desde la discretización del espacio con elementos finitos y su asociación con la matriz foto-sensible de las cámaras.



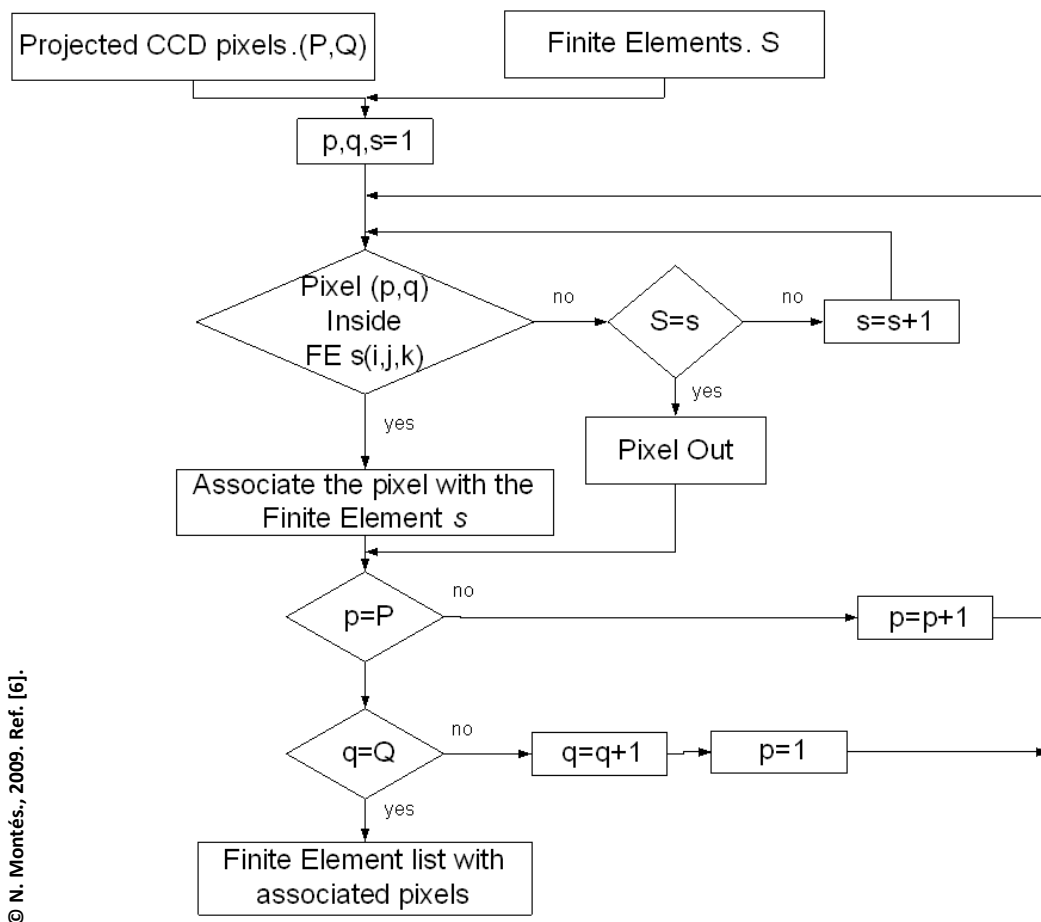
Figura - Anexo XII.1. Matching de objetos en una imagen

De acuerdo con la referencia [6]. En el apartado anterior, se discretiza una geometría situada en el espacio, utilizando directamente los píxeles como nodos donde, la relación entre estos nos permite definir elementos finitos. También es posible establecer el proceso inverso, es decir, dado un mallado concreto del molde, relacionar los píxeles con los elementos finitos predefinidos. Para ello, tenemos que conocer cuál es la posición del

molde en la escena. En visión artificial, la técnica para localizar cualquier objeto en una imagen se conoce como “*matching*”. Existen múltiples técnicas para localizar un objeto en una imagen, mediante su geometría, el contorno del objeto, su área, etc., [120], ver Figura - Anexo XII.1.

Una vez se ha localizado la geometría en la escena, los píxeles que están dentro de cada elemento finito se pueden asociar con cada uno de ellos. El algoritmo para computar esta asociación se muestra en la Figura - Anexo XII.2.

En este caso, los píxeles contenidos miden, como en el sub-apartado anterior, la fracción volumétrica que ocupa el flujo en cada elemento finito, obteniendo de la misma forma una monitorización del llenado del molde como si de una simulación se tratara. En la Figura - Anexo XII.3 se muestra un ejemplo del algoritmo anterior donde se han utilizado los obstáculos, en este caso dos círculos, para localizar el molde en la imagen y realizar la asociación.



© N. Montés, 2009. Ref. [6].

Figura - Anexo XII.2. Algoritmo de asociación de los píxeles con cada elemento finito.

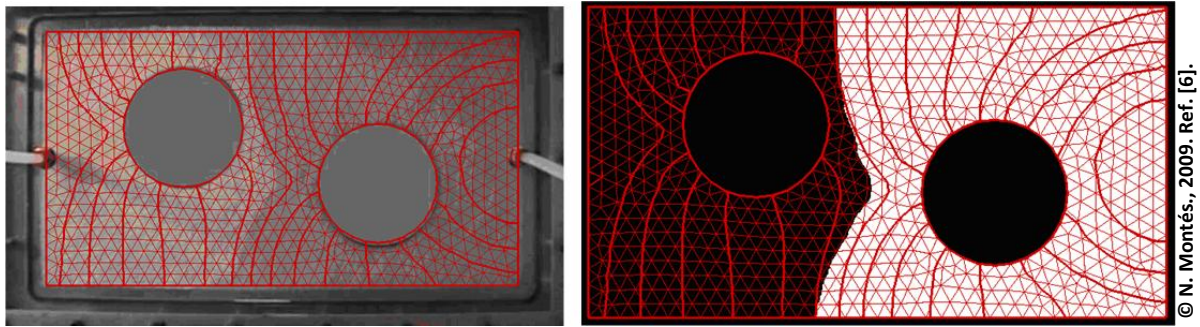


Figura - Anexo XII.3. Ejemplo de la asociación de píxeles con Elementos finitos predefinidos en el molde

Tanto en el caso de malla predefinida como en el caso de generar la malla con la cámara, es bastante simple determinar que píxeles pertenecen a la zona mojada y que píxeles no. Esto es debido a la diferencia de tonalidad de color o contraste de grises existente entre ambas zonas (zona seca y mojada). Esto nos permite utilizar un umbralizado de la imagen para determinar que píxeles pertenecen a cada zona. El umbralizado es un algoritmo básico en visión artificial donde solo se necesita imponer el nivel de tonalidad de la frontera, en nuestro caso entre la zona seca y la mojada.

En el caso de generar la malla con la cámara, seleccionando $h=1$, el sistema solo será capaz de determinar si el elemento finito está lleno o vacío. Sin embargo, si seleccionamos un valor superior, podremos determinar la fracción volumétrica de cada uno de ellos, ver Figura - Anexo XII.4.

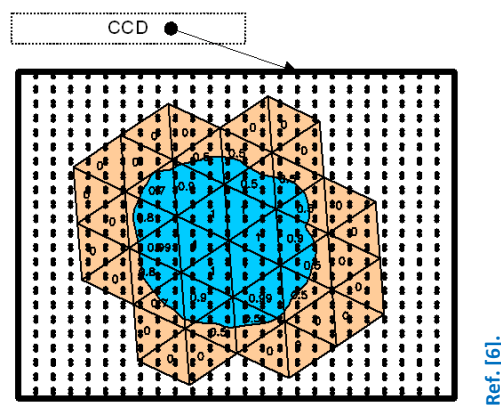


Figura - Anexo XII.4. Cómputo de la fracción volumétrica de cada elemento finito

Una de las principales ventajas de este sistema de sensorización es que podemos utilizar la malla obtenida por la cámara, ó la predefinida, para simular el proceso. Esto permite

comparar-verificar los resultados de la simulación, por ejemplo, bien con la posición actual del frente o corregir el valor de permeabilidad utilizado por zonas en la etapa de llenado, la velocidad del curado en alguna zona (etapa de curado). Focalizando nuestra atención en la Figura - Anexo XII.3, el flujo se está desplazando más rápido por la parte inferior del molde, tomando como referencia el resultado de la simulación.

XIII. Discretización del espacio con visión artificial para geometrías 2.5D.

De acuerdo con la referencia [6]. Como se explico en la introducción de este capítulo, los sistemas de visión artificial necesitan de dispositivos adicionales en el caso de trabajar con geometrías 2.5D. En los procesos LCM-RIFT, y en particular en los procesos VIP, este es el caso más usual, ya que las piezas a infundir son el casco de un barco, el ala de un avión, etc. Para este tipo de casos, se hace necesario el uso de múltiples cámaras, y sus correspondientes dispositivos adicionales para poder ubicar los píxeles en el espacio.

El uso de los dispositivos adicionales le permite al sistema de visión artificial ofrecer un gran de número de utilidades adicionales. Por ejemplo, si utilizamos un láser telemétrico unido con una cámara, podemos obtener con gran precisión, la posición de los nodos sobre el molde. Los láseres telemétricos son usados en procesos LCM para analizar como varia la permeabilidad en función de los cambios de presión local, [255]. En el mercado, existen lo que se conoce como digitalizador 3D, que está compuesto por ambos dispositivos, cámara y láser telemétrico, incorporados en el mismo dispositivo, ver Figura - Anexo XIII.1.



Figura - Anexo XIII.1. Digitalizador VIVID 910 de Konica Minolta utilizado en la experimentación⁷².

⁷² <http://sensing.konicaminolta.us/products/vivid-910-3d-laser-scanner/>

En este dispositivo la cámara, arriba, y el láser telemétrico, abajo, permiten digitalizar un objeto con gran precisión. Este dispositivo permite escanear un objeto de 1m^2 con una precisión de ± 0.5 mm en los tres ejes. Como resultado, otorga una imagen 3D compuesta por 640×480 puntos. En [255], utilizan este dispositivo para analizar la dependencia del grosor y la permeabilidad en la preforma sometida a presiones. En nuestro caso, este sistema nos permite definir completamente elementos finitos tridimensionales. Dado un molde colocado sobre la escena, este se discretiza mediante el láser telemétrico y la cámara, obteniendo los elementos finitos sobre el molde, en la Figura - Anexo XII.2, la posición de los nodos $1,2,3$. Seguidamente se coloca la preforma, y volvemos a realizar otro escaneado del molde, esta vez con la preforma colocada. La nueva posición de los nodos/píxeles sobre la escena nos determina la altura de los nodos, h_1 , h_2 y h_3 respectivamente. Una vez aplicado el vacío, se realiza otro escaneo del molde que nos permitirá saber cuál es la variación del espesor al cual se ve sometido cada elemento finito permitiendo conocer, la permeabilidad existente en cada uno de ellos. El espesor no solo varía solo por este hecho, sino que además varía con el paso del flujo, tanto en la zona seca como en la mojada. Mediante el uso de este dispositivo podemos medir también el cambio de grosor al que se ve sometido cada elemento finito en cada instante de tiempo. La siguiente figura muestra un esquemático del proceso descrito.

En el caso de utilizar un proyector como método de reconstrucción 3D, este se puede utilizar para ayudar a los operarios al montaje de los canales de inyección óptimos y también para proyectar la posición óptima del frente de avance en cada instante de tiempo. El proyector se puede considerar como una cámara, pero con configuración inversa, es decir, en vez de captar la iluminación de la escena, proyecta iluminación sobre ella. Así pues, después de obtener el modelo mediante elementos y utilizarlo para el diseño y optimización de la estrategia óptima de llenado, los resultados pueden ser trasladados a la geometría real para ayudar a los operarios tanto al montaje de la estrategia óptima, como para la vigilancia del llenado mediante comparación con la simulación. La siguiente figura muestra un esquemático de este proceso.

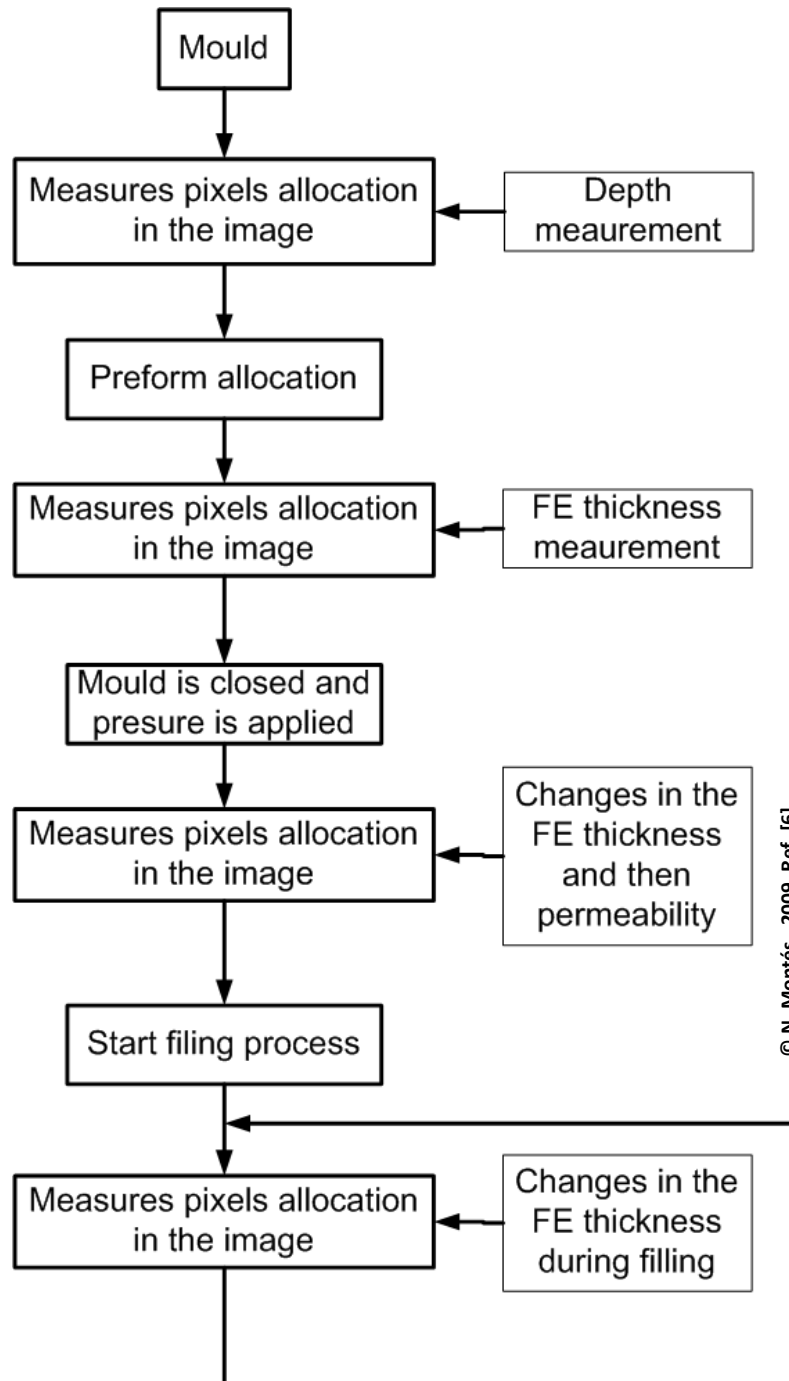


Figura - Anexo XIII.2. Definición del modelo de espesor variable.

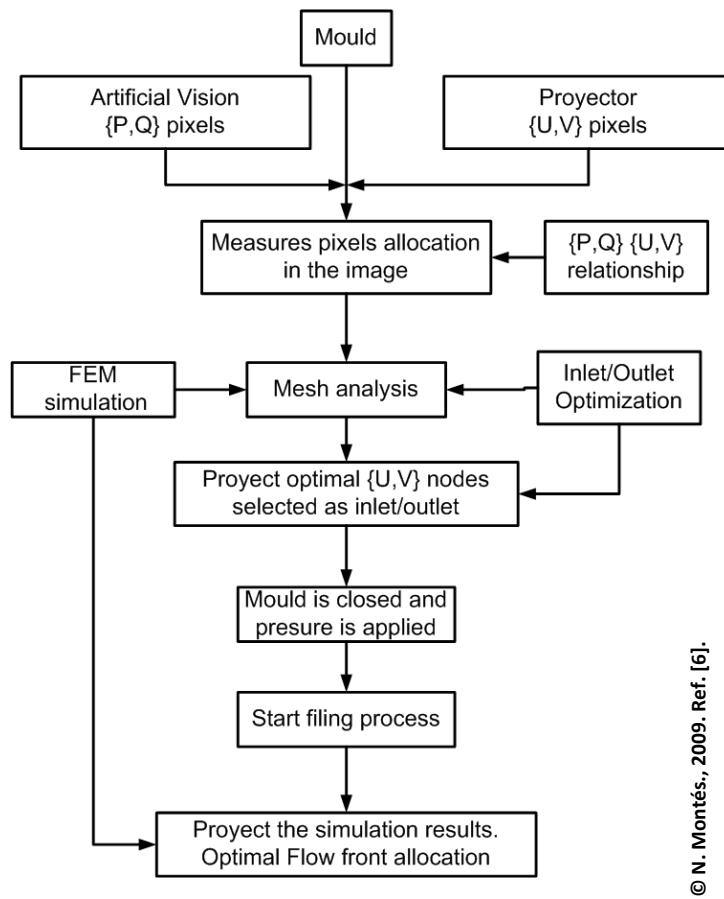


Figura - Anexo XIII.3. Uso del proyector en procesos LCM.

Referencias

- [1] Ruiz, E., "**Presentation About LCM Modelling - Non-Isothermal Filling and Curing. Course MEC6318 at Montreal University**", Slide ID: Cure of Thermosets, **March 2008**.
- [2] Herbert Kaplan, "**Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment**", Third ed., Bellingham, Washington (USA): SPIE Press, **2007**.
- [3] F. Lebel, "**Contrôle De La Fabrication Des Composites Par Injection Sur Reinforts**", PhD. Thesis, *Polytechnique School of Montreal*, Montreal (Quebec - Canada), **June 2012**.
- [4] Ruiz, E., Demaria, C., and Trochu, F., "**PolyPer: A Freeware Package for Preform Permeability Characterisation**", *JEC - Composites*, Date published: **May 2005**, Web site.
- [5] Ruiz, E. and Waffo, F., "**Presentation of Polykinetic: A Freeware for Resin Cure Characterization**", Slide ID: Available Kinetic Models, **February 2006**.
- [6] N. Montés, "**Marco Computacional Para El Diseño, Optimización y Control De Procesos De Moldeo Con Resinas Líquidas (LCM)**", PhD. Thesis, *CEU Universidad Cardenal Herrera*, Valencia (Spain), **July 2009**.
- [7] M. Hattabi, J. Echaabi, M. O. Bensalah, J. Bréard, and A. Saouab, "**Flow Analysis During On-Line and Radial Injection Applications in Permeability Measurements**", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No. 18, pp. 1909-1920, **December 2005**.
- [8] U. Pineda, N. Montes, L. Domenech, and F. Sanchez, "**Towards Artificial Vision and Pattern Recongnition Techniques for Application in Liquid Composite Moulding Processes**", *ECCOMAS CFD 2010 - V European Conference on Industrial Applications*, V European Conference on Industrial Applications, Lisbon (Portugal), **June 2010**.
- [9] A.Ferreira, "**Procedure D'Utilisation Du Moule De Perméabilité 1D**", Date published: **September 2006**.
- [10] U. Pineda, N. Montés, F. Sánchez, F. Bensadoun, and E. Ruiz, "**Towards a Quality Monitoring to Control the Degree of Cure in the Manufacturing of**

- Composite Parts**", *Journal of Advanced Science Letter*, Vol. 19, No. 3, pp. 869-872, **March 2013**.
- [11] U. Pineda, N. Montés, F. Sánchez, and L. Domenech, "**Experimental Evaluation of Heat Transfer Measurements During LCM Processes by Intrusive and Non-Intrusive Heat Flux Sensors**", *18th International Conference on Composite Materials*, 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island (Korea), **August 2011**.
- [12] U. Pineda, N. Montés, F. Sánchez, F. Bensadoun, and E. Ruiz, "**In-Situ Calibration Experimental Method for Infrared Thermography Applied to the Heat Transfer Analysis for Composite Parts During Manufacturing Based on Resin Infusion Technique**", *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [13] U. Pineda, F. Bensadoun, E. Ruiz, N. Montés, and F. Sánchez, "**Experimental Analysis by Thermography and Conductive Heat Flux Sensors of the Curing Stage of Composite Parts Made by Resin Infusion (RI)**", *15th European Conference on Composite Materials*, ECCM 2012, Venice (Italy), **June 2012**.
- [14] G. Morren, S. Bossuyt, and H. Sol, "**2D Permeability Tensor Identification of Fibrous Reinforcements for RTM Using an Inverse Method**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 9, pp. 1530-1536, **September 2008**.
- [15] E. Ruiz, "**De La Caractérisation Des Matériaux Et Simulation Du Procédé à L'Optimisation De La Fabrication Des Composites Par Injection Sur Renfort**", *Université de Montréal (Canada)*, **January 2004**.
- [16] F. Zhou, N. Kuentzer, P. Simacek, S. G. Advani, and S. Walsh, "**Analytic Characterization of the Permeability of Dual-Scale Fibrous Porous Media**", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 15, pp. 2795-2803, **December 2006**.
- [17] U. Pineda, N. Montés, L. Domenech, and F. Sánchez, "**On-Line Measurement of the Resin Infusion Flow Variables Using Artificial Vision Technologies**", *International Journal of Material Forming Processes*, Esaform 13th, Vol.3, Suplemento 1 ed., Brescia (Italy), Springer, pp. 711-714, **April 2010**.
- [18] N. C. Correia, F. Robitaille, A. C. Long, C. D. Rudd, Simacek, and S. G. Advani, "**Analysis of the Vacuum Infusion Moulding Process: I. Analytical Formulation**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 12, pp. 1645-1656, **December 2005**.
- [19] P. Wang, S. Drapier, J. Molimard, A. Vautrin, and J. C. Minni, "**Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) Filling by Fringe Pattern**

- Projection and In Situ Thermocouples"**, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 1, pp. 36-44, **September 2009**.
- [20] M. Strauf Amabile, V. Eckers, and T. Gries, "**Draping of Non-Crimp Fabrics for Fibre Reinforced Composites**", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 647-650, **April 2010**.
- [21] Mazumdar S.K., "**Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering**", in the *Chapter 11: Cost Estimation*, CRC Press, **December 2001**.
- [22] Tecsalt, "**Étude Économique De L'Industrie Des Composites Au Québec**", Ministère du Développement Économique, de l'Innovation et de l'Exportation du Québec (MEDIE):10, Date published: **2008**.
- [23] Mason, K., "**¿Autoclave Quality Outside the Autoclave?**", *CW Composites World - Composites World*, Gardner Business Media, Inc, Date published: **January 2006**, Web site: <http://www.compositesworld.com/articles/autoclave-quality-outside-the-autoclave>, Access Date: January 2013.
- [24] Hull D. and T.W.Clyne, "**An Introduction to Composites Materials**", Cambridge University Press, **1996**.
- [25] J. Summerscales, "**Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)**", *Wiley Encyclopedia of Composites*, **2012**.
- [26] J. Summerscales and T. J. Searle, "**Low-Pressure (Vacuum Infusion) Techniques for Moulding Large Composite Structures**", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 219, No. 1, pp. 45-58, **2005**.
- [27] E. Ruiz and F. Trochu, "**Comprehensive Thermal Optimization of Liquid Composite Molding to Reduce Cycle Time and Processing Stresses**", *Polym Compos*, Vol. 26, No. 2, pp. 209-230, **2005**.
- [28] C. Williams, J. Summerscales, and S. Grove, "**Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT): A Review**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, No. 7, pp. 517-524, **1996**.
- [29] J. R. Thagard, O. I. Okoli, Z. Liang, H.-P. Wang, and C. Zhang, "**Resin Infusion Between Double Flexible Tooling: Prototype Development**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 9, pp. 803-811, **September 2003**.
- [30] N. Montés, F. Sánchez, and A. Falco, "**A Topological Approach for the Flow Behaviour Characterization in LCM Processes**", *International Journal of Material Forming*, Esaform 12th, Twente (Netherland): Twente (Netherland), **2009**.

- [31] J. D. Menczel, L. Judovits, R. B. Prime, H. E. Bair, R. Mike, and S. Swier, "**Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications**", in the *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*, J.D.Menczel and R.B.Prime, Eds., Wiley, pp. 7-239, **2009**.
- [32] V. Sobotka and D. Delaunay, "**Analysis and Control of Heat Transfer in an Industrial Composite Mold in RTM Polyester Automotive Process**", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, No. 9, pp. 881-901, **June 2007**.
- [33] M. J. Perry, L. J. Lee, and C. W. Lee, "**On-Line Cure Monitoring of Epoxy/Graphite Composites Using a Scaling Analysis and a Dual Heat Flux Sensor**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 2, pp. 274-292, **January 1992**.
- [34] K. T. Hsiao, R. Little, O. Restrepo, and B. Minaie, "**A Study of Direct Cure Kinetics Characterization During Liquid Composite Molding**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 6, pp. 925-933, **June 2006**.
- [35] C. Demaria, "**Caractérisation Expérimentale Et Modélisation De La Perméabilité De Renforts à Fibres Continues Déformés Par Cisaillement**", *Universidad Politécnica de Montreal*, **August 2008**.
- [36] Alms, Justin B., Correia, Nuno, Advani, Suresh G., and Ruiz, Edu, "**Experimental Procedures to Run Longitudinal Injections to Measure Unsaturated Permeability of LCM Reinforcements**", Source: CCHP, Last updated: **August 2010**, Web site: <http://cchp.meca.polymtl.ca/fichiers/permeabilityBenchmarkII/PermBenchmarka4.pdf>, Access Date: March 2013.
- [37] M. Krause, J. Hausherr, B. Burgeth, C. Herrmann, and W. Krenkel, "**Determination of the Fibre Orientation in Composites Using the Structure Tensor and Local X-Ray Transform**", *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 4, pp. 888-896, **February 2010**.
- [38] P. Naghipour, M. Bartsch, L. Chernova, J. Hausmann, and H. Voggenreiter, "**Effect of Fiber Angle Orientation and Stacking Sequence on Mixed Mode Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics: Numerical and Experimental Investigations**", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 3, pp. 509-517, **January 2010**.
- [39] E. Ruiz, C. Billotte, F. M. Bernard, F. Cara, and H. Baurier, "**Chemical Shrinkage and Thermomechanical Characterization of an Epoxy Resin During Cure by a Novel In Situ Measurement Method**", *18th International Conference on Composite Materials*, Jeju Island (Korea), pp. 1-5, **August 2011**.

- [40] J. Summerscales, "**Advanced Polymeric Materials - Structure and Property Relationships**", in the *Chapter: In-Process Monitoring for Control of Closed-Mold Techniques for the Manufacture of Thermosetting Matrix Composites*, 1st ed., G. O. Shonaike and S. G. Advani, Eds., Boca Raton (FL), CRC Press LLC, pp. 57-101, **2003**.
- [41] ESI GmbH and Other Fourteen Partners, "**The European Commission Grants Financial Contribution to the INFUCOMP Project for the Simulation of Composite Parts Infusion**", Last updated: **2013**, Web site: <http://www.esi-group.com/corporate/news-media/press-releases/2010-english-pr/the-european-commission-grants-financial-contribution-to-the-infucomp-project-for-the-simulation-of-composite-parts-infusion>, Access Date: February 2013.
- [42] V. Achim and E. Ruiz, "**Guiding Selection for Reduced Process Development Time in RTM**", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 2 Supplement, pp. 1277-1286, **2010**.
- [43] Simacek, P., "**LCM Modelling - Current Issues**", Center for Composite Materials - Delaware University, Last updated: **April 2005**, Web site: http://www.ccm.udel.edu/Pubs/Spring05_RR/Simacek.pdf, Access Date: January 2013.
- [44] ESI-Group, "**PAM-RTM**", ESI-Group, Last updated: **2013**, Web site: <http://www.esi-group.com/products/composites/pam-rtm/benefits>, Access Date: January 2013.
- [45] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, and J. Bréard, "**Optimization of Injection Flow Rate to Minimize Micro/Macro-Voids Formation in Resin Transfer Molded Composites**", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 3-4, pp. 475-486, **March 2006**.
- [46] B. R. Gebart and L. A. Strömbeck, "**Processing of Composites**", in the *Principles of Liquid Composite Molding*, R.S Davé and A.C.Loos, Eds., Munich, Hanser Publishers, pp. 358-386, **1999**.
- [47] M. Afendi, W. M. Banks, and D. Kirkwood, "**Bubble Free Resin for Infusion Process**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 6, pp. 739-746, **June 2005**.
- [48] E. Ruiz and F. Trochu, "**Multi-Criteria Thermal Optimization in Liquid Composite Molding to Reduce Processing Stresses and Cycle Time**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 6, pp. 913-924, **June 2006**.
- [49] N. Takeda, Y. Okabe, and T. Mizutani, "**Damage Detection in Composites Using Optical Fibre Sensors**", *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 221, No. 4, pp. 497-508, **2007**.
- [50] Nguyen Quang Nguyen, Nikhil Gupta, Tindaro Ioppolo, and M. Volkan Ötügen, "**Whispering Gallery Mode-Based Micro-Optical Sensors for Structural Health Monitoring of Composite Materials**", *Journal of Materials Science*, Vol. 44, No. 6, pp. 1560-1561, **March 2009**.
- [51] S. Takeda, Y. Aoki, T. Ishikawa, N. Takeda, and H. Kikukawa, "**Structural Health Monitoring of Composite Wing Structure During Durability Test**", *Composite Structures*, Vol. 79, No. 1, pp. 133-139, **June 2007**.
- [52] J. M. Brown, S. Srinivasan, A. Rau, T. C. Ward, J. E. McGrath, A. C. Loos, D. Hood, and D. E. Kranbeuhl, "**Production of Controlled Networks and Morphologies in Toughened Thermosetting Resins Using Real-Time, In-Situ Cure Monitoring**", *Polymer*, Vol. 37, No. 9, pp. 1691-1696, **1996**.
- [53] R. J. Johnson and R. Pitchumani, "**Active Control of Reactive Resin Flow in a Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 12, pp. 1205-1229, **June 2008**.
- [54] F. Abrams, "**Processing of Composites**", in the *Intelligent Processing Tools for Composite Processing*, R.S.Davé and A.C.Loos, Eds., pp. 442-469, **1999**.
- [55] Shunliang Jiang, C. Zhang, and B. Wang, "**A Process Performance Index and Its Application to Optimization of the RTM Process**", *Polym Compos*, Vol. 22, No. 5, pp. 690-701, **October 2001**.
- [56] F. Sánchez, J. A. García, F. Chinesta, L. Gascón, C. Zhang, Z. Liang, and B. Wang, "**A Process Performance Index Based on Gate-Distance and Incubation Time for the Optimization of Gate Locations in Liquid Composite Molding Processes**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 6, pp. 903-912, **June 2006**.
- [57] S. Comas-cardona, S. Ziaee, and S. G. Advani, "**Spatially Homogeneous Gelation in Liquid Composite Molding**", *Polym Eng Sci*, Vol. 42, No. 8, pp. 1667-1673, **2002**.
- [58] J. S. Leclerc and E. Ruiz, "**Porosity Reduction Using Optimized Flow Velocity in Resin Transfer Molding**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 12, pp. 1859-1868, **December 2008**.
- [59] D. Modi, N. Correia, M. Johnson, A. Long, C. Rudd, and F. Robitaille, "**Active Control of the Vacuum Infusion Process**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 5, pp. 1271-1287, **May 2007**.
- [60] Q. Govignon, S. Bickerton, J. Morris, and P. A. Kelly, "**Full Field Monitoring of the Resin Flow and Laminate Properties During the Resin Infusion Process**",

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, pp. 1412-1426, **2008**.
- [61] A. R. Nalla, M. Fuqua, J. Glancey, and B. Lelievre, "**A Multi-Segment Injection Line and Real-Time Adaptive, Model-Based Controller for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 3, pp. 1058-1069, **March 2007**.
- [62] F. Lionetto, A. Tarzia, and A. Maffezzoli, "**Air-Coupled Ultrasound: A Novel Technique for Monitoring the Curing of Thermosetting Matrices**", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, Vol. 54, No. 7, pp. 1437-1444, **July 2007**.
- [63] M. Rahammer, P. Menner, and G. Busse, "**Thermal Waves for NDE of Aircraft: Comparison of Lockin Thermography and Lockin Interferometry**", *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [64] C. D. Rudd, A. C. Long, K. N. Kendall, and C. Mangin, "**Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques**", Woodhead Publishing, **1997**.
- [65] P. G. Zhang and D. Irvine-Halliday, "**Non Destructive Monitoring of the Curing Process of Epoxy in Situ by Way of a Fiber Acoustic Sensor**", *Electrical and Computer Engineering, 1996. Canadian Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. 880-883, **1996**.
- [66] D. Richter, H. Fritze, T. Schneider, P. Hauptmann, N. Bauersfeld, K. D. Kramer, K. Wiesner, M. Fleischer, G. Karle, and A. Schubert, "**Integrated High Temperature Gas Sensor System Based on Bulk Acoustic Wave Resonators**", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 118, No. 1, pp. 466-471, **2006**.
- [67] B. W. Grimsley, R. J. Cano, P. Hubert, A. C. Loos, C. B. Kellen, and B. J. Jensen, "**Preform Characterization in VARTM Process Model Development**", *Proceedings of 36 th International SAMPE Technical Conference*.(SAMPE, Corvina, CA), Citeseer, **2004**.
- [68] Q. Govignon, S. Bickerton, J. Morris, and J. Lin, "**A Stereo Photography System for Monitoring Full Field Thickness Variation During Resin Infusion**", *Proceedings of the 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Douai, France, pp. 231-239, **2006**.
- [69] M. Devillard, K. T. Hsiao, and S. G. Advani, "**Flow Sensing and Control Strategies to Address Race-Tracking Disturbances in Resin Transfer Molding. Part II: Automation and Validation**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 11, pp. 1581-1589, **November 2005**.

-
- [70] E. M. Sozer, S. Bickerton, and S. G. Advani, "**On-Line Strategic Control of Liquid Composite Mould Filling Process**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 12, pp. 1383-1394, **December 2000**.
- [71] J. G. Webster, "**The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**", Springer, **1999**.
- [72] "**Instrumentation Reference Book**", Third Edition ed., Butterworth Heinemann, **2003**.
- [73] K. G. Bang, J. W. Kwon, D. G. Lee, and J. W. Lee, "**Measurement of the Degree of Cure of Glass Fiber-Epoxy Composites Using Dielectrometry**", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 209-214, **June 2001**.
- [74] H. S. Kim and D. G. Lee, "**Reduction of Fabricational Thermal Residual Stress of the Hybrid Co-Cured Structure Using a Dielectrometry**", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 1, pp. 29-44, **January 2007**.
- [75] Knappe S., "**Cure Monitoring of Composite by DEA**", *15th European Conference on Composite Materials, ECCM 15*, Venice, Italy: Venice, Italy, **June 2012**.
- [76] Alexandros A Skordos and Ivana K Partridge, "**Dielectric Flow Sensing in Resin Transfer Moulding of Carbon Fibre Reinforced Composites**", *Plastics Rubber and Composites*, Vol. 29, pp. 391-394, **2000**.
- [77] Alexandros A Skordos, Panagiotis I Karkanas, and Ivana K Partridge, "**A Dielectric Sensor For Measuring Flow in Resin Transfer Moulding**", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 25-31, **2000**.
- [78] A. A. Skordos and I. K. Partridge, "**Effects of Tool-Embedded Dielectric Sensors on Heat Transfer Phenomena During Composite Cure**", *Polym Compos*, Vol. 28, pp. 139-152, **2007**.
- [79] D. R. Day, "**Dielectric Determination of Cure State During Non-Isothermal Cure**", *Polym Eng Sci*, Vol. 29, No. 5, pp. 334-338, **March 1989**.
- [80] D. O. Thompson and D. E. Chimenti, "**Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**", in the *Sensors and New Techniques*, 12 ed., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds., Plenum Press, pp. 905-1168, **1993**.
- [81] N. K. K. and D. R. C., "**Flow and Cure Phenomena in Liquid Composite Molding**", *Polym Compos*, Vol. 15, No. 5, pp. 334-348, **1994**.
- [82] J. H. Chen, M. A. Oceau, M. Hojjati, and A. Yousefpour, "**Cure Cycle Optimisation For Composite Panels Fabricated By RTM Using Dielectric**

- Sensors**", *17th International Conference on Composite Materials*, ICCM 17th, Edinburgh (UK): International Committee on Composite Materials, **July 2009**.
- [83] A. A. Baker and S. Dutton, "**Composite Materials for Aircraft Structures**", Reston, VA (USA): American Institute of Aeronautics and Astronautics, **2004**.
- [84] A. R. Harper, "**Automating RTM: Closing the Loop.**", *SPI - Reinforced Plastics*, 45th Annual Technical Conference, Vol. Session 14B, Lancaster, PA: Washington, D.C, Technomic Publishing, pp. 1-5, **February 1990**.
- [85] S. Walsh, "**Artificial Intelligence- Its Application to Composite Processing**", International SAMPE Symposium and Exhibition, 35 th, Anaheim, CA, 35 ed., Anaheim, CA: pp. 1280-1291, **1990**.
- [86] A. Kikuchi, E. Higuerey, and J. Coulter, "**An Experimental Investigation of Resin Flow Sensing During Molding Processes**", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, No. 1, pp. 86-93, **1995**.
- [87] D. D. Shepard, "**Resin Flow Front Monitoring Saves Money and Improves Quality**", *Resin Transfer Molding. SAMPE Monograph*, No. 3, pp. 75-79, **1999**.
- [88] P. Barooah, Berna Berker, and Q. S. J., "**Lineal Sensors for Liquid Injection Molding of Advanced Composite Materials**", Department of Mechanical Engineering - University of Delaware, Newark, DE 19716, Date published: **March 2003**, Web site: <http://humdoi.mae.ufl.edu/~prabirbarooah/publications/sensorJMPMS98.pdf>.
- [89] Netzsch, "**DEA 288 Epsilon - Analizador Dieléctrico - Optimice Sus Procesos De Curado**", NETZSCH, Last updated: **2013**, Web site: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/sp/productos-soluciones/analisis-dielectrico/dea-288-epsilon.html#!contentBypass:tab-10841-2-992-4>, Access Date: February 2013.
- [90] N. Gupta and R. Sundaram, "**Fiber Optic Sensors for Monitoring Flow in Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERITY) Process**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1065-1070, **August 2009**.
- [91] L. Wang, S. Pandita, V. R. Machavaram, S. Malik, D. Harris, and G. F. Fernando, "**Characterisation of the Cross-Linking Process in an E-Glass Fibre/Epoxy Composite Using Evanescent Wave Spectroscopy**", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 13, pp. 2069-2074, **2009**.
- [92] M. L. Anne, E. L. G. L. Salle, B. Bureau, J. Tristant, F. Brochot, Boussard-Plédel, H. L. Ma, X. H. Zhang, and J. L. Adam, "**Polymerisation of an Industrial Resin Monitored by Infrared Fiber Evanescent Wave Spectroscopy**", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 137, No. 2, pp. 687-691, **2009**.

-
- [93] P. Wang, J. Molimard, S. Drapier, A. Vautrin, and P. J. Novoa, "**Monitoring the Liquid Resin Infusion (LRI) Manufacturing Process Under Industrial Environment Using Distributed Sensors**", Proceedings of ICCM 17, Vol.1, Edinburgh (UK), **2009**.
- [94] A. Cusano, G. Breglio, M. Giordano, A. Calabrò, A. Cutolo, and L. Nicolais, "**An Optoelectronic Sensor for Cure Monitoring in Thermoset-Based Composites**", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 84, No. 3, pp. 270-275, **September 2000**.
- [95] P. Olivier, M. Mulle, C. Paris, and F. Collombet, "**Carbon/Polymeric Composites Autoclave Cure Monitoring With Optical Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors**", *Wiley Encyclopedia of Composites*, **2012**.
- [96] X. Yu, H. Zhao, and Y. Liu, "**A Distributed Temperature-Sensing System Based on FBG**", Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III, International Society for Optics and Photonics, p. 65953T, **2007**.
- [97] R. Montanini and L. D'Acquisto, "**Simultaneous Measurement of Temperature and Strain in Glass Fiber/Epoxy Composites by Embedded Fiber Optic Sensors: I. Cure Monitoring**", 16 ed **2007**, p. 1718.
- [98] B. K. Fink, R. Mathur, and S. G. Advani, "**An Evanescent Wave Fluorescence Fiber-Optic Flow Sensor for Resin Transfer Molding**", DTIC Document, Date published: **2000**.
- [99] R. L. Levy and S. D. Schwab, "**Monitoring the Composite Curing Process With a Fluorescence Based Fiber Optic Sensor**", *Polym Compos*, Vol. 12, No. 2, pp. 96-101, **2004**.
- [100] E. Chailleux, M. Salvia, N. Jaffrezic-Renault, V. Matejec, and I. Kasik, "**Fiber Optic Sensor for Monitoring the Polymer Cure Process**", Photonics Prague'99, International Society for Optics and Photonics, pp. 136-142, **1999**.
- [101] E. Chailleux, M. Salvia, N. Jaffrezic-Renault, V. Matejec, and I. Kasik, "**In Situ Study of the Epoxy Cure Process Using a Fibre-Optic Sensor**", *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 2, p. 194, **2001**.
- [102] V. Antonucci, M. Giordano, A. Cusano, J. Nasser, and L. Nicolais, "**Real Time Monitoring of Cure and Gelification of a Thermoset Matrix**", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 16, pp. 3273-3280, **2006**.
- [103] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, and D. K. Bhattacharya, "**Fibre Bragg Gratings in Structural Health Monitoring - Present Status and Applications**", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, No. 1, pp. 150-164, **2008**.

- [104] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, C. G. Koh, W. J. Cantwell, and P. J. Scully, "**Plastic Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Progress**", *Journal of sensors*, Vol. 2009, **2009**.
- [105] MAPE Engineering Switzerland S.A., "**Infusion Composite Parts - Thermoflux Technologies**", Web site: http://www.thermoflux.ch/pdf/an-011-a-en_infusion.pdf, Access Date **December 2009**
- [106] MAPE Engineering Switzerland S.A., "**RTM (Resin Transfer Molding) - Thermoflux Technologies S.A.**", Web site: http://www.tfx-technology.com/pdf/an-010-a-en_rtm.pdf, Access Date **December 2009**
- [107] Arven H.Saunders, "**Cure Monitoring and Control System**," Texas (US) Patent US 6,490,501 B1, **December 2002**.
- [108] P. J. Halley and M. E. Mackay, "**Chemorheology of Thermosets, An Overview**", *Polym Eng Sci*, Vol. 36, No. 5, pp. 593-609, **March 1996**.
- [109] L. Vøchot, I. Bombard, P. Laurent, and J. Lieto, "**Experimental and Modelling Study of the Radiative Curing of a Polyester-Based Coating**", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 45, No. 1, pp. 86-93, **January 2006**.
- [110] Roger Vodicka, "**Cure Monitoring Techniques Using Embedded Sensors**", Date published: **1997**, Web site: <http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/bitstream/1947/3600/1/DSTO-TN-0110%20PR.pdf>.
- [111] T. Loulou and E. P. Scott, "**An Inverse Heat Conduction Problem With Heat Flux Measurements**", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 67, No. 11, pp. 1587-1616, **2006**.
- [112] N. Mathis, J. Pytel, and P. Lee-Sullivan, "**Resin Cure Monitoring Using Thermal Conductivity Measurements**", *Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (SPE)*, ANTEC 97, **1997**.
- [113] D. Rouison, M. Varejka, and J. Picot, "**Thermal Sensor to Monitor Mechanical Properties in Polymer/Fiber Composite Molding**", *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 80, No. 5, pp. 943-947, **October 2002**.
- [114] N. Boyard, A. Millischer, V. Sobotka, J. L. Bailleul, and D. Delaunay, "**Behaviour of a Moulded Composite Part: Modelling of Dilatometric Curve (Constant Pressure) or Pressure (Constant Volume) With Temperature and Conversion Degree Gradients**", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 6, pp. 943-954, **May 2007**.
- [115] Y. Nawab, N. Boyard, V. Sobotka, P. Casari, and F. Jacquemin, "**A Device to Measure the Shrinkage and Heat Transfers During the Curing Cycle of**

- Thermoset Composites**", *Advanced Materials Research*, Vol. 326, No. 2011, pp. 19-28, **September 2011**.
- [116] M.Gascons, J.Vives, P. Simacek, S. G. Advani, N.Blanco, and K.S.Matthys, "**Experimental Investigation of Through the Thickness Temperature Gradients in Thick Composites During Infusion Process**", Proceedings of the International Conference on Composite Materials (ICCM 2009), Edinburgh (UK)., Universitat de Girona (Analysis and Advanced Materials for Structural Design) - Brunel University (School of Engineering and Design) - University of Delaware (Center for Composite Materials), **2009**.
- [117] Maxim Integrated, "**DS18S20 - High-Precision 1-Wire Digital Thermometer**", Source: Datasheets Maxime Integrated, Last updated: **February 2011**, Web site: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>, Access Date: February 2013.
- [118] Logic IO, "**Modular 1-Wire Temperature Sensor**", Source: Logic IO files, Last updated: **September 2010**, Web site: <http://www.logicio.com/files/Modular%201-wire%20Temperature%20sensor%20v100.pdf>, Access Date: February 2013.
- [119] Logic IO, "**Technical Manual for the RTCU MX2i Pro/Pro+**", Logic IO, Last updated: **January 2012**, Web site: http://www.logicio.com/files/RTCU%20MX2i%20pro_pro+%20Technical%20Manual%202.10.pdf, Access Date: February 2013.
- [120] J. Bernd, H. Horst, and P. Geiber, "**Handbook of Computer Vision and Applications**," Academic Press, **1999**.
- [121] Several Authors, "**Electromagnetic Spectrum**", Last updated: **March 2013**, Web site: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg, Access Date: March 2013.
- [122] Quest-Innovations, "**Multispectral Camera Systems**", Last updated: **2013**, Web site: <http://www.quest-innovations.com/multispectral-camera-systems.html>, Access Date: January 2013.
- [123] J. Dozier and T. H. Painter, "**Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing of Alpine Snow Properties**", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 32, No. 1, pp. 465-494, **April 2004**.
- [124] Headwall Photonics and Alava Ingenieros, "**Application Note: Remote Sensing - Hyperspectral Imaging**", Web site: <http://www.alava-ing.es/repositorio/737f/pdf/4381/2/application-note---remote-sensing-hyperspectral-imaging.pdf>, Access Date **January 2013**

- [125] Headwall Photonics and Alava Ingenieros, "**Application Note: Food Safety and Quality - Hyperspectral Imaging**", Web site: <http://www.alava-ing.es/repositorio/c665/pdf/4373/2/application-note---food-safety--quality-hyperspectral-imaging.pdf>, Access Date **January 2013**
- [126] Headwall Photonics and Alava Ingenieros, "**Sistema Hyperspec ® Point and Stare**", Last updated: **2013**, Web site: <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/tecnologias-de-la-imagen/camaras-hiperespectrales/sistema-hyperspec-point--stare/>, Access Date: January 2013.
- [127] A. Dexter, L. Chiesa, and C. Xie, "**Using Infrared Thermography to Visualize the Invisible: Investigating Heat Transfer**", *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [128] Gerald C.Holst, "**Common Sense Approach to Thermal Imaging**", JDC Publishing and SPIE Optical Engineering Press, **2000**.
- [129] Snell Group and Fluke, "**Introduction to Thermography Principles**", American Technical Publishers, Inc: **2009**.
- [130] Modest M.F., "**Radiative Heat Transfer**", Mc Graw Hill, **1993**.
- [131] T. Astarita, G. Cardone, and G. M. Carlomagno, "**Infrared Thermography: An Optical Method in Heat Transfer and Fluid Flow Visualisation**", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, No. 3-4, pp. 261-281, **March 2003**.
- [132] Monarchinstrument, "**Table of Total Emissivity**", Last updated: **February 2013**, Web site: <http://www.monarchserver.com/TableofEmissivity.pdf>, Access Date: March 2013.
- [133] G. J. Edwards, A. P. Levick, and Z. Xie, "**Laser Emissivity Free Thermometry (LEFT)**", *Tempmeko, NPL*, Symposia on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, **1996**.
- [134] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, and C. A. Long, "**Heat Flux Measurement Techniques**", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 213, No. 7, pp. 655-677, **July 1999**.
- [135] A. Hornberg, "**Handbook of Machine Vision**", Wiley-VCH, p. 709, **2006**.
- [136] D. Rzeszutarski and B. Wiecek, "**An Integrated Thermal and Visual Camera System for 3D Reconstruction**", *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [137] S. Soldan, "**On Extended Depth of Field to Improve the Quality of Automated Thermographic Measurement in Unknown Environments**",

- International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [138] E. Tomba, P. Facco, M. Roso, M. Modesti, F. Bezzo, and M. Barolo, "**Artificial Vision System for the Automatic Measurement of Interfiber Pore Characteristics and Fiber Diameter Distribution in Nanofiber Assemblies**", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **February 2010**.
- [139] M. Grediac, "**The Use of Full-Field Measurement Methods in Composite Material Characterization: Interest and Limitations**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 7-8, pp. 751-761, **July 2004**.
- [140] N. Montés and F. Sánchez, "**Optimum Distribution Channel for Resin Infusion Processes Using Flow Pattern Distance Spaces**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2009**.
- [141] C. Mersmann and Schmitt R., "**Industrializing Metrology – Machine Vision Integration in Composites Production**", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 511-514, **2011**.
- [142] R. John A. and S. John F., "**Real Time Infrared Thermography Inspection and Control for Automated Composite Material Layup**," Chicago, IL (US) Patent US 7,513,964 B2, **2009**.
- [143] N. Montés and F. Sánchez, "**A New Computational Tool for Liquid Composite Moulding Process Design Based on Configuration Spaces**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 1, pp. 58-77, **2009**.
- [144] N. Montés, F. Sánchez, and U. Pineda, "**Efficient Resin Distribution Channel for the Design of Resin Infusion Processes Using Geometric Methods**", *Advanced Science Letters*, Vol. 19, No. 3, pp. 760-765, **March 2013**.
- [145] LAP Laser, "**Composite Pro: Laser Projection System for the Production of or With Composite Materials**", Web site: <http://www.lap-laser.com/general-industries/products/projection/laser-projectors/composite-pro/>, Access Date **January 2013**
- [146] John Nasr, Scott Kasprzak, Michael Fuqua, and J. Glancey, "**An External Flow Modification System for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding**", *SAMPE 2007*, Baltimore, MD: **July 2007**.
- [147] J. B. Alms, J. L. Glancey, and S. G. Advani, "**Development of Computer Controlled Flow Manipulation for Vacuum Infusion Processes**", Proceedings of the International Conference on Composite Materials (ICCM 2009), Center for Composite Materials: Edinburgh (UK), University of Delaware - Mechanical Engineering, **2009**.

- [148] J. B. Alms, S. G. Advani, and J. L. Glancey, "**Liquid Composite Molding Control Methodologies Using Vacuum Induced Preform Relaxation**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 1, pp. 57-65, **January 2011**.
- [149] N. Montés, F. Sánchez, J. A. García, A. Falco, J. Tornero, and F. Chinesta, "**Application of Artificial Vision in Flow Redirection During Filling of Liquid Composite Molding Processes**", *10th ESAFORM Conference on Material Forming*, AIP Conference Proceedings, Vol. 907, 1 ed., Zaragoza (España): American Institute of Physics, pp. 902-907, **April 2007**.
- [150] L. Domenech, N. Montés, and F. Sánchez, "**Estimation of Local Permeability With Artificial Vision Techniques Using a Direct Method**", *International Conference on Composite Proceedings*, ICCM 18th, Jeju Island (Korea), **August 2011**.
- [151] A. Gokce, M. Chohra, S. G. Advani, and S. M. Walsh, "**Permeability Estimation Algorithm to Simultaneously Characterize the Distribution Media and the Fabric Preform in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process**", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 14, pp. 2129-2139, **November 2005**.
- [152] J. M. Lawrence, V. Neacsu, and S. G. Advani, "**Modeling the Impact of Capillary Pressure and Air Entrapment on Fiber Tow Saturation During Resin Infusion in LCM**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1053-1064, **August 2009**.
- [153] M. Nordlund and T. S. Lundström, "**Investigation of Transient Flow Behaviour in Dual-Scale Porous Media With Micro Particle Image Velocimetry**", *Modelling for Material Processing*, International Scientific Colloquium, Riga (Latvian), **June 2006**.
- [154] A. Aktas, S. W. Boyd, and R. A. Shenoi, "**Measurement of Permeability and Cure Using Thermocouples in the Vacuum Assisted Resin Infusion Process to Aid Simulation**", *European Conference on Composite Materials*, ECCM 15, Venice, Italy, **June 2012**.
- [155] T. Ohara, I. Ueno, S. Ogihara, and K. Watanabe, "**Wetting Behavior Between Fibre and Resin in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)**", *Proceedings of ICCM 17*, Edinburgh: Edinburgh, **2009**.
- [156] Chieu D. Tran, "**Visualising Chemical Composition and Reaction Kinetics by the Near Infrared Multispectral Imaging Technique**", *C. D Tran, J. Near Infrared Spectrosc.*, Vol. 8, No. (2000), pp. 89-102, **2000**.

-
- [157] Vered Scharf and Abrahm Katzir, "**Four-Band Fiber Optic Radiometry for True Temperature Measurements During Exothermal Process**", *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 7, pp. 1502-1506, **January 2002**.
- [158] B. Falk, S. M. Vallinas, and J. V. Crivello, "**Monitoring Photopolymerization Reactions With Optical Pyrometry**", *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, Vol. 41, No. 4, pp. 579-596, **February 2003**.
- [159] H. H. Friis-Pedersen, L. P. Houmoller, and B. K. Storm, "**Online Near-Infrared Measurements of an Epoxy Cure Process Compared to Mathematical Modeling Based on Differential Scanning Calorimetry Measurements**," **2008**, p. NA.
- [160] Thomas J. Walsh, "**Resin Cure Monitor**," Houston, Tex (USA) Patent U.S. Patent 6,099,162, **August 2000**.
- [161] Dean DeVries, "**Design of a Cure Monitoring System for Composite Aircraft Repair Patches**", Thesis M. Sc., *Toronto of University*, Toronto (Ontario - Canadá), **1996**.
- [162] J.-Y. Chen, S. V. Hoa, C.-K. Jen, and H. Wang, "**Fiber-Optic and Ultrasonic Measurements for In-Situ Cure Monitoring of Graphite/Epoxy Composites**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 20, pp. 1860-1881, **October 1999**.
- [163] P. A. Fomitchov, Y. K. Kim, A. K. Kromine, and S. Krishnaswamy, "**Laser Ultrasonic Array System for Real-Time Cure Monitoring of Polymer-Matrix Composites**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 15, pp. 1889-1901, **August 2002**.
- [164] J. P. Dunkers, K. M. Flynn, and R. S. Parnas, "**A Mid-Infrared Attenuated Total Internal Reflection Cure Sensor for Control of Resin Transfer Moulding of a Pre-Ceramic Polymer**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 2, pp. 163-170, **1997**.
- [165] J. H. Williams and R. J. Nagem, "**A Liquid Crystals Kit for Structural Integrity Assesment of Fiberglass Watercraft**", *Materials Evaluation*, Vol. 41, No. 2, pp. 202-210, **1983**.
- [166] Kavec, A., "**Introduction to Liquid Crystal Thermography**", Advanced Thermal Solutions, Inc, Last updated: **January 2002**, Web site: <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt0201b.pdf>, Access Date: January 2013.
- [167] C. Meola, G. M. Carlomagno, and G. L., "**The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization**", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155–156, pp. 1132-1137, **November 2004**.

- [168] Welsh Composite Centre, "**Webinar Microscopy of Composites**", Last updated: **January 2011**, Web site: <http://welshcomposites.co.uk/downloads/Microscopy%20Webinar.pdf>, Access Date: January 2013.
- [169] A. A. Badghaish and D. C. Fleming, "**Non-Destructive Inspection of Composites Using Step Heating Thermography**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 13, pp. 1337-1357, **July 2008**.
- [170] Elliot C.K., "**Keynote NASA Thermographic Inspection of Advanced Composite Materials**", *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2004, **June 2004**.
- [171] M. Mühlstädt, S. Maenz, R. Ramm, P. Kühmstedt, K. D. Jandt, and J. Bossert, "**Laminate Characterization of Fiber-Reinforced Polymer Composites by Micro-Computed Tomography**", *European Conference on Composite Materials*, ECCM 15, Venice (Italy), **June 2012**.
- [172] EDEVIS, "**ShearoVis: Vibrography / Shearography Testing System**", Web site: http://www.edevis.com/en/products_turnkey_systems_shearovis.php, Access Date **January 2013**
- [173] V. Feuillet, N. Dujardin, M. Fois, L. Ibos, C. Polâine, and Y. Candau, "**Pulsed Thermography: ¿A Useful Tool to Determine Porosity in Composite Materials?**", *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [174] A. Mendioroz, A. Salazar, and R. Celorrio, "**Defect Shape and Size Discrimination Using Infrared Vibrothermography**", *International InfraRed Thermography*, QIRT 2012, Naples (Italy), **June 2012**.
- [175] EDEVIS, "**UTvis: Ultrasound Thermography**", Web site: http://www.edevis.com/en/products_turnkey_systems_utvis.php, Access Date **January 2013**
- [176] Carosena Meola, Giovanni Maria Carlomagno, Antonino Squillace, Umberto Prisco, and Renata Erica Morace, "**Analysis of Composites With Infrared Thermography**", *Macromolecular Symposia*, Vol. 228, No. 1, pp. 273-286, **2005**.
- [177] Steven M. Shepard, "**Thermography of Composites**", *Materials Evaluation*, Date published: **June 2007**, Web site: http://www.lot-oriel.com/site/site_down/pt_composites_uken01.pdf, Access Date: January 2010.
- [178] D. P. Almond and W. Peng, "**Thermal Imaging of Composites**", *Journal of Microscopy*, Vol. 201, No. 2, pp. 163-170, **February 2001**.

- [179] S. R. Baughman, "**Applications for Thermal NDT on Advanced Composites in Aerospace Structures**", *Proceedings of SPIE Thermosense XX*, Vol.3361, pp. 311-319, **March 1998**.
- [180] R. J. Ducar, "**Pulsed Thermography Inspection and Application in Commercial Aircraft Repair**", *Proceedings of SPIE Thermosense XXI*, Vol.3700, pp. 77-83, **March 1999**.
- [181] M. Axelsson, "**Estimating 3D Fibre Orientation in Volume Images**", *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, Pattern Recognition, 2008.ICPR 2008.19th International Conference on, pp. 1-4, **December 2008**.
- [182] Hellen Altendorf and Dominique Jeulin, "**3D Directional Mathematical Morphology for Analysis of Fiber Orientations**", *Image Analysis and Stereology*, **2009**.
- [183] T. Pfeifer, S. Rügenapp, and J. Feldhoff, "**Determination of Fibre Orientation in Composites With the Ultrasonic Backscattering Method**", *e-Journal of NDT (e-JNDT)*, Vol. 2, No. 2, **February 2007**.
- [184] X. Gros, "**NDT Data Fusion**", Butterworth-Heinemann, **1996**.
- [185] Deloitte, "**Impact Stratégique Et Économique De L'Industrie Aérospatiale Canadienne - Summary**", AIAC - Association des Industries aérospatiales du Canada, Date published: **October 2010**, Web site: http://www.aiac.ca/uploadedFiles/AIAC_Rapport%20Deloitte%20Sommaire_FINAL.pdf, Date accessed: March 2013.
- [186] R. Tong, S. V. Hoa, and M. Chen, "**Cost Analysis on L-Shape Composite Component Manufacturing**", *International Conference on Composite Materials*, ICCM 18th, Jeju Island (Korea), **August 2011**.
- [187] R. A. Witik, F. Gaille, R. Teuscher, H. Ringwald, V. Michaud, and J. A. Manson, "**Assessing the Economic and Environmental Potential of Out-of-Autoclave Processing**", *18th International Conference on Composite Materials*, ICCM 18th, Jeju Island (Korea), **August 2011**.
- [188] C. Di Fratta, M. Danzi, F. Klunker, M. Zogg, and P. Ermanni, "**Investigation on Hybrid Out-of-Autoclave Prepeg/LCM Process for Integrated Structural Applications**", *European Conference on Composite Materials*, ECCM 15th, Venice (Italy), **June 2012**.
- [189] J. Kay, K. Fahrang, K. Hsiao, and G. Fernlund, "**Effect of Process Conditions on Porosity in Out-of-Autoclave Prepeg Laminates**", *International Conference on Composite Materials*, ICCM 18th, Jeju Island (Korea), **August 2011**.

- [190] M. Brilliant and P. Hubert, "**Modelling and Characterization of Thickness Variations in L-Shape Out-of- Autoclave Laminates**", *International Conference on Composite Materials*, ICCM 18th, Jeju Island (Korea), **August 2011**.
- [191] Gardiner, G., "**¿Out-of-Autoclave Prepregs: Hype or Revolution?**", *High-Performance Composites*, CW Composites World - Gardner Bussines Media, Inc, Date published: **January 2011**, Web site: <http://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-prepregs-hype-or-revolution>, Access Date: January 2013.
- [192] Anne Laurent-Mounier, C.Bienétry, and Patricia Krawczak, "**Multipurpose Carbon Fiber Sensor Design for Analysis and Monitoring of the Resin Transfer Molding of Polymer Composites**", *Polym Compos*, Vol. 26, No. 5, pp. 717-730, **September 2005**.
- [193] G. M. Carlomagno and G. Cardone, "**Infrared Thermography for Convective Heat Transfer Measurements**", *Experiments in Fluids*, Vol. 49, No. 6, pp. 1187-1218, **December 2010**.
- [194] N. Montés, F. Sánchez, and Tornero J., "**Numerical Technique for the Space Discretization of Resin Infusion Mould Sensing With Artificial Vision**", *ESAFORM 11th - International Journal of Material Forming*, Vol.1, 1st ed., Lyon (France), pp. 923-926, **April 2008**.
- [195] Acciona Infraestructuras, Karnic Powerboat Ltd, Synthesites, Atoutville, NTUA, Tecnalía, Newcastle University, Sotira, Biba, and CEMCAT, "**IREMo - Intelligent Reactive Polymer Composites Moulding**", Last updated: **2012**, Web site: <http://www.iremo.eu/document.php?pagendx=68&project=iremo>, Access Date: March 2013.
- [196] Short Brothers PLC, Polyworkx VOF, Kok & Van Engelen Composite Structures BV, Kema Power Generation & Sustainables, Technicka Plastika S.A, National University of Athens, Israel Aircraft Industries Ltd, Isojet Equipments S.A.R.L, Fundación INASMET, and Laser Zentrum Hannover E.V., "**COMPROME Project - Monitoring, Optimisation and Control of Liquid Composite Moulding Processes - 6th Europe Framework Programme**", Last updated: **January 2008**, Web site: http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_RCN=7465825, Access Date: March 2013.
- [197] DOGMA, "**Closed Loop Process Control - The Key to High Quality Products**", Source: DOGMA Project, Last updated: **January 2001**, Web site: <http://www.dogma.org.uk/vtt/process/processindex.htm>, Access Date: December 2012.

-
- [198] ESI-Group, "PAM-FORM", ESI-Group, Last updated: 2013, Web site: <http://www.esi-group.com/products/composites/pam-form/pam-form-for-composites/>, Access Date: January 2013.
- [199] P. Potluri and J. Atkinson, "Automated Manufacture of Composites: Handling, Measurement of Properties and Lay-Up Simulations", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 6, pp. 493-501, 2003.
- [200] R. Schmitt, T. Pfeifer, C. Mersmann, and A. Orth, "A Method for the Automated Positioning and Alignment of Fibre-Reinforced Plastic Structures Based on Machine Vision", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 501-504, 2008.
- [201] Hartley R and Zisserman A, "Multiple View Geometry in Computer Vision", Second Edition ed., Cambridge University Press, 2003.
- [202] Encyclopedia of Smart Materials, "Cure and Health Monitoring", *Encyclopedia of Smart Materials*, July 2002.
- [203] C. Y. Park, J.-H. Kim, and S.-M. Jun, "Korean Aero-Vehicle Structural Health Monitoring System", *International Conference on Composite Materials*, 18th ICCM, Jeju Island (Korea), August 2011.
- [204] Q. Liu, R. S. Parnas, and H. S. Giffard, "New Set-Up for In-Plane Permeability Measurement", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 3, pp. 954-962, March 2007.
- [205] S. G. Advani, M. V. Brusckke, and R. S. Parnas, "Resin Transfer Molding Flow Phenomena in Polymeric Composites", in the *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, S. G. Advani, Ed., Elsevier Science B.V., 1994.
- [206] C. Bienétry and J. Pabiot, "Effects of Fabric Architectural Heterogeneities on Effective and Saturated Permeabilities in RTM", *12th International Conference on Composite Materials*, ICCM-12, Paris, pp. 1-10, 1999.
- [207] T. L. Luce, S. G. Advani, J. G. Howard, and R. S. Parnas, "Permeability Characterization. Part 2: Flow Behavior in Multiple-Layer Preforms", *Polym Compos*, Vol. 16, No. 6, pp. 446-458, 1995.
- [208] R. S. Parnas, J. G. Howard, T. L. Luce, and S. G. Advani, "Permeability Characterization. Part 1: A Proposed Standard Reference Fabric for Permeability", *Polym Compos*, Vol. 16, No. 6, pp. 429-445, 1995.
- [209] P. Ferland, D. Guittard, and F. Trochu, "Concurrent Methods for Permeability Measurement in Resin Transfer Molding", *Polym Compos*, Vol. 17, No. 1, pp. 149-158, 1996.

-
- [210] J. R. Weitzenböck, R. A. Sheno, and P. A. Wilson, "**Measurement of Principal Permeability With the Channel Flow Experiment**", *Polym Compos*, Vol. 20, No. 2, pp. 321-335, **1999**.
- [211] C. Demaria, E. Ruiz, and F. Trochu, "**In-Plane Anisotropic Permeability Characterization of Deformed Woven Fabrics by Unidirectional Injection. Part I: Experimental Results**", *Polym Compos*, Vol. 28, No. 6, pp. 797-811, **2007**.
- [212] C. Demaria, E. Ruiz, and F. Trochu, "**In-Plane Anisotropic Permeability Characterization of Deformed Woven Fabrics by Unidirectional Injection. Part II: Prediction Model and Numerical Simulations**", *Polym Compos*, Vol. 28, No. 6, pp. 812-827, **2007**.
- [213] P. B. Nedanov and S. G. Advani, "**A Method to Determine 3D Permeability of Fibrous Reinforcements**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 2, pp. 241-254, **January 2002**.
- [214] N. Kuentzer, P. Simacek, S. G. Advani, and S. Walsh, "**Permeability Characterization of Dual Scale Fibrous Porous Media**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 11, pp. 2057-2068, **November 2006**.
- [215] N. Montés, F. Sánchez, and N. C. Correia, "**A Simplified Computational Treatment for Non-Isotropic Permeability Flow Models Based on Flow Pattern Configuration Spaces**", *FPCM 2010*, FPCM 2010, **2010**.
- [216] N. Patel and L. James Lee, "**Effects of Fiber Mat Architecture on Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding**", *Polym Compos*, Vol. 16, No. 5, pp. 386-399, **1995**.
- [217] J. Bréard, Henzel Y, F. Trochu, and R. Gauvin, "**Analysis of Dynamic Flows Through Porous Media. Part I: Comparison Between Saturated and Unsaturated Flows in Fibrous Reinforcements**", *Polym Compos*, Vol. 24, No. 3, **June 2003**.
- [218] L. Labat, J. Breard, S. Pillut-Lesavre, and G. Bouquet, "**Void Fraction Prevision in LCM Parts**", *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 16, No. 2, pp. 157-164, **November 2001**.
- [219] N. Patel and L. James Lee, "**Modeling of Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding. Part I: Wettability Analysis**", *Polym Compos*, Vol. 17, No. 1, pp. 96-103, **1996**.
- [220] N. Patel and J. L. L., "**Modeling of Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding. Part II: Model Development and Implementation**", *Polym Compos*, Vol. 17, No. 1, pp. 104-114, **1996**.

- [221] P. Z. Wong, "**Flow in Porous Media: Permeability and Displacement Patterns**", *MRS Bulletin*, pp. 32-38, **1994**.
- [222] J. R. Weitzenböck, R. A. Shenoi, and P. A. Wilson, "**Measurement of Three-Dimensional Permeability**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 159-169, **1998**.
- [223] K. M. Pillai and S. G. Advani, "**Numerical Simulation of Unsaturated Flow in Woven Fiber Preforms During the Resin Transfer Molding Process**", *Polym Compos*, Vol. 19, No. 1, pp. 71-80, **1998**.
- [224] C. D. Williams, S. M. Grove, and J. Summerscales, "**Compressive Response of Fibre Reinforced Plastics Plates During Manufacture by Resin Infusion Under Flexible Tooling Method**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. A29(1/2), pp. 111-114, **1998**.
- [225] H. M. Anderson, T. S. Lundström, and B. R. Gebart, "**Numerical Model for Vacuum Infusion Manufacturing of Polymer Composites**", *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, Vol. 13, No. 3, pp. 94-383, **2003**.
- [226] Acheson J.A., P. Simacek, and S. G. Advani, "**The Implications of Fiber Compaction and Saturation of Fully Coupled VARTM Simulation**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, pp. 69-159, **2004**.
- [227] J. F. A. Kessels, A. S. Jonker, and R. Akkerman, "**Fully 2.5D Flow Modelling of Resin Infusion Under Flexible Tooling Using Unstructured Meshes and Wet and Dry Compaction Properties**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 1, pp. 51-60, **2007**.
- [228] E. Ruiz and F. Trochu, "**Thermomechanical Properties During Cure of Glass-Polyester RTM Composites: Elastic and Viscoelastic Modeling**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, No. 10, pp. 881-916, **May 2005**.
- [229] M. J. Lodeiro and D. R. Mulligan, "**Good Practice Guide to Cure Monitoring**", NPL - National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK, 75, Date published: **February 2005**, Web site: http://publications.npl.co.uk/dbtw-wpd/exec/dbtwpub.dll?&QB0=AND&QF0=ID&QI0=%203907%20&TN=NPLPUBS&RF=WFullRecordDetails&DL=0&RL=0&NP=4&AC=QBE_QUERY, Date accessed: February 2013.
- [230] A. Schulz, "**Infrared Thermography As Applied to Film Cooling of Gas Turbine Components**", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, No. 2000, pp. 948-956, **2000**.

- [231] Debasish Banerjee, Shulei Zhao, and Samuel Schabel, "**Heat Transfer in Thin Porous Fibrous Material: Mathematical Modelling and Experimental Validation Using Active Thermography**", 10 ed 2010.
- [232] A. Atarsia and R. Boukhili, "**Relationship Between Isothermal and Dynamic Cure of Thermosets Via the Isoconversion Representation**", *Polym Eng Sci*, Vol. 40, No. 3, pp. 607-620, 2000.
- [233] M.Ochs, T. Horbach, A. Schulz, R. Koch, and H.-J. Bauer, "**A Novel Calibration Method for an Infrared Thermography System Applied to Heat Transfer Experiments**", *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. (2009) 075103, pp. 1-9, 2009.
- [234] Frank Liebmann, "**Emissivity - The Crux of Accurate Radiometric Measurement**", Fluke Corporation, Last updated: 2006, Web site: http://support.fluke.com/calibration-sales/Download/Asset/9010104_ENG_A_W.PDF.
- [235] C. Meola and G. M. Carlomagno, "**Recent Advances in the Use of Infrared Thermography**", *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, p. R27-R58, 2004.
- [236] Joseph Currano, "**Heat Flux-Based Emissivity Measurement**", *University of Maryland*, 2007.
- [237] C.Villaseñor-Mora, F.J.Sanchez-Marin, and S.Calixto-Carrera, "**An Indirect Skin Emissivity Measurement in the Infrared Thermal Range Through Reflection of a CO₂ Laser Beam**", *Revista Mexicana de Fisica*, Vol. 55, No. 5, pp. 387-392, September 2009.
- [238] L. Kauder, "**Spacecraft Thermal Control Coatings References**", *NASA, Goddard space flight center*, 2005.
- [239] D. A. Jaworske and T. J. Skowronski, "**Portable Infrared Reflectometer for Evaluating Emittance**", *AIP Conference Proceedings*, Vol.504, p. 791, 2000.
- [240] U. Pineda, N. Montés, and F. Sánchez, "**Heat Transfer and Emissivity Behavior Study for Thermoset Resins During Exothermal Process by Means of Infrared Thermography and a Laser Beam**," 2012.
- [241] R. D. Karam, "**Satellite Thermal Control for Systems Engineers**", 181 ed., Aiaa, 1998.
- [242] C. Fuentes, M. Liniers, J. Guasp, J. Doncel, J. Botija, G. Wolfers, J. Alonso, M. Acedo, E. Sanchez, G. Marcon, M. Weber, R. Carrasco, X. Sarasola, B. Zurro, and J. Tera, "**Thermographic Calorimetry of the Neutral Beam Injectors Heating Beams at TJ-II**", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 77, No. 10, pp. 10E519-10E519-3, October 2006.

- [243] NEC, "**Advanced Thermo - TVS500EXZ Manual Rev1.0**," Tokyo, Japan: NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd, **2008**, pp. 1-144.
- [244] J. M. Bullin, "**Convective Heat Transfer and Infrared Thermography (IRTh)**", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 1, pp. 55-62, **2010**.
- [245] S. Aranda, F. Klunker, and G. Ziegmann, "**Compaction Response of Fibre Reinforcements Depending on Processing Temperature**", Proceedings of the International Conference on Composite Materials (ICCM 2009), Clausthal - Zellerfeld (Germany): Edinburgh (UK), Institute of Polymer Materials and Plastics Engineering, Clausthal University of Technology, **2009**.
- [246] R. Seifi and M. Hojjati, "**Heat of Reaction, Cure Kinetics, and Viscosity of Araldite LY-556 Resin**", *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, No. 11, pp. 1027-1039, **June 2005**.
- [247] R. J. Lin, L. James Lee, and L. Ming J., "**Mold Filling and Curing Analysis in Liquid Composite Molding**", *Polym Compos*, Vol. 14, No. 1, pp. 71-81, **1993**.
- [248] J. L. Bailleul, V. Sobotka, D. Delaunay, and Y. Jarny, "**Inverse Algorithm for Optimal Processing of Composite Materials**", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 8, pp. 695-708, **2003**.
- [249] C. L. Tucker III, "**Heat Transfer and Reaction Issues in Liquid Composite Molding**", *Polym Compos*, Vol. 17, No. 1, pp. 60-72, **1996**.
- [250] D. R. Mulligan, "**Cure Monitoring for Composites and Adhesives**", 8 ed., Rapra Review Reports, **2003**.
- [251] A. Yousefi, P.G.Lafleur, and R.Gauvin, "**Kinetic Studies of Thermoset Cure Reactions: A Review**", *Polym Compos*, Vol. 18, No. 2, pp. 157-168, **1997**.
- [252] E. Ruiz and C. Billotte, "**Predicting the Cure of Thermosetting Polymers: The Isoconversion Map**", *Polym Compos*, Vol. 30, No. 10, pp. 1450-1457, **2009**.
- [253] Markus Henne, Christian Breyer, Michael Niedermeier, and Paolo Ermanni, "**A New Kinetic and Viscosity Model for Liquid Composite Molding Simulations in an Industrial Environment**", *Polym Compos*, Vol. 25, No. 3, pp. 255-269, **2004**.
- [254] Veronica M.A.Calado and Suresh G Advani, "**Processing of Composites**", in the *2. Thermoset Resin Cure Kinetics and Rheology*, R.S Davé and A.C.Loos, Eds., Munich, Hanser Publishers, pp. 33-107, **1999**.
- [255] Jing Li, "**Modelling, Design and Control of Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) for Thickness Variation Reduction.**", *The Florida State University - College of Engineering - Department of Industrial and Manufacturing Engineering*, **2006**.

