ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (<u>www.tesisenxarxa.net</u>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (<u>www.tesisenred.net</u>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (<u>www.tesisenxarxa.net</u>) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author





Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria

Evaluación del daño por impacto en laminados de material compuesto mediante la respuesta dinámica

Tesis Doctoral

Marco Antonio Pérez Martínez

Directores:

Dr. Lluís Gil Espert Dr. Sergio H. Oller Martínez

Terrassa, Noviembre de 2011

6

Tolerancia de los laminados al daño por impacto

6.1. Introducción

La tolerancia al daño de un componente estructural dependerá de la capacidad para desempeñar la función para la cual ha sido diseñado, hallándose sometido a un estado de carga en un entorno representativo de sus condiciones de servicio y en presencia de defectos que inducen un debilitamiento, sin sufrir una reducción excesiva de la rigidez y de la resistencia residual durante un período de servicio determinado [5, 8, 19].

Está demostrado que el estado de degradación inducido por un impacto a baja velocidad repercute de manera diferente en las propiedades residuales tales como la resistencia a compresión, a tracción, a cortadura y a flexión, siendo la primera de ellas la que merece una especial atención [4, 9, 10]. De entre los modos de fallo inducidos, el daño interlaminar es considerado el principal modo de fallo que compromete la capacidad de carga residual, llegando a provocar, como se demostrará, un colapso prematuro durante un estado de carga compresiva. La deslaminación supone una subdivisión local del laminado en dos o varios sublaminados que pueden actuar independientemente, viéndose significativamente afectadas la rigidez y la resistencia residual debido al pandeo de la región deslaminada y al crecimiento de la fisura según el modo I de fractura [7, 11, 17].

En el presente capítulo se exponen la metodología y el procedimiento utilizados para la evaluación experimental de la tolerancia al daño por impacto en laminados de material compuesto. En primer lugar se describe el protocolo del ensayo de compresión después de impacto que se ha empleado para determinar la rigidez y la resistencia resi-

Capítulo 6 | TOLERANCIA DE LOS LAMINADOS AL DAÑO POR IMPACTO

duales a compresión de laminados degradados, entre los que se incluyen la degradación real inducida por un impacto y la degradación artificial. Seguidamente se representan los resultados obtenidos en la evaluación experimental de las propiedades residuales longitudinales, relacionándose con aspectos como: el umbral de deslaminación, la extensión del daño o la energía disipada en el impacto. A continuación se exponen los resultados de la evaluación de la rigidez transversal estimada a partir del ensayo de carga cuasi-estática y se presenta una comparativa entre los efectos derivados de un daño real y de un daño artificial. Finalmente se discute acerca de la relación entre las propiedades estáticas y dinámicas residuales, a fin de evaluar la capacidad de las técnicas de vibración para la estimación del rendimiento residual de los laminados.

6.2. Evaluación experimental

La metodología y el procedimiento utilizados para la evaluación experimental se centran esencialmente en el análisis, para un rango de energías incidentes, del denominado factor de retención de resistencia, definido como el ratio entre la resistencia residual de un espécimen impactado respecto la resistencia de un espécimen intacto [1, 16]. En particular se aborda el estudio de la rigidez y la resistencia residuales a compresión y transversal, dada su relevancia y significación en relación a la capacidad resistente del laminado degradado y al vínculo con las propiedades dinámicas estimadas en el capítulo anterior.

6.2.1. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión después de impacto consiste en la aplicación de una carga a compresión en el plano del laminado hasta alcanzar el colapso. La campaña de ensayos se ha planteado en base a un protocolo estandarizado, habiéndose diseñado el dispositivo de ensayo siguiendo las directrices descritas en la norma ASTM D7137 [3]. Las desviaciones respecto del ensayo estándar han sido documentadas y justificadas.

El dispositivo de ensayo, esquematizado en la figura 6.1, consiste en un soporte de fijación fabricado en acero en el interior del cual se instala el espécimen verticalmente. El dispositivo está constituido por múltiples piezas ensambladas y unidas mediante tornillos de acero de alta resistencia. El par de apriete puede condicionar la validez del ensayo, por ello debe garantizarse un par uniforme y suficiente que evite el desajuste del soporte durante el ensayo. En la norma se especifica un par de apriete de 7 Nm, un valor que ha demostrado ser insuficiente, por lo que se ha optado por aplicar un par uniforme de 20 Nm.

En la figura 6.2 se ilustran las hipotéticas condiciones de contorno de la muestra durante el ensayo. El soporte está dotado de dos guías laterales, verticales y coplanares que impiden el pandeo global de la muestra. La superficie de contacto entre la muestra y las guías presenta una holgura inferior a los 0,05 mm, permitiendo el necesario deslizamiento vertical y horizontal del espécimen. Los soportes superior e inferior no suponen un empotramiento total de la muestra, pero restringen la rotación local.



La validez del resultado en la estimación de la rigidez y de la resistencia residual tras alcanzar el colapso, dependerá del tipo de modo de fallo observado. En la norma se especifican varios modos de fallo inaceptables, inducidos o relacionados con la influencia del dispositivo de fijación en general, con las condiciones de soporte en las caras de la muestra o con la inestabilidad del espécimen. La clave del éxito del ensayo consiste en imponer una perfecta alineación de la muestra y del sistema para impedir los efectos de las cargas excéntricas que pueden inducir una flexión e invalidar el resultado [14]. A pesar de que se declara como opcional, el uso de galgas extensométricas permite detectar un estado indeseado de pandeo. Para ello deben adquirirse simultá-

Capítulo 6 | TOLERANCIA DE LOS LAMINADOS AL DAÑO POR IMPACTO

neamente medidas de las deformaciones en cuatro localizaciones en la superficie de la muestra, dos en cada cara en posiciones enfrentadas. Del cómputo entre cada pareja de galgas enfrentadas puede determinarse el porcentaje de flexión B_z como

$$B_z = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_r}{\varepsilon_a + \varepsilon_r} \times 100, \tag{6.1}$$

donde ε_a y ε_r denotan la deformación local en el anverso y el reverso de la placa, respectivamente. El signo de B_z es un indicador de la dirección en la que sucede la flexión. Una rápida divergencia en las lecturas de la deformación en las caras opuestas del espécimen o un incremento anómalo en el valor del porcentaje de flexión B_z , es un indicador de la iniciación de la inestabilidad del laminado. Bajo esta premisa, se impone la condición de que el porcentaje de flexión debe ser inferior al 10%, especialmente en los instantes previos al colapso [3].

Antes de iniciarse el ensayo, se ha aplicado un estado de precarga inicial de 450 N para verificar el contacto entre todas las superficies y el alineamiento global del sistema, y una segunda etapa a 150 N en la que se taran los indicadores de la instrumentación, a partir de la cual se inicia la etapa final utilizando un actuador hidráulico¹ con un control por desplazamiento y una tasa de carga de 1,25 mm min⁻¹ hasta alcanzar la rotura. Durante el ensayo se adquieren² datos de la fuerza aplicada, del desplazamiento local del sistema y de la lectura de la extensometría, con una tasa de muestreo de 500 Hz, frecuencia suficiente para capturar variaciones abruptas.

La calidad en la fabricación y la preparación de las muestras es un aspecto fundamental para garantizar el éxito del ensayo. Muestras con espesores no uniformes dificultan, e incluso imposibilitan la evaluación de la capacidad residual. Las dimensiones y el acabado de las caras han demostrado ser detalles igualmente primordiales. En la norma se especifica una separación entre el soporte superior y la guías que permite una deformación máxima a compresión del 3,3 %; tolerancias no admisibles en la dimensión longitudinal pueden imposibilitar el alcance del colapso. Por estos motivos, no todos los laminados fabricados son aptos para el ensayo. De las 48 muestras iniciales, intactas y previamente impactadas en un intervalo de energías incidentes de entre 6,6 y 70 J, se han seleccionado 34 para el ensayo de compresión y el resto se reservan para el ensayo de la evaluación de la rigidez transversal en el cual los defectos arriba mencionados tienen una menor significancia. En ambos casos se ha procurado cubrir el espectro completo de energías incidentes. Asimismo, los especímenes fabricados con deslaminaciones inducidas artificialmente, han sido examinados en igual número en el ensayo de compresión y el ensayo de carga cuasi-estática. En relación al ensayo de compresión, no todas las muestras se han instrumentado con el mismo número de galgas: en 24 de ellas se han instalado 4 galgas³ correspondientes a las posiciones establecidas en la norma y una quinta instalada en la cercanía del punto de impacto para medir el estado de deformaciones en la superfície de la región degradada (véase figura 6.2). El resto de especímenes dispone únicamente de esta última galga.

¹Actuador hidráulico MTS 244.31 con una capacidad de carga de 250 kN.

²Sistema de adquisición HBM MGCplus.

 $^{^3\}mathrm{Galgas}$ HBM 1-LY41-6/350 adheridas con epoxy para garantizar un comportamiento óptimo.

6.2.1.1. Daño inducido por impacto

La secuencia de imágenes obtenidas mediante la cámara de alta velocidad⁴ permiten visualizar los detalles del colapso del laminado degradado. La frecuencia nominal de grabación es de 2000 Hz (1968 Hz reales), lo que representa una resolución temporal de 505 μ s por fotograma. En la figura 6.3 se muestran dos fotogramas consecutivos de la secuencia de grabación del ensayo de compresión sobre la muestra 45/09L4 previamente impactada a 15 J. El fotograma de la izquierda corresponde al instante previo al colapso, en el que se estima que el laminado se halla en un estado de tensión cercano a los 345 MPa con una deformación media de -8320 $\mu\varepsilon$. El fotograma de la derecha corresponde al instante preciso del colapso, en el que se observa la propagación horizontal del daño inducido.



Figura 6.3: Fotogramas consecutivos de la secuencia de grabación del ensayo de compresión sobre la muestra 45/09L4 impactada a 15 J. El colapso del laminado sucede en un intervalo inferior a los 505 μ s.

Los resultados de la lectura de las galgas extensométricas del mismo espécimen se recogen en el gráfico de la figura 6.4, en el que se representan en valor absoluto las deformaciones determinadas en cada una de las cinco localizaciones versus la tensión aplicada. Omitiendo el estado inicial de asentamiento del sistema, los resultados exhiben un excelente comportamiento lineal hasta instantes antes de alcanzar el colapso, momento en el cual se aprecia una mínima divergencia en la lectura entre las parejas de galgas situadas a la izquierda y a la derecha del eje de simetría (galgas nº 1-2 y nº 3-4 respectivamente) y la galga nº 5 situada en las proximidades del punto de impacto. Asimismo, se han graficado los porcentajes de flexión a la izquierda B_z^L y a la derecha B_z^R del eje de simetría, en función de la tensión aplicada. Como se observa, exceptuando el tramo inicial, las variaciones son mínimas e inferiores al 10% estipulado en la norma, lo que garantiza el correcto alineamiento de la muestra y del

⁴Cámara de alta velocidad MotionBLITZ Cube4.



Figura 6.4: Curvas de deformación versus tensión y del porcentaje de flexión versus tensión obtenidas en el ensayo de compresión después de impacto del laminado 45/09L4. Las deformaciones se representan en valor absoluto.

sistema, y la validez del resultado para esta muestra en particular. En especímenes con un mayor índice de daño inducido el comportamiento observado es igualmente lineal, pero las lecturas de las galgas divergen notablemente antes de alcanzar el colapso, aunque los porcentajes de flexión permanecen por debajo del límite admisible. No obstante, como se detalla a continuación, también se han examinado especímenes en los que se ha identificado una rotura por inestabilidad, en cuyo caso los resultados se declaran inválidos.

En la figura 6.5 se ilustran las secciones transversales de varios laminados tras ser sometidos a una carga compresiva hasta alcanzar el colapso. Las tres primeras secciones (de izquierda a derecha) corresponden a laminados impactados a energías de 15, 25 y 65 J, respectivamente. El impacto provocó una deformación que indujo un cambio local de la curvatura de las fibras. En un estado de carga compresiva dichas desalineaciones y ondulaciones contribuyen a la iniciación del fallo por pandeo local en el centro de la muestra, que da lugar a la formación de las denominadas bandas de pliegue angulares o bandas kink observadas en la imagen [5, 12]. Las cuatro secciones transversales restantes, correspondientes a laminados intactos e impactados según se detalla en el pie de la figura, representan ejemplos claramente ilustrativos de modos de fallo inaceptables provocados por la influencia de las condiciones de soporte y/o con la inestabilidad del espécimen [15, 18].

En la figura 6.6 se han representado los resultados de la estimación de la resistencia residual a compresión y de la deformación de rotura *versus* la energía disipada en el impacto. Los puntos del gráfico representan el valor medio y la barra interválica es la desviación estándar para cada una de las energías. Los valores sin barra interválica se deben a que se dispone de datos de un único laminado. Omitiendo la región sombreada, los resultados evidencian una drástica pérdida de resistencia y de deformación máxima a partir de los 5,4 J de energía disipada, correspondientes a un impacto de



Figura 6.5: Secciones transversales de varios laminados tras el ensayo de compresión después impacto. Relación de muestra y energía de impacto: (a) 45/09L4 - 15 J, (b) 39/03L4 - 25 J, (c) 18/06L2 - 65 J, (d) 48/12L4 - 6,6 J, (e) 20/08L2 - 20 J, (f) 46/10L4 - 0 J y (g) 42/06L4 - 0 J.

10 J de energía incidente. Estos resultados coinciden satisfactoriamente con el umbral de daño determinado a partir de las imágenes de la inspección ultrasónica expuestas en el capítulo 4, en el que se estimó que el umbral daño interlaminar se situaba en el intervalo 10 - 15 J de energía incidente, que se corresponde con el intervalo de 5,4 - 8,3 J de energía disipada. En general, en ambas curvas se observa un comportamiento exponencial decreciente en función de la severidad del impacto, con una tendencia asintótica al aproximarse al umbral de penetración del laminado. Un detalle significativo que se desprende de la observación de los datos representados en la figura 6.6, es que en el nivel de energía correspondiente al umbral de visibilidad -definido éste como la energía necesaria para provocar una indentación permanente de profundidad 0,3 mm- la deformación y la resistencia residual exhiben una reducción respecto del valor máximo de aproximadamente el 30 %, mientras que para los niveles de energía máxima las reducciones son cercanas al 50 %.

Con el objeto de obtener la resistencia y deformación máxima de referencia, se han ensayado igualmente especímenes intactos. Sin embargo, en todos los laminados examinados se han obtenido modos de fallo no deseables tales como el aplastamiento en el extremo representado en la figura 6.5, por lo que el valor estimado de la resistencia prístina es discutible. La región sombreada de la gráfica de la figura 6.6 representa esta cuestión. Este hecho deriva en un impedimento para el cálculo del factor de retención de resistencia, definido como el ratio entre la resistencia residual de un espécimen impactado respecto la resistencia de un espécimen intacto. No obstante, puede considerarse el valor de resistencia máximo obtenido como una aproximación del valor de resistencia prístina, pues para esta energía en particular la inspección ultrasónica no evidencia daño interno alguno. En cualquier caso, el cálculo y representación del factor de retención supone un reescalado en ordenadas del gráfico anterior.



Figura 6.6: Curvas de la estimación experimental de la resistencia residual a compresión y de la deformación de rotura *versus* la energía disipada en el impacto. La región sombreada denota el intervalo de resultados no admitidos. La deformación se representa en valor absoluto.

Otra cuestión relevante es la comparativa de la resistencia de referencia estimada con las predicciones a partir de criterios analíticos como el criterio de Tsai-Wu o el criterio de Hashin [13, 20]. Sin embargo, los resultados exhiben un alto grado de disparidad con diferencias de hasta el 68% dependiendo del criterio utilizado, entre otros motivos, por el grado de incertidumbre en relación a las propiedades de la resistencia de los materiales constituyentes y por las condiciones particulares del ensayo en el que la resistencia a compresión en el plano se evalúa a partir de la resistencia al pandeo del laminado.

El daño inducido por el impacto también tiene un efecto significativo en la degradación de la rigidez en el plano del laminado. Para la estimación de los módulos elásticos residuales de compresión, se han determinado las tensiones y deformaciones medias experimentadas por el laminado en dos niveles de deformación especificados en la norma, 1000 y 3000 $\mu\varepsilon$, en cuyo intervalo se ha observado un comportamiento altamente lineal. En el gráfico de la figura 6.7 se hallan representados los valores de los módulos efectivos estimados versus la energía disipada. A diferencia del caso anterior, los resultados de los dos niveles de energía inferior se han considerado aptos dado que el intervalo de la curva tensión-deformación analizado está alejado del punto de rotura. Véase en el gráfico cómo la rigidez para el tercer nivel de energía se asemeja a las rigideces de los laminados intactos, por lo que es razonable considerar este nivel de energía como subcrítico. Asimismo, los valores de rigidez en el plano obtenidos para los laminados intactos muestran una correlación significativa con la estimación analítica del módulo de rigidez longitudinal (42,86 GPa) a partir de las propiedades micromecánicas de los materiales constituyentes y de la configuración del laminado, resultados recogidos en la tabla 3.2 del capítulo 3. A pesar de la dispersión de los resultados, se aprecia una significativa degradación de la rigidez en el plano, análoga a la degradación de la resistencia residual en lo que respecta al umbral, y con una variación máxima del módulo efectivo del 11 %.



Figura 6.7: Curva experimental de la degradación del módulo efectivo de rigidez en el plano versus la energía disipada en el impacto.

6.2.1.2. Daño inducido artificialmente

Análogamente a lo expuesto en el capítulo anterior, se pretende ahora analizar el efecto de daños inducidos artificialmente en la rigidez y la resistencia a compresión de laminados de material compuesto, con el objeto de evaluar el grado de adecuación de dicha aproximación para emular experimentalmente las consecuencias del daño real inducido por un impacto. Para ello se utilizan los especímenes fabricados con una deslaminación artificial de geometría circular de diámetros de 10, 20, 30, 40, 50 y 70 mm, tal y como se detalla en la tabla 4.3 del capítulo 4. De entre los 24 laminados disponibles, se han ensayado aquellos con la deslaminación ubicada en la capa nº 10 ó nº 20. Los laminados han sido instrumentados con una única galga extensométrica en la misma posición que la quinta galga de las muestras anteriores.

En la figura 6.8 se muestran dos fotogramas consecutivos de la secuencia de grabación del ensayo de compresión sobre la muestra 66/06L6 que contiene una deslaminación de 50 mm de diámetro ubicada en la capa nº 10. El fotograma de la izquierda corresponde al instante previo al colapso, en el que es posible distinguir el área que ocupa la deslaminación. En este instante se estima que el laminado se halla en un estado de tensión cercano a los 340 MPa con una deformación media de -8880 $\mu\varepsilon$. El fotograma de la derecha corresponde al instante preciso del colapso, en el que se observa la propagación diagonal del daño en la zona central de la muestra. En la figura 6.9 se ilustran las secciones transversales de tres laminados con deslaminación artificial según se detalla en el pie de la figura, tras ser sometidos a una carga compresiva hasta alcanzar el colapso. De la observación de ambas figuras, se advierte un comportamiento disímil respecto del de los laminados con daño real. En la sección transversal se distinguen igualmente las bandas de pliegue angulares en la superficie de la región degradada, pero su distribución no es simétrica respecto del plano medio del laminado. Además, la propagación del daño interlaminar es manifiestamente visi-

Capítulo 6 | TOLERANCIA DE LOS LAMINADOS AL DAÑO POR IMPACTO

ble, siendo posible incluso discernir fehacientemente la capa donde se ubica el defecto. Asimismo se ha observado una relación entre la morfología del fallo y el tamaño del defecto. Si bien los resultados demuestran cualitativamente que la inducción artificial de la deslaminación tiene cierta influencia en el comportamiento a compresión, se requiere un análisis cuantitativo para evaluar dichos efectos y poder compararlos con los efectos derivados del daño real.



Figura 6.8: Fotogramas consecutivos de la secuencia de grabación del ensayo de compresión sobre la muestra 66/06L6/D50E10. El colapso del laminado sucede en un intervalo inferior a los 505 μ s.



Figura 6.9: Secciones transversales de los laminados con deslaminación artificial (a) 66/06L6/D50E10, (b) 68/08L6/D50E20 y (c) 72/12L6/D70E20 tras el ensayo de compresión. La rotura del espécimen (c) se asocia al segundo modo de pandeo. En el procedimiento seguido para la evaluación de la tolerancia al daño por impacto se han relacionado parámetros del ensayo de impacto, como la energía incidente o la energía disipada, con propiedades residuales estimadas en el ensayo de compresión anterior. Este hecho impide determinar si el comportamiento residual del laminado está controlado por su capacidad resistente al daño por impacto o bien por la resistencia a la propagación del daño durante la compresión. Un objetivo específico del análisis del efecto del daño inducido artificialmente es precisamente desacoplar ambas capacidades resistentes. Para ello, se parte de la hipótesis inicial de que la tolerancia al daño, en particular la rigidez y la capacidad resistente residual, guardan una relación con el área deslaminada.

Varios estudios han revelado que la deslaminación se propaga en la dirección transversal a la dirección de aplicación de la carga [7, 17], un detalle corroborado por la secuencia de imágenes a alta velocidad. Por este motivo consideran el uso de la dimensión anchura de la deslaminación como un parámetro representativo para la comparativa de la resistencia a la propagación interlaminar de dos laminados, independientemente de la capacidad resistente al impacto.

En la figura 6.10 se han representado superpuestos los resultados de la estimación de la resistencia residual a compresión y de la deformación de rotura versus la anchura de la deslaminación inducida por el impacto ó artificialmente⁵. Análogamente al gráfico de la figura 6.6, la región sombreada abarca el intervalo en el que se han obtenido modos de fallo no deseables. En el caso anterior la región comprendía aquellos laminados con un daño interno nulo, sin embargo en este caso el intervalo se extiende a los laminados con una deslaminación artificial de 10 mm de diámetro. En relación a los laminados que contienen el daño real, los resultados muestran una nube de puntos con una tendencia lineal decreciente que evidencia la reducción de la resistencia y de deformación máxima a partir del umbral daño interlaminar. Contrariamente, los resultados obtenidos de los ensayos de los especímenes con deslaminación artificial exhiben una leve degradación a medida que se incrementa el tamaño del área debilitada. Un aspecto relevante es el efecto de la ubicación de la deslaminación artificial. De cada pareja de puntos representados para una misma área, en todos los ensavos la resistencia y deformación máxima de los laminados con el defecto insertado en la capa nº 20 exhiben una mayor degradación que las de aquellas muestras con el defecto en la capa nº 10.

Tras la exposición de los resultados, es dable concluir que la aproximación a partir de la inserción de una deslaminación artificial de tamaño variable para emular experimentalmente las consecuencias del daño real inducido por un impacto, no consigue reproducir el comportamiento real residual del laminado con el grado de satisfacción deseable. La divergencia en el comportamiento se atribuye a aspectos como la consideración de la unicidad de la deslaminación, a la desestimación del efecto de la curvatura de las fibras en la iniciación del fallo por inestabilidad local y, sobretodo, a la omisión de la influencia de la rotura de las fibras presente en los impactos más severos.

 $^{^5 {\}rm En}$ ambos casos la caracterización del defecto se ha obtenido mediante la técnica de inspección ultrasónica cuyos detalles y resultados se exponen en el capítulo 4.



Figura 6.10: Diagrama de dispersión de la estimación experimental de la resistencia residual a compresión y de la deformación de rotura *versus* la anchura de la deslaminación inducida por el impacto ó artificialmente. La región sombreada denota el intervalo de resultados no admitidos. La deformación se representa en valor absoluto.

6.2.2. Ensayo de carga cuasi-estática

El ensayo de carga cuasi-estática, como se expuesto en el capítulo 4, consiste en la aplicación de una carga puntual transversal, perpendicular y centrada en la superficie del laminado, hasta alcanzar la rotura o un nivel de carga máxima [6]. En la campaña de ensayos se ha utilizado el mismo dispositivo utilizado en la evaluación de la resistencia a impacto descrito en la norma ASTM D7136 [2], aplicando la carga con un actuador hidráulico⁶ con control por desplazamiento y una tasa de carga de 1,25 mm min⁻¹ hasta alcanzar la rotura. Durante el ensayo se adquieren datos de la fuerza aplicada y del desplazamiento local del sistema con una tasa de muestreo de 100 Hz, frecuencia suficiente para capturar variaciones abruptas.

Con el ensayo de carga cuasi-estática se pretende evaluar el efecto del daño inducido en la rigidez residual transversal de los laminados. Para ello se han analizado un total de 14 muestras, dos de ellas intactas y el resto impactadas en un intervalo de energías incidentes de entre 6,6 y 70 J. Asimismo se han ensayado 12 especímenes con deslaminaciones artificiales de varios tamaños ubicadas en la capa n^o 5 ó n^o 15.

 $^{^{6}\}mathrm{Actuador}$ hidráulico MTS 244.21 con una capacidad de carga de 50 kN.

6.2.2.1. Daño inducido por impacto

En la figura 6.11 se representan las curvas de fuerza *versus* desplazamiento de los laminados con daño real ensayados. En el gráfico se aprecia un variación significativa en la pendiente de las curvas en función de la energía disipada en el evento impacto. En las curvas pertenecientes a los laminados intactos o con un menor estado de degradación, se identifican descensos abruptos del nivel de carga, el primero de ellos relacionado con el umbral de fallo interlaminar anteriormente discutido y el último denota el nivel de carga última de rotura. Contrariamente, la ausencia de variaciones abruptas es evidente en aquellos laminados que han sido impactados a un nivel de energía por encima del umbral del daño interlaminar.



Figura 6.11: Curvas de fuerza *versus* desplazamiento de los ensayos de carga cuasi-estática transversal en laminados con daño inducido por impacto, para cada nivel de energía disipada.

Para la cuantificación del estado de degradación de los laminados se ha estimado, a partir de la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento entre un 20 % y un 50 % del valor de carga crítica o máxima, la rigidez residual transversal k de cada laminado, procurando acotar el intervalo al comportamiento lineal en cada caso. Los resultados se recogen graficados en la figura 6.12, demostrando que existe una relación entre la energía disipada en el evento impacto y la degradación de la rigidez transversal. La dispersión de los resultados en el primer segmento que abarca los laminados intactos es atribuible a la no homogeneidad de espesores entre las muestras examinadas. Nótese cómo la degradación más drástica se inicia a partir del umbral de visibilidad, definido en términos de la profundidad de la indentación. El gráfico presenta singularidades análogas a los resultados en el capítulo 4 y en concordancia con las conclusiones de la inspección visual en la que se identificó una notable presencia de fisuras en el reverso de las muestras a partir de los 30 J de energía incidente (16,8 J de energía disipada).



Figura 6.12: Resultados de la estimación de la rigidez residual transversal k en los ensayos de carga cuasi-estática *versus* la energía disipada en el impacto.

6.2.2.2. Daño inducido artificialmente

Análogamente al apartado anterior, se pretende ahora analizar el efecto del daño inducido artificialmente en la rigidez transversal y comparar los resultados con las consecuencias del daño real inducido por un impacto. Para ello se han utilizado especímenes fabricados con el defecto artificial ubicado en la capa nº 5 ó nº 15, contabilizadas desde la superficie de la cara opuesta a la aplicación de la carga.

En la figura 6.13 se han representado superpuestos los resultados de la estimación de la rigidez residual transversal *versus* el área de la deslaminación inducida por el impacto ó artificialmente. Los laminados que contienen el daño real exhiben una más que significativa reducción de la rigidez a medida que se incrementa el área deslaminada. La tendencia no lineal se acentúa a partir de un área inducida de aproximadamente 750 mm², correspondiente a un impacto de 30 J. Contrariamente, el análisis de los especímenes con deslaminación artificial muestra un comportamiento claramente diferenciado con el incremento del área debilitada, si bien, en este caso, sí que se aprecian similitudes en el primer segmento para áreas del defecto inferiores a los 1000 mm². Nuevamente se destaca la influencia de la profundidad del defecto artificial, siendo ahora mayor la degradación para aquellas muestras con la deslaminación más alejada del plano medio o eje neutro, como puede deducirse a partir del diagrama de tensiones a través del espesor del laminado sometido a un estado de flexión pura.

Como ocurría en el caso anterior, la inserción de la deslaminación artificial no permite reproducir los efectos reales de la degradación de la rigidez transversal en el intervalo completo de energías de impacto. No obstante, estos resultados subrayan la importancia en la consideración de la rotura de fibras para reproducir el comportamiento degradado, pues la mayor divergencia en el comportamiento se presenta a partir del umbral de fallo en las fibras.



Figura 6.13: Resultados de la estimación experimental de la resistencia residual transversal versus el área de la deslaminación inducida por impacto o artificialmente.

6.3. Propiedades estáticas y dinámicas residuales

En la técnica de vibración para la monitorización de la salud estructural, se estipulan cuatro niveles de identificación: la detección, que consiste esencialmente en determinar la presencia del daño, la localización geométrica, la cuantificación de la severidad y finalmente la predicción de las propiedades residuales. A pesar de la especial relevancia e interés que suscita el último nivel, son el primero y el segundo los que reciben una mayor atención por parte de la comunidad científica. En el contexto de esta tesis, los tres primeros niveles se han examinado en el capítulo anterior, diferenciándose el grado de sensibilidad de los diferentes criterios. Los resultados expuestos en el presente capítulo, permiten finalmente establecer vínculos entre las propiedades estáticas y dinámicas residuales, con el fin de evaluar la viabilidad del uso de las técnicas basadas en la respuesta dinámica, como herramienta de predicción de la capacidad residual de los laminados examinados.

En el gráfico de la figura 6.14 se han representado los resultados de la estimación de la resistencia residual a compresión de los laminados impactados, junto con los coeficientes del criterio de correlación modal PrMAC, ambos versus la energía disipada en el impacto. Asimismo, se han esquematizado los ámbitos de identificación del daño inducido de cada uno de los criterios expuestos, entre los que se incluyen el CoMAC, el WECoMAC, la variación frecuencial Δf , el factor de daño en la curvatura $D\kappa$ y el PrMAC, y se señala el umbral estimado del daño interlaminar. El gráfico constituye una evidencia experimental del grado de sensibilidad y adecuación de los criterios de correlación basados en la respuesta dinámica, en relación a la capacidad resistente residual de los laminados examinados. El criterio modificado de correlación espacial WECoMAC mejora significativamente el umbral de detección respecto del criterio CoMAC y destaca, sobretodo, la importancia de la ponderación frecuencial para evi-

Capítulo 6 | TOLERANCIA DE LOS LAMINADOS AL DAÑO POR IMPACTO



Figura 6.14: Resultados de la estimación de la resistencia residual a compresión de los laminados impactados y de los coeficientes del criterio PrMAC versus la energía disipada. Las regiones sombreadas delimitan el intervalo de identificación de cada criterio.

tar los problemas de enmascaramiento descritos que relegan el criterio CoMAC a la identificación exclusiva de los daños más severos. La detección a partir de la variación frecuencial exige niveles de degradación considerables, como ya advierten otros autores, constatando nuevamente la baja sensibilidad de este parámetro. Por otro lado, el factor de daño en la curvatura $D\kappa$ se muestra como el más propicio para la localización, aún cuando el daño se sitúa por debajo del umbral de visibilidad definido. No obstante, cuando éste se manifiesta, la resistencia residual exhibe una reducción respecto del valor máximo cercano al 32%. Finalmente, se demuestra que el PrMAC es el más sensible de los criterios utilizados, estableciendo un umbral de detección cercano al umbral de daño interlaminar. Sin embargo, análogamente al caso anterior, éste se manifiesta ante una pérdida de resistencia del 27%.

6.4. Conclusiones

La metodología expuesta para la evaluación experimental de la tolerancia al daño en laminados de material compuesto, consiste en la estimación de las resistencias y rigideces residuales a compresión y transversales de laminados degradados que contienen un daño inducido por un impacto a baja velocidad. En general, se ha presentado una evidencia experimental de la susceptibilidad al daño por impacto y en particular de cómo éste compromete la capacidad de carga residual provocando un colapso prematuro de los laminados.

A pesar de que se ha empleado un dispositivo y un protocolo de ensayo estandarizado para la aplicación de la carga compresiva, la voluntad de idealizar las condiciones de contorno del espécimen, implica que alcanzar un resultado válido se convierta en una ardua tarea, principalmente por los problemas derivados de la alineación de las muestras. El uso de las galgas extensométricas, aunque se declara como opcional en la normativa, es prácticamente indispensable para detectar la indeseada inestabilidad del laminado. Asimismo, aunque el test puede ser utilizado para examinar especímenes intactos, éstos han demostrado una incidencia relativamente alta de los modos de fallo no deseables que invalidan los resultados, entorpeciendo la estimación de una resistencia de referencia. Por otro lado, el coste económico de los ensayos de compresión después de impacto es significativo: las dimensiones de las muestras vienen impuestas por los requerimientos del ensayo y muy especialmente el espesor, el cual demanda una gran cantidad de material, instando además el uso de actuadores de alta capacidad para alcanzar el colapso. Por todo ello, cualquier alternativa para la estimación de las propiedades residuales debe ser bienvenida.

Los resultados de la resistencia y la deformación residual a compresión demuestran un rápido deterioro tras superar el umbral de daño interlaminar estimado en la inspección ultrasónica, alcanzándose reducciones cercanas al 55 % y al 45 %, respectivamente, respecto los valores máximos estimados. La degradación de la rigidez longitudinal es menos drástica, mostrando reducciones máximas del módulo de rigidez efectivo entorno al 11 %. El ensayo de compresión proporciona datos de las propiedades residuales en presencia de daño, pero falla en lo referente a la información sobre los mecanismos de fallo y al crecimiento potencial y propagación del daño en función de la carga. En este sentido, las imágenes de alta velocidad aportan detalles reveladores como son la dirección y velocidad de propagación del daño en la dirección transversal, observándose cómo el colapso se debe al efecto combinado del cambio en la curvatura local de las fibras en la proximidad del área de contacto y a la presencia extensiva de deslaminaciones.

El ensayo de carga cuasi-estática proporciona una estimación de la degradación de la rigidez transversal que exhibe un marcado comportamiento decreciente con el incremento de la energía del impacto. Al estimarse la rigidez en el tramo lineal de la curva fuerza-desplazamiento antes de alcanzar un nuevo estado de degradación irreversible, básicamente puede considerarse el ensayo como un método de evaluación no destructiva. Otras ventajas destacables que posicionan al ensayo como una atractivo método complementario al ensayo de compresión son los bajos niveles de carga requeridos y las mínimas complicaciones técnicas del propio ensayo. No obstante, su aplicabilidad en otras configuraciones está todavía por explorar.

La estrategia de la inserción de una deslaminación artificial para emular el daño real inducido por un impacto, aunque goza de popularidad en los estudios de los efectos dinámicos, ha demostrado provocar nuevamente un comportamiento claramente diferente respecto del provocado por el daño real. No obstante, su estudio ha proporcionado resultados concluyentes en cuanto a la sensibilidad del tamaño y la profundidad del defecto. Es destacable que el efecto inducido era significativamente más severo en la respuesta dinámica que el inducido por el daño real, contrariamente a los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades residuales. Ello pone de manifiesto la importancia de la indentación y de la curvatura de las fibras en la localización del impacto y de la no unicidad del número de deslaminaciones.

Capítulo 6 | TOLERANCIA DE LOS LAMINADOS AL DAÑO POR IMPACTO

Finalmente en la comparativa entre las propiedades estáticas y dinámicas residuales se ha concretado el grado de sensibilidad y adecuación de los diferentes criterios de correlación basados en la respuesta dinámica para la identificación del daño. La drástica degradación de la resistencia de los laminados tras la inducción de un daño interlaminar, dificulta enormemente -mediante las técnicas basadas en vibración- la identificación prematura del daño por debajo de los límites indicados. No obstante, los resultados permiten acotar el intervalo de incertidumbre y reducir considerablemente la limitación actual en cuanto a la deformación máxima admisible a compresión en los criterios de diseño.

Referencias

- [1] ABRATE, S. Impact on Composite Structures. Cambridge University Press, 1998.
- [2] ASTM-D7136. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, 2007.
- [3] ASTM-D7137. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International, 2007.
- [4] BAKER, D. Mechanical property characterization and impact resistance of selected graphite/peek composite materials. *Journal of the American Helicopter Society* (1994).
- [5] DAVIES, G., HITCHINGS, D., AND ZHOU, G. Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/polyester laminates. *Composites Part A* 27, 12 (1996), 1147–1156.
- [6] FERABOLI, P., AND KEDWARD, K. Enhanced evaluation of the low-velocity impact response of composite plates. AIAA journal 42, 10 (2004), 2143–2152.
- [7] FREITAS, M. D., AND REIS, L. Failure mechanisms on composite specimens subjected to compression after impact. *Composite Structures* 42 (1998), 365–373.
- [8] HABIB, F. A new method for evaluating the residual compression strength of composites after impact. Composite Structures 53, 3 (2001), 309–316.
- [9] HODGKINSON, J. Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. CRC Press, 2000.
- [10] KAN, H. Enhanced reliability prediction methodology for impact damaged composite structures. Washington (1998).
- [11] LOPES, C. S., SERESTA, O., COQUET, Y., GÜRDAL, Z., CAMANHO, P. P., AND THUIS, B. Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. part i: Experiments. *Composites Science and Technology* 69, 7-8 (2009), 926–936.
- [12] MARTÍNEZ, X. Micro-mechanical simulation of composite materials using the serial/parallel mixing theory. PhD thesis. Universitat Politécnica de Catalunya. Advisor: Sergio H. Oller Martínez, 2008.
- [13] ORIFICI, A., HERSZBERG, I., AND THOMSON, R. Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure. *Composite Structures* 86, 1-3 (2008), 194–210. Fourteenth International Conference on Composite Structures-ICCS/14.
- [14] PÉREZ, M. A., GIL, L., AND OLLER, S. Non-destructive testing evaluation of low velocity impact damage in carbon fiber-reinforced laminated composites. Ultragrasas (Ultrasound) 66, 2 (2011), 21–27.
- [15] PRICHARD, J., AND HOGG, P. The role of impact damage in post-impact compression testing. Composites 21 (1990), 503-511.

- [16] REID, S., AND ZHO, G. Impact Behaviour of Fiubre-reinforced Composite Materials and Structures. CRC Press, 2000.
- [17] REIS, L., AND FREITAS, M. D. Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels. Composite Structures 38, 1-4 (1997), 509–515.
- [18] SANCHEZ-SAEZ, S., BARBERO, E., ZAERA, R., AND NAVARRO, C. Compression after impact of thin composite laminates. *Composites Science and Technology* 65, 13 (2005), 1911–1919.
- [19] SIERAKOWSKI, R. L., AND CHATURVEDI, S. K. Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites. Wiley-Interscience, 1997.
- [20] TSAI, S. W. Theory of Composites Design. Think Composites, 1992.

Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

La clave del éxito en el pasado, el presente y el futuro de los materiales compuestos radica en su uso inteligente y en la aceptación de sus limitaciones. La manifiesta susceptibilidad al daño por impacto de los materiales laminados, ha suscitado recientemente el interés, por parte, tanto de la comunidad científica como de los diversos sectores industriales, sin embargo, esta limitación no ha impedido que su uso se incremente exponencialmente durante las últimas décadas. En la actualidad se están invirtiendo grandes esfuerzos en estrategias dirigidas al desarrollo y al diseño de materiales estructurales menos susceptibles a la aplicación de cargas súbitas, modificando, entre otras, la tenacidad de los materiales constituyentes u optimizando la configuración de los laminados. No obstante, todavía no se ha alcanzado un conocimiento profundo del fenómeno en cuestión y sin embargo, existen innumerables estructuras de material compuesto en servicio. Es por ello por lo que se presenta la necesidad de desarrollar metodologías y herramientas de inspección que permitan la identificación precoz de un estado de degradación inducido, con el fin de prevenir fallos o colapsos prematuros que pueden derivar en consecuencias catastróficas.

En esta tesis se ha analizado la aplicabilidad de las técnicas basadas en la respuesta dinámica para la identificación del daño inducido por un impacto a baja velocidad en laminados de material compuesto, entendiéndose por identificación: la detección, la localización, la cuantificación y finalmente, la estimación de la capacidad resistente residual. El uso de la tradicional técnica de análisis modal supone un avance significativo en cuanto a las condiciones de aplicabilidad respecto de otras técnicas de evaluación no destructiva, dado que para la adquisición de la respuesta dinámica se requiere un número finito de puntos de referencia, no siendo necesario el acceso completo a la estructura, permitiendo además la monitorización incluso sin interrupción del servicio.

Capítulo 7 | CONCLUSIONES

En el contexto de la presente tesis, los resultados sobre especímenes han demostrado -con diferentes niveles de satisfacción- la sensibilidad de los parámetros modales y los criterios de correlación modal frente a un estado de degradación inducido por un impacto.

El presente trabajo de investigación ha comprendido dos enfoques paralelos: por un lado un riguroso estudio experimental que ha incluido la evaluación de la resistencia a impacto, la caracterización del daño inducido, la cuantificación de los efectos en la respuesta dinámica y la evaluación de la capacidad resistente residual. Por otro lado, la simulación del fenómeno en el que se han estimado principalmente la iniciación y la propagación del daño interlaminar e igualmente los efectos inducidos en la respuesta dinámica. La metodología experimental utilizada constituye una matriz de ensayos interrelacionados, a partir de los cuales se han entablado vínculos con las modelizaciones numéricas pertinentes. En la exposición de los procedimientos y resultados que da lugar a la estructuración del documento, se ha primado el orden cronológico seguido por los especímenes desde su estado prístino hasta el colapso final.

En este sentido, inicialmente se ha certificado la calidad en la fabricación de los especímenes a fin de descartar anomalías que pudieran invalidar el estudio, y se han registrado las respuestas dinámicas de todos los especímenes que servirán a posteriori como patrón de comparación. El elevado número de muestras y la estandarización de sus dimensiones y configuración, puede considerarse una primera aportación relevante. A continuación se ha procedido a inducir de manera controlada el daño por impacto para la evaluación de la capacidad resistente de los laminados, cubriendo el intervalo completo de energías incidentes previas a la penetración y procurando reproducir los mismos modos y mecanismos de fallo que se inducen durante el servicio de la estructura. La campaña de ensayos se ha planteado en base a un protocolo estandarizado, lo que permite que los resultados obtenidos sean utilizados por otros investigadores para la correlación y validación de sus modelos. Tras la degradación de los laminados, el daño inducido ha sido caracterizado a partir de la inspección ultrasónica en términos de la morfología y la extensión del daño interlaminar. Los datos obtenidos son reveladores en cuanto a los umbrales de daño interlaminar, a la profundidad y a la distribución interna del mapa de daño. Seguidamente, se ha estimado la respuesta dinámica de los laminados impactados y se han cuantificado las variaciones en los parámetros modales inducidas por el nuevo estado de degradación, proporcionándose múltiples resultados en función de la severidad del impacto. La naturaleza no destructiva de ambas técnicas, es un requisito para la posterior evaluación de la capacidad residual.

En paralelo al trabajo experimental se ha desarrollado un procedimiento numérico para la simulación del fenómeno de impacto y del efecto en la respuesta dinámica. Inicialmente se disponía del programa FEMCOM ComPack-Aero, el cual ha permitido la simulación de la iniciación y la propagación del daño interlaminar, proporcionando una estimación del mapa de daño interno que muestra -en relación a la extensión y la distribución- un satisfactorio grado de correlación con las imágenes de la reconstrucción volumétrica del daño inducido obtenidas en la inspección ultrasónica. Los resultados presentados corroboran la viabilidad del enfoque microestructural para la simulación del fenómeno. El programa se presenta ahora como una potente herramienta de cálculo, de gran ayuda para profundizar en el conocimiento del proceso de iniciación y crecimiento del daño e identificar los parámetros que gobiernan el complejo fenómeno. Inspirado en el mismo enfoque microestructural se ha desarrollado la herramienta de cálculo FemModes que permite simular el comportamiento vibratorio de laminados a partir de la definición de los materiales constituyentes y de su estado de degradación. Nuevamente los resultados experimentales de las propiedades dinámicas avalan las estimaciones numéricas y permiten extraer conclusiones en relación al enfoque y la estrategia utilizada en la modelización del estado de degradación inducido.

Finalmente, se ha estimado la capacidad resistente residual de los laminados degradados a partir de un ensayo de compresión en el plano normalizado y de un ensayo de carga cuasi-estática transversal. Las curvas estimadas constatan una relación entre la severidad del impacto y la degradación de la resistencia, de la rigidez y de la deformación última. La comparativa con los resultados de la variación de las propiedades dinámicas ha permitido establecer nuevos límites en relación a la sensibilidad y adecuación de las propiedades dinámicas y de los diferentes criterios de correlación como parámetros de diagnosis de la salud estructural.

El estudio experimental se completa con un minucioso análisis del efecto inducido por deslaminaciones artificiales en la respuesta dinámica y en la capacidad resistente residual de los laminados. Durante la fabricación de unas muestras específicas, se han embebido láminas de polímero con propiedades antiadherentes, de geometría circular y de varios diámetros, ubicadas en diferentes profundidades del laminado. En ambos ensayos se aportan resultados que evidencian la inadecuación de la aproximación para emular las consecuencias provocadas por un daño real inducido por un impacto.

Además de las conclusiones generales anteriores, se han alcanzado conclusiones de carácter específico en relación a cada uno de los objetivos propuestos. Estas son:

Se han obtenido resultados experimentales concluyentes en relación a la resistencia y a la tolerancia al daño por impacto de laminados de material compuesto.

En la evaluación experimental de la resistencia a impacto se ha estimado la curva de disipación energética y se ha cuantificado la capacidad resistente de los laminados en términos de la extensión del daño inducido. Para ello se ha utilizado la técnica de inspección ultrasónica que proporciona una imagen volumétrica del daño interno, permitiendo la estimación del umbral de deslaminación en relación a la energía de impacto. Además se ha definido el umbral de visibilidad superficial en relación a la profundidad de la indentación. La considerable diferencia entre ambos umbrales corrobora que el daño superficial no es representativo del daño interno inducido.

En la evaluación experimental de la capacidad resistente residual se han estimado las resistencias y rigideces residuales a compresión y transversales de los laminados degradados. Los resultados demuestran un elevado grado de suscepti-

Capítulo 7 | CONCLUSIONES

bilidad ante la presencia de un mínimo daño interlaminar. En el caso particular del ensayo de compresión, los problemas emergen con el análisis de especímenes prístinos, entorpeciendo la estimación de las propiedades de referencia. Ello unido a la dificultad y complejidad propias del ensayo, promueve el desarrollo de nuevos protocolos de ensayo para la estimación de las propiedades residuales. En este sentido, el ensayo de carga cuasi-estática se presenta como una atractiva alternativa.

El hecho de plantear ambas evaluaciones en base a protocolos estandarizados, no supone una contribución relevante más allá de los numerosos resultados presentados que pueden servir para la calibración de futuros modelos numéricos, sin embargo, constituye un sólido procedimiento sobre el que se sustentan y se nutren el resto de evaluaciones experimentales y la correlación de la modelización numérica.

• Se han obtenido evidencias empíricas del efecto del daño inducido por un impacto en la respuesta dinámica de laminados compuestos.

El estado de degradación local inducido por un impacto provoca alternaciones cuantificables en las frecuencias naturales y deformadas modales, exhibiendo en ambos casos una relación con la severidad del impacto. La evaluación experimental demanda conocer la respuesta dinámica del laminado en su estado prístino. La identificación del daño a partir de las variaciones frecuenciales se presenta como la alternativa más atractiva por requerirse un único punto de adquisición, no obstante, su utilización permite únicamente detectar el daño y cuantificar relativamente su severidad. Las variaciones son más significativas en las deformadas modales y éstas proporcionan una información espacial del estado de degradación que permite la localización del daño.

El análisis conjunto de las propiedades estáticas y dinámicas residuales ha aportado conclusiones relevantes en relación al grado de sensibilidad y a la adecuación de los diferentes criterios de correlación basados en la respuesta dinámica para la identificación del daño. De entre los nuevos criterios de correlación modal definidos, el PrMAC reduce considerablemente el umbral de detección y cuantificación, y el factor de daño en la curvatura se muestra como el más propicio para la localización. En relación a la capacidad resistente residual, nuevamente el PrMAC se presenta como el más sensible de los criterios, no obstante éste se manifiesta ante un estado de degradación que supone una reducción de la resistencia residual a compresión del 27 % y su eficiencia viene condicionada por el número de modos estimados. A pesar de ello, los criterios permiten acotar el intervalo de incertidumbre y reducir la limitación actual en relación a la deformación máxima admisible a compresión.

A pesar de que los resultados se muestran prometedores, no es prudente extrapolar las conclusiones a componentes o estructuras diferentes de los especímenes examinados y es razonable discutir sobre su aplicabilidad en el campo real. Primeramente, adviértase que el área degradada por el impacto es considerable en

relación al área del laminado, un aspecto que raramente se da en estructuras reales. Además, la resolución de los resultados en la estimación de los parámetros modales y el grado de aplicabilidad de la técnica como herramienta de detección, dependen del rango frecuencial analizado. En estructuras de mayor tamaño las longitudes de onda de los modos de vibración más bajos son superiores a la extensión del área degradada, lo que hace cuestionable su detección. Una solución pasa por analizar una región del espectro en que las longitudes de onda de los modos sean del mismo orden de magnitud que el tamaño del defecto, no obstante, si bien la ampliación del espectro es factible en ambientes controlados, no siempre es posible excitar estructuras de mayor envergadura en un rango del espectro elevado. Estos aspectos pueden presuntamente condicionar la aplicabilidad de la técnica como herramienta general de identificación. Sin embargo, debe nuevamente destacarse la viabilidad en el examen de los especímenes normalizados. Por todo ello, puede considerarse éste como un estudio preliminar que motive una línea futura de investigación en estructuras de mayor envergadura. En cualquier caso, si la metodología y las herramientas específicas desarrolladas permiten cuantificar y ampliar el ciclo de vida estructural, la inversión tecnológica estará justificada.

• Se ha desarrollado la herramienta de cálculo FemModes basada en una formulación multiescala para la simulación del comportamiento vibratorio de laminados de material compuesto.

El código de elementos finitos FemModes permite calcular el comportamiento vibratorio de sistemas no amortiguados con geometrías regulares bajo unas condiciones de contorno arbitrarias, realizando el análisis con elementos isoparamétricos cuadriláteros y hexaédricos. La formulación de los elementos cuadriláteros se trata de una generalización de la teoría de Reissner-Mindlin para materiales laminados anisótropos que contempla los fenómenos axiales, de flexión y de cortadura. El programa admite el tratamiento de materiales anisótropos homogéneos o laminados, cuyas características elásticas pueden ser descritas en la micro, la meso o la macroescala. En cada punto de integración del elemento se define la configuración del laminado a partir de la teoría de capa única equivalente, así como las propiedades de los materiales constituyentes y su estado de degradación. El código se ha validado con los resultados experimentales del análisis modal de los laminados intactos, obteniéndose un alto grado de correlación en la modelización bidimensional y una correlación aceptable en la modelización tridimensional, debido a los problemas inherentes de la formulación del elemento relacionados con el efecto de bloqueo por cortante. Además, se incorpora un módulo para el tratamiento de las curvas experimentales de FRF que permite estimar los parámetros modales y calcular la matriz de correlación modal experimental y numérico-experimental.

En general, se ha demostrado la adecuación de la formulación multiescala para la simulación del comportamiento vibratorio de los laminados. Inicialmente, el grado de correlación numérico-experimental se ha utilizado como un indicador

Capítulo 7 | CONCLUSIONES

para la verificación y validación de las propiedades elásticas de los materiales constituyentes proporcionadas por los fabricantes. La predicción del comportamiento dinámico del laminado degradado se ha fundamentado en una estrategia de reducción localizada de la rigidez elástica del material. Para ello se han asignado en cada punto de integración las variables internas que definen el estado de degradación estimado de cada material constituyente. Los resultados permiten reproducir satisfactoriamente el efecto del daño inducido por impacto en la respuesta dinámica sin necesidad de formular elementos especiales en la interfase o de imponer condiciones cinemáticas en la región de la deslaminación.

• Se han obtenido resultados experimentales concluyentes en relación a la influencia de deslaminaciones artificiales embebidas en el laminado.

Los resultados experimentales han constatado que las deslaminaciones artificiales inducen efectos adversos en la respuesta dinámica y en la capacidad portante de los laminados, pero estos difieren significativamente de los efectos provocados por un daño real inducido por impacto, evidenciando así la inadecuación de la hipótesis experimental. No obstante, en su análisis se han reportado conclusiones relevantes en cuanto al efecto del tamaño, la profundidad del defecto y la influencia aislada en el comportamiento vibratorio, en la resistencia a compresión y en la rigidez transversal.

De un modo indirecto los resultados obtenidos subrayan la importancia en la consideración de otros mecanismos de fallo diferentes a la deslaminación. La rotura de las fibras inducida por los impactos más severos tiene un efecto significativo en los modos de vibración y en la rigidez residual transversal. En el caso del ensayo de compresión se destacó la importancia de la indentación y de la curvatura de las fibras inducida por el impacto, que originan una inestabilidad local previa al colapso del laminado. Asimismo, la mayoría de estrategias numéricas para la simulación del daño por impacto -como los elementos de tipo cohesivo- se centran análogamente en el análisis y la reproducción aislada de la deslaminación, sin embargo, en determinadas circunstancias se ha demostrado que ésta no es la única responsable de la degradación estructural y de la variación en la respuesta dinámica. Todo ello cuestiona las estrategias que desacoplan los efectos del fallo interlaminar de los del daño real inducido.

7.2. Futuras líneas de investigación

Tras la realización del presente trabajo de investigación se identifican aspectos generales de la metodología que requieren un desarrollo más profundo, dando lugar a distintas futuras líneas de investigación expuestas a continuación.

• Análisis de componentes y estructuras reales.

Los resultados obtenidos son específicos para una geometría y unas condiciones

físicas determinadas, por ello debe evaluarse la aplicabilidad de la técnica en componentes y estructuras de mayor envergadura, y si es posible, operando en condiciones de servicio. Para ello deben explorarse otras técnicas de vibración como el análisis modal operacional, en el que la fuente de excitación del sistema es la propia estructura en su régimen de operación. En este sentido pueden plantearse metodologías de identificación automatizadas que no requieran una intervención durante el postproceso.

• Extensión del estudio a otras tipologías de daño en compuestos.

El estudio está acotado a la identificación del daño por impacto, sin embargo las estructuras de material compuesto laminado son susceptibles a otras tipologías de daño que pueden sobrevenir durante el servicio, como por ejemplo los fenómenos de degradación medioambiental. Éstos son particularmente nocivos para la matriz, debido al efecto de la exposición a los rayos ultravioletas o a los efectos adversos inducidos por la humedad dada la higroscopicidad de las resinas.

• Instrumentación permanente del espécimen, el componente o la estructura.

La metodología presentada consiste esencialmente en una herramienta de inspección post-daño. Sin embargo, un gran número de aplicaciones demandan una automatización de la inspección y en tiempo real. El desarrollo incipiente de instrumentación embebida mediante galgas extensométricas, sensores piezoeléctricos y sensores de fibra óptica, se presenta como una alternativa potencial para la instrumentación permanente, posibilitando además la detección y la caracterización de eventos de carga súbita. En particular, los sensores de fibra óptica están abriendo un campo de desarrollo en la monitorización de la salud estructural. Éstos pueden insertarse entre las láminas durante el proceso de fabricación y distribuirse por todo el dominio de la estructura, obteniéndose una malla de puntos de referencia, un requisito para la aplicación de las técnicas y los criterios de correlación modal. No obstante, deben evaluarse los efectos locales de la distorsión alrededor del sensor embebido, especialmente la desalineación de las fibras y sus consecuencias en el comportamiento a compresión del laminado.

Simulación numérica del comportamiento resistente residual de laminados compuestos.

FEMCOM ComPack-Aero permite simular el comportamiento resistente residual a compresión de laminados compuestos, basándose en una formulación que considera el fenómeno del micro-pandeo de las fibras en la teoría de mezclas serie-paralelo. A pesar de ello, la simulación numérica ha quedado fuera del alcance del presente trabajo. Por ello, debe profundizarse en su estudio iniciándose con una validación a partir de los resultados experimentales obtenidos.

Capítulo 7 | CONCLUSIONES

• Incorporar las funcionalidades de FemModes a FEMCOM ComPack-Aero.

Pueden ampliarse las funcionalidades de FEMCOM ComPack-Aero incorporando un módulo de análisis modal y el módulo de postproceso para el tratamiento de las curvas experimentales de FRF que permite estimar los parámetros modales empíricos y sobretodo obtener la matriz de correlación modal experimental y numérico-experimental. Además, debe estudiarse la gran dispersión de los resultados entre las modelizaciones bi y tridimensionales en la simulación de la respuesta dinámica de los laminados degradados y la posible relación con la limitación en el mallado. Al tratarse de un código compilado, se resuelven parte de los problemas relacionados con el coste computacional que han limitado el estudio con FemModes.

• Incorporar los criterios de correlación en metodologías numéricas iterativas para la identificación del daño.

Las metodologías numéricas iterativas para la identificación del daño se basan, por lo general, en estrategias de reducción localizada de la rigidez elástica del material. Al tratarse de un proceso iterativo, dependiendo del tamaño del dominio analizado y del defecto a identificar, puede resultar en una tarea inviable. El uso de los criterios formulados para localización geométrica puede ayudar delimitando las regiones candidatas a presentar un estado de degradación.

• Desarrollo de una herramienta mixta numérico-experimental para la estimación de las propiedades elásticas de los laminados y de los materiales constituyentes.

La correlación entre los parámetros modales estimados numérica y empíricamente ha permitido indirectamente validar las propiedades de los materiales constituyentes del laminado. Ello permite el desarrollo de una herramienta inversa para la estimación no destructiva de las propiedades elásticas. Si bien este es un campo explorado por otros autores, la mayoría se han centrado en la estimación de las propiedades en la macroescala del laminado y a lo sumo en la mesoescala, pero resta por explorar la microescala.