

4. Análisis de las uniones entre elementos constructivos de MC

Se han clasificado las uniones que potencialmente se pueden encontrar entre elementos constructivos de una edificación industrial, en dos grandes grupos: uniones estructurales y uniones no estructurales (también se llamarán uniones constructivas). Las uniones estructurales son todas aquellas que juntan dos elementos resistentes (sistema estructural de un edificio), con el fin principal de transmitir una carga de un miembro a otro (normalmente cargas elevadas que en caso de fallo podrían producir el colapso del edificio). Las uniones constructivas, en cambio, tienen como finalidad el sostén de los elementos no estructurales del edificio, asegurando ciertas características como por ejemplo la estanqueidad, la continuidad del aislamiento, la resistencia al agua, etc. si éstas se requieren. En caso de fallo de la unión, el daño resultante no sería crítico para la estabilidad del conjunto de la edificación (aunque ello no implica que el daño no pudiera ser considerable).

Se ha acotado el análisis de las uniones a los sistemas constructivos los cuales son objeto de estudio en esta Tesis. Concretamente el sistema estructural y el sistema cerramientos exteriores (sistema fachadas y sistema cubiertas). El listado de las uniones consideradas en esta Tesis Doctoral son las siguientes:

- Uniones estructurales
 - Uniones viga-viga
 - Uniones pilar-pilar
 - Uniones pilar-cimentación
 - Uniones viga-pilar
 - Uniones estructura-forjado
- Uniones no estructurales (constructivas)
 - Uniones entre elementos de fachadas
 - Uniones entre elementos de fachada y la estructura del edificio.
 - Uniones entre elementos de cubiertas
 - Uniones entre elementos de cubierta y la estructura del edificio.
 - Uniones entre fachadas y cubiertas

Seguidamente se describen los rasgos más importantes para las uniones estudiadas.

- *Unión viga-viga.*

Esta unión se utiliza cuando es necesaria una luz entre pilares que no puede salvar una sola viga, o bien para utilizar vigas más cortas en el caso que haya un pilar intermedio. Si existe un pilar intermedio, la unión viga-viga es de poca importancia, y normalmente no se transfieren cargas de una viga a la otra, simplemente se unen o apoyan conjuntamente al pilar. Por otro lado, si la unión viga-viga se lleva a cabo para salvar una luz determinada (por ejemplo pórticos de naves industriales), la transmisión de cargas entre las vigas que debe soportar la unión puede ser muy importante. Esta carga estará constituida por las cargas verticales transmitidas por la cubierta o el forjado que se apoye en las vigas, y las cargas horizontales debidas a los efectos

del viento. Además, si la unión se encuentra en el centro de la luz a salvar, ésta deberá soportar un momento flector muy importante.

- *Unión pilar-pilar.*

Esta unión solamente existirá si el edificio industrial está formado por más de una planta. La función primordial de esta unión es transmitir las cargas verticales del pilar superior al inferior del mejor modo posible.

- *Unión pilar-cimentación.*

Se trata de una unión de especial importancia pues es la encargada de transmitir todas las cargas que afectan al edificio, al elemento que las tiene que transmitir al terreno. La unión ensambla el pilar con la cimentación, y normalmente consta de un elemento intermedio (placa) que los conecta. Así pues, esta unión se divide en una unión placa-pilar y otra placa-cimentación.

- *Unión viga-pilar.*

Esta unión es la encargada de transmitir a los pilares los esfuerzos verticales que recibe la viga debido a las concargas, las sobrecargas de uso o de nieve, etc. del forjado o la cubierta. Además, en función del tipo de unión, se pueden transmitir momentos flectores importantes.

- *Unión estructura - forjado.*

El forjado es el elemento encargado de repartir las cargas de cada piso entre sus elementos de apoyo (normalmente vigas). Aunque tanto los elementos de apoyo como el forjado son elementos estructurales, la unión entre ellos esta afectada normalmente por esfuerzos de compresión. Estos esfuerzos van a favor de la unión, siendo suficiente en la mayoría de ocasiones considerar el forjado simplemente apoyado sobre la estructura.

- *Uniones entre elementos de fachada.*

El requisito más importante de estas uniones es el de dotar a la fachada de una continuidad de sus propiedades principales, como la impermeabilización, aislamiento térmico y el aislamiento acústico. Así pues, el objetivo de esta unión es conseguir una ejecución lo más rápida y sencilla posible, cumpliendo los requisitos mencionados.

- *Uniones entre elementos de fachada y la estructura del edificio.*

Esta unión tiene como función exclusiva la de sostener la fachada, transmitiendo las cargas de viento a la estructura del edificio. La unión debe ser lo suficientemente resistente para que los elementos de la fachada no puedan ser arrancados por efectos del viento o caerse por su propio peso.

- *Uniones entre elementos de cubierta.*

Esta unión tiene como objetivo principal mantener la estanqueidad en toda la cubierta. Esta estanqueidad se puede conseguir por solape, en caso de cubiertas inclinadas, o bien por otros métodos más complejos en caso de cubiertas planas. Además, la unión debe ser lo suficientemente resistente para que los elementos de la cubierta no puedan ser arrancados por efectos del viento.

- *Uniones entre elementos de cubierta y la estructura del edificio.*

Esta unión tiene como función principal la de sostener la cubierta y transmitir las cargas de viento, nieve o uso de ella a la estructura del edificio. Estas uniones trabajan normalmente a compresión, pero también pueden llegar a trabajar a tracción cuando el efecto de succión del viento sea considerable.

- *Uniones entre elementos de cubierta y elementos de fachada.*

Esta unión tiene como objetivo primordial proporcionar estanqueidad en la junta. Esta estanqueidad será de más importancia si se trata de una cubierta plana, debido a las acumulaciones de agua. Otros objetivos de esta unión son mantener un buen aislamiento térmico y acústico.

Actualmente, existen principalmente cuatro tipos de técnicas de unión que se pueden aplicar a elementos formados por MC. Estos son las uniones adhesivas, las uniones mecánicas mediante tortillería, las uniones soldadas y las uniones encajadas (Kenny, 2003; Mottram, 2001).

4.1. Uniones adhesivas

Las uniones adhesivas son capaces de conseguir una gran eficiencia estructural, constituyendo un recurso para el ahorro de peso en estructuras debido al potencial de eliminación de concentraciones de esfuerzos que no puede ser logrado con uniones mecánicas (Obermeyer, 2004). Desafortunadamente, debido a la carencia de métodos de inspección fehacientes, la unión adhesiva en estructuras primarias ha sido siempre rechazada por los diseñadores de los campos en los que el uso de materiales compuestos está más extendido. Aun así, algunas aeronaves incorporan este tipo de uniones a sus estructuras, obteniendo muy buenos resultados.

No se puede realizar una clasificación única de tipos de adhesivos, sino que existen varias en función de diversos aspectos (Miravete, 2000-1). Así por ejemplo, en función de la utilidad final del adhesivo, estos pueden clasificarse en adhesivos metal-metal, metal-plástico, para papel y embalajes, para plásticos, para cerámicas, y para usos generales. En función de la temperatura de unión se encuentran adhesivos con endurecimiento por debajo de la temperatura ambiente, con endurecimiento a temperatura ambiente sin aporte de calor, con temperatura de endurecimiento intermedia (desde temperatura ambiente hasta 100°C), y con endurecimiento con aporte de calor a temperatura superior a 100°C. En función del origen de los adhesivos, estos pueden ser adhesivos naturales (animales, vegetales, minerales y elastómeros), y sintéticos (elastómeros, caucho sintético y derivados, termoplásticos y termoestables). En función del método de unión, los adhesivos pueden ser sensibles a la presión (solución), fundidos por el calor (hot-melt), de endurecimiento químico (polimerizables), y por eliminación de disolvente (PSAs).

Otra clasificación que se puede realizar para los adhesivos, es la de si estos son convertibles o no lo son. Los primeros son aquellos que experimentan transformación química en su proceso de adhesión, fundamentalmente procesos de reticulación y uniones intercadena en el proceso de “curado”. Los no convertibles son los que no presentan procesos de reticulación o cualquier otro proceso químico que forme enlaces covalentes. En general son menos resistentes ya que la unión es mecánica.

Según el ingrediente mayoritario los adhesivos se pueden agrupar en adhesivos termoplásticos (formados por resinas termoplásticas o elastómeros), adhesivos termoestables, y adhesivos formados por mezclas de resinas-cauchos (aprovechan las propiedades de resistencia de la resina y elasticidad del elastómero) (Parker, 2001). En función de la presentación física los adhesivos se pueden clasificar como sólidos, líquidos, en polvo fundible, en pasta, y en forma de film (forma de película).

Para el presente análisis, la clasificación más importante es la que cataloga los adhesivos como estructurales y no estructurales. Se entiende por adhesivo estructural aquel que usado en combinación con un material estructural, trabaja de modo que la junta o línea de encolado no falle cuando el material se encuentre a tensiones de hasta su límite elástico. En general se trata de adhesivos formados por dos polímeros, uno termoestable (modificado o no) y otro termoplástico incluyendo ciertos elastómeros. Atendiendo a un criterio resistente puramente numérico resulta difícil encontrar la frontera entre adhesivo estructural y no estructural, pudiendo definirse como estructural aquel que supere a temperatura ambiente los 10MPa de resistencia de tracción (Parker 2001). Estos están considerados como críticos, pues deben permitir la transmisión de cargas considerables y un fallo de los mismos podría ocasionar serios daños al sistema estructural de cualquier edificación. En la tabla 4.1 se muestra un cuadro comparativo de ventajas y desventajas para los 3 grupos principales de adhesivos estructurales (Miravete, 2000-1).

Tabla 4.1. Comparación entre adhesivos estructurales

SISTEMAS ADHESIVOS ESTRUCTURALES VALORACIÓN COMPARATIVA		
SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
EPOXI	Alta adhesión final Durabilidad Cualquier espesor Contracción del 2%	Preparación de superficies Vida de la mezcla Ciclos de curado(especialmente los monocomponentes) Dosificación y mezcla de los componentes
POLIURETANOS	Flexibilidad Mejor para plásticos	Menor adhesión final que los epoxis Peor para cristal y metales
ACRÍLICOS	Buena adhesión final Fácil aplicación Curado rápido Preparación de superficies	Espesor de la capa Contracción del 7% Durabilidad

Los adhesivos estructurales más utilizados son los de base epoxídica debido a las elevadas propiedades mecánicas que proporciona para la mayoría de sustratos, preparados adecuadamente. Este tipo de adhesivos posee un bajo nivel de acortamiento durante el curado, presenta tensiones residuales bajas y dado que emite pequeñas cantidades de volátiles durante el proceso de curado, requieren solamente bajas presiones. Además, poseen también elevadas propiedades de rigidez y resistencia. Sin embargo, la resina epoxi sola, sin ningún

otro componente, es demasiado frágil para aplicaciones estructurales. Por ello normalmente se encuentra mezclada con algún polímero más dúctil, persiguiendo una solución final más tenaz.

Para obtener una buena unión adhesiva, debe producirse un descenso de energía libre cuando adhesivo y sustrato se ponen en contacto, por lo que es necesario que el adhesivo moje perfectamente la superficie del material. De este modo se llega a la interdifusión de las moléculas entre las caras en contacto. En general la adhesión puede llevarse a cabo mediante adhesión mecánica o mediante adhesión electroquímica (Sivy, 2004). El caso ideal para una unión sería aquel en que se llevasen a cabo los dos tipos de adhesión, lo cual no es siempre posible y aparecen mezclas de ambos mecanismos.

Diseño de uniones adhesivas para MC

Las uniones de materiales compuestos son objeto de numerosas investigaciones sobre todo para aplicaciones aeronáuticas. Algunos de las premisas clave para realizar el diseño se indican a continuación (Brown, 2001):

- El uso de análisis de esfuerzos unidimensionales simples en uniones de MC generales siempre que sea posible.
- La necesidad de elegir el diseño de la unión para asegurar el fallo del adherente preferiblemente al del adhesivo, de modo que el adhesivo nunca sea el punto débil
- Uso cuidadoso de factores como la variación de espesor del adherente para reducir o eliminar los esfuerzos de pelado de la unión

En estos conceptos clave se debe introducir el término “pelado” (“peeling” en inglés). Este consiste en una fuerza que tiende a separar los adherentes comenzando por un extremo, y extendiéndose hacia el otro. Es provocado por la exposición de la unión a flexiones (Ycognard, 2005). En la figura 4.1 se observa un adhesivo de unión tensionado a pelado.

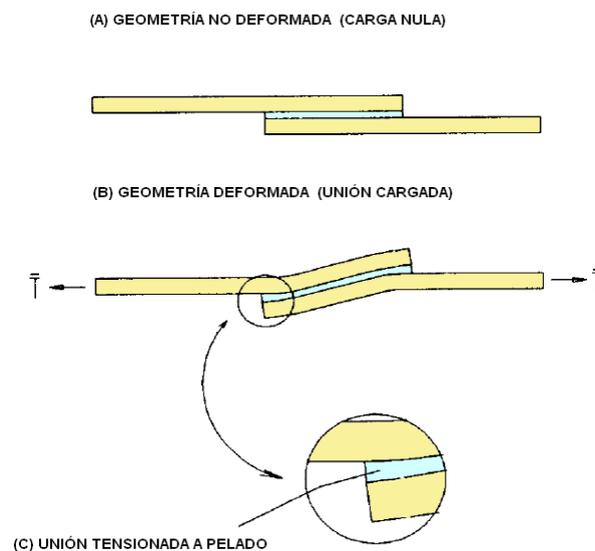


Figura 4.1. Unión adhesiva tensionada a pelado

La figura 4.2 muestra una serie de configuraciones típicas de unión adhesiva. Estas, en general, se caracterizan por las altas concentraciones de esfuerzos en la capa del adhesivo. Esto se origina, en el caso de esfuerzos cortantes, debido a la deformación axial desigual de los adherentes, y en el caso de esfuerzos de pelado, debido a la excentricidad de la dirección de la carga. La respuesta a esfuerzos de pelado tiende a ser mucho más frágil que la respuesta a cortantes, siendo la reducción de esfuerzos de pelado deseable para obtener un buen comportamiento de la unión (Sivy, 2004).

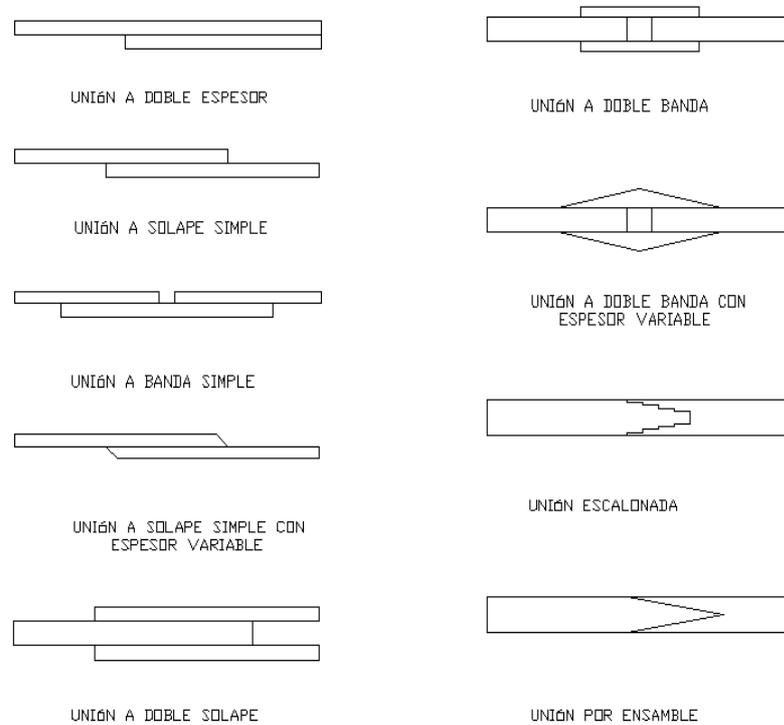


Figura 4.2. Configuraciones de uniones adhesivas típicas

Desde el punto de vista de fiabilidad de la unión, es vital evitar que la capa de adhesivo sea la parte débil de la unión; esto significa que, siempre que sea posible, la unión debe ser diseñada para asegurar que los adherentes fallan antes que la capa adhesiva (Brown, 2001). Ello es debido a que el fallo en los adherentes está controlado por la fibra, mientras que la falla en el adhesivo está dominada por la resina (sujeta a efectos de vacíos, variaciones de espesor, efectos medioambientales, variaciones de procesado, deficiencias en la preparación de superficies, y otros factores que no están siempre adecuadamente controlados). Este objetivo puede ser cumplido reconociendo las limitaciones de la geometría de la unión, y estableciendo restricciones apropiadas en las dimensiones del espesor de la unión para cada geometría. La figura 4.3 ilustra este punto, mostrando una progresión de tipos de unión que representan el aumento de la capacidad de absorber esfuerzos en orden creciente. En cada tipo de unión el espesor del adherente debe ser aumentado con la intención de lograr una capacidad de carga más elevada. Cuando los adherentes son relativamente delgados, los resultados de los análisis de esfuerzos muestran que para todos los tipos de unión, los esfuerzos en el adhesivo serán lo suficientemente pequeños para garantizar que los adherentes alcanzarán su capacidad de carga antes de que el fallo pueda ocurrir en el adhesivo. A medida que aumenta el espesor del adherente, el esfuerzo en la unión se vuelve relativamente mayor, hasta que se alcanza un punto en el que la falla de la unión (o del adhesivo) ocurre para una carga inferior que el fallo de los adherentes.

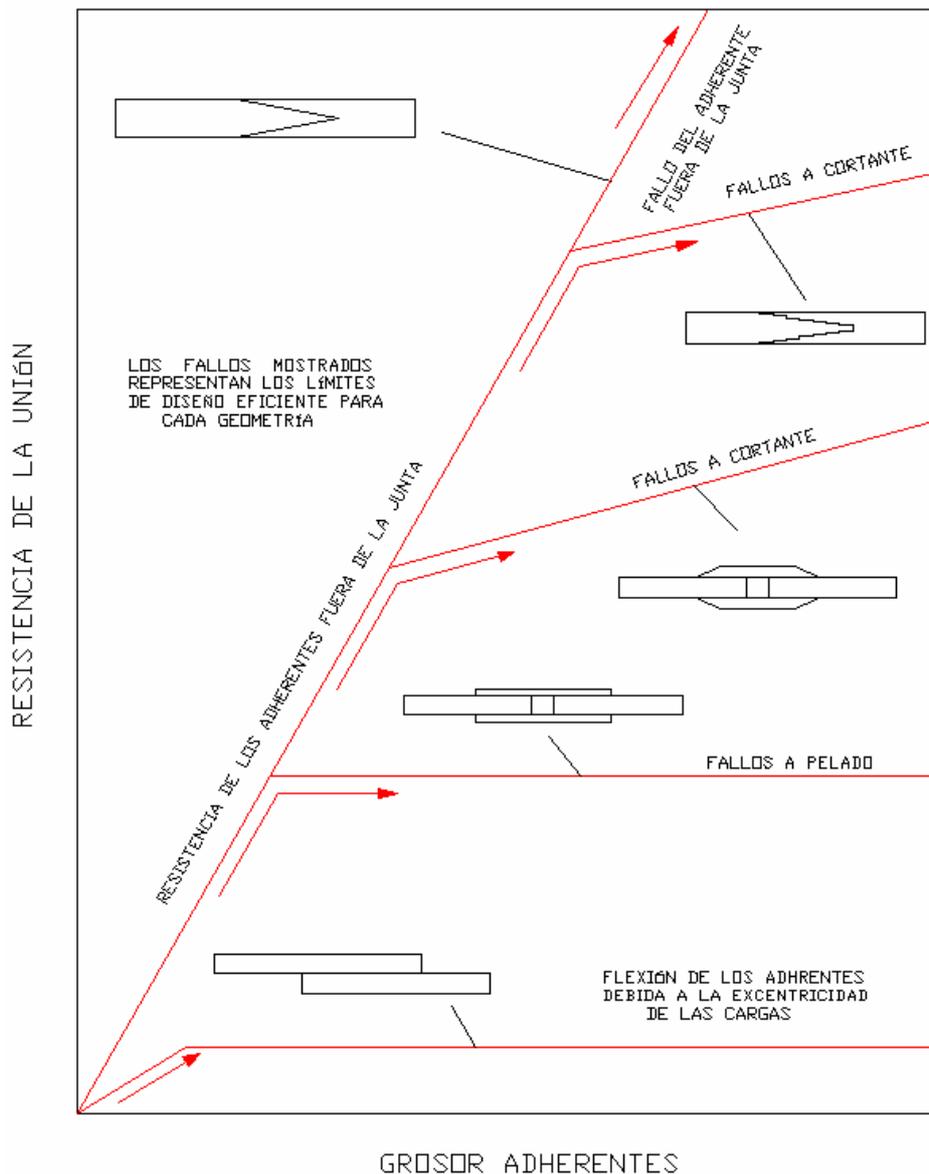


Figura 4.3. Resistencia de la unión respecto grosor adherentes (Miravete, 2000-1)

Esto conduce al principio general por el que dado un tipo de unión, el espesor del adherente debe ser restringido a un rango apropiado relativo al espesor de la capa del adhesivo. Debido a consideraciones de procesado, y sensibilidad a los defectos del material adhesivo, los espesores de la capa adhesiva son generalmente limitados a un rango entre 0,125 y 0,39 mm (Miravete, 2000-1). Por consiguiente, a medida que la necesidad de capacidad de carga aumenta, es preferible cambiar la configuración de la unión por una más eficiente antes que aumentar el grosor del adherente de modo indefinido.

En la figura 4.3 se aprecia que las uniones a solape simple y a solape doble con espesores uniformes de las adherentes, son los tipos de unión menos eficientes, siendo preferibles primeramente para estructuras delgadas con bajos niveles de carga por unidad de espesor. De estas dos, las uniones a solape simple son las menos resistentes debido a que la excentricidad de este tipo de geometría genera una flexión significativa de los adherentes que magnifica los esfuerzos de pelado (Brown, 2001).

Los adherentes de materiales compuestos se ven considerablemente más afectados por esfuerzos interlaminares cortantes que los metales, de modo que existe una necesidad básica de tener en cuenta estos efectos en análisis de esfuerzos de uniones adhesivas de materiales compuestos. Además, debido a que las resinas utilizadas en las matrices de materiales compuestos tienden a ser menos dúctiles que los adhesivos (siendo también debilitadas por concentraciones de esfuerzos debido a la presencia de las fibras en su interior), los elementos limitadores de la unión son los esfuerzos cortantes y a tracciones transversales interlaminares del MC, antes que la resistencia de la propia unión adhesiva. En el caso de uniones simplemente solapadas, los fallos a flexión de los adherentes pueden ocurrir debido a momentos elevados en los extremos del solape. En la figura 4.4 se observa la secuencia de fallo del adherente para una unión a solape simple. Para adherentes metálicos los fallos por flexión toman la forma de la flexión plástica y forman un efecto bisagra, mientras que en adherentes de material compuesto los fallos por flexión son frágiles por naturaleza (Hashim, 2002).

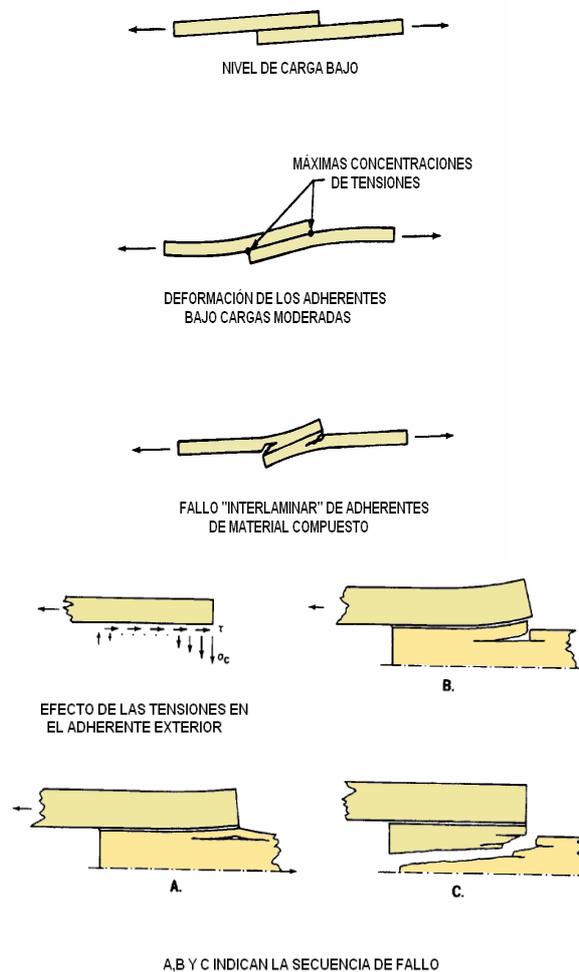


Figura 4.4. Secuencia de fallo para unión a solape simple

Las consideraciones más importantes a tener en cuenta en el diseño de esta tipología de uniones son: en primer lugar (1) siempre que sea posible se debe limitar el espesor de los adherentes o utilizar configuraciones más sofisticadas como las escalonadas o por ensamble, para asegurar que el fallo del adherente ocurrirá antes que el fallo del adhesivo; en segundo lugar (2) se deben diseñar las uniones para la

minimización de esfuerzos de pelado, tanto manteniendo espesores muy delgados de los adherentes, como utilizando secciones variables para adherentes de espesores intermedios (Brown, 2001). Y por último (3), es esencial que se practiquen preparaciones superficiales adecuadas para asegurar que la junta entre los adherentes y el adhesivo no falle. Cuando se combinan estas condiciones, cabe esperar un comportamiento correcto para uniones de MC.

Por lo que respecta al cálculo de uniones adhesivas, destacar que el análisis de esfuerzos ha variado desde formulas muy simplistas en las que solamente se consideran los esfuerzos cortantes sobre la capa del adhesivo, hasta métodos elásticos extremadamente complejos que tienen en consideración gran cantidad de detalles. Es deseable un compromiso entre estos dos extremos, ya que la adecuación estructural de las uniones no depende normalmente de un conocimiento detallado a niveles micromecánicos, solamente a la escala del espesor del adhesivo. Uno de los métodos más usados es el conocido como el método de Hart-Smith (1986) (Sivy, 2004).

El método de Hart-Smith se basa en la experiencia (método empírico), y sus pasos principales son las siguientes:

- Calcular la tensión cortante máxima de la junta adhesiva por unidad de anchura.
Mediante fórmulas matemáticas se consigue la tensión cortante máxima de la junta adhesiva para cada una de las tipologías de uniones estudiadas.
- Dimensionar el ancho de la unión adhesiva por cortante.
El ancho se obtiene dividiendo la fuerza cortante máxima por unidad de anchura, entre la resistencia a cortante del adhesivo por unidad de superficie.
- Calcular la tensión de pelado máxima de la junta adhesiva por unidad de anchura.
Los esfuerzos de pelado son inevitables en la mayoría de las configuraciones de uniones. De todos modos, estos pueden ser reducidos a niveles aceptables mediante la elección de la geometría apropiada de los adherentes.
- Comprobar la anchura dimensionada, y rectificar en el caso de que la tensión máxima de pelado supere a la resistencia del adhesivo.
El ancho se comprueba dividiendo la fuerza de pelado máxima por unidad de anchura, entre la resistencia a pelado del adhesivo por unidad de superficie. Si esta anchura es inferior a la encontrada por cortante, se mantendrá la anterior, sino, se sustituirá por la nueva anchura.
- Calcular la longitud de solape de la unión.
La longitud de solape de la unión se calcula para garantizar la durabilidad de las uniones adhesivas, provocando el fallo del adherente antes de la falla del adhesivo en cargas estáticas.
Para evitar los fallos por fluencia en la unión, el método de Hart-Smith requiere que la tensión de cortante mínima en la longitud de la junta adhesiva, no sea superior a una décima parte del límite elástico del adhesivo. Ello fija un valor mínimo de longitud de solape en función del adhesivo usado.

4.2. Uniones mecánicas

Las uniones mecánicas llevan utilizándose en construcción desde hace siglos para estructuras de madera. En el siglo XVIII empezaron a usarse para unir metales, con la aparición de las primeras estructuras metálicas. Así pues, aunque la aplicación de este método en materiales compuestos es muy reciente, su utilización en otros campos desde hace muchas décadas ha derivado en un conocimiento muy perfeccionado de la técnica. Por otro lado, debido a las características de los materiales compuestos, el comportamiento global del ensamblaje es muy diferente y, aunque se han podido establecer algunas tendencias, las uniones mecánicas precisan todavía de investigaciones para su total conocimiento.

La característica principal de una unión mecánica es la utilización de sistemas discretos auxiliares para mantener unidos los miembros del ensamblaje. Estos elementos de unión pueden habitualmente ser remaches, tornillos, pasadores o grapas. Los remaches fueron el método más utilizado antiguamente en estructuras metálicas, siendo sucedidos por las uniones atornilladas, y más tarde por la soldadura. La utilización de estas técnicas de unión conlleva la perforación de los miembros a unir, apareciendo así su principal punto débil en la aplicación en estructuras de materiales compuestos (McCarthy, 2001). Los agujeros que precisa el método llevan a la aparición de concentración de esfuerzos y, al contrario que en estructuras metálicas en las que las concentraciones de esfuerzos pueden despreciarse gracias al fenómeno de la fluencia, en materiales compuestos su rigidez y resistencia anisótropas, la baja resistencia a cortadura interlaminar, y las resistencias a tracción a lo largo del espesor, hacen que estas concentraciones sean de gran importancia (Hart-Smith, 1996).

De todas maneras, las concentraciones de tensiones no suponen un impedimento para la utilización de esta técnica en construcción. Es más, las uniones mecánicas son las más utilizadas en el aún reducido sector de construcción con materiales compuestos, simplemente se debe tener en cuenta la pérdida de sección debido a los agujeros en el cálculo pertinente. De entre todas las uniones mecánicas, las atornilladas son las más utilizadas por su facilidad de puesta en obra y por ser las únicas que permiten un fácil desensamblado de la estructura (figura 4.5). Ésta última característica, combinada con el reducido peso de las estructuras de materiales compuestos, puede dar paso a la aparición de un nuevo mercado de estructuras desmontables.



Figura 4.5. Ejemplo de unión atornillada (puente del A.V.E, Lleida)

Aunque la aplicación de esta técnica en estructuras de edificios de materiales compuestos es muy reciente, existen otros sectores que llevan más tiempo desarrollándola y cuyos estudios son de gran ayuda para adaptarlos a edificios. Estos sectores son el naval, el aeronáutico, el de automoción y el aeroespacial.

Para poder realizar el diseño de una unión atornillada, es necesario conocer de qué distintas maneras puede fallar esta unión. Las uniones atornilladas entre materiales compuestos pueden fallar de seis modos posibles, todos ellos representados en la figura 4.6 (Stellbrink, 2001). Esta gran cantidad de fallos posibles se debe a la complejidad del material, que constituye la diferencia principal entre el comportamiento de las estructuras metálicas y las de materiales compuestos. Así pues, la ya de por sí compleja distribución de tensiones alrededor de la zona de los tornillos que aparece en estructuras metálicas, se complica más en estructuras de MC, convirtiéndose su análisis en especialmente complicado. Ello dificulta considerablemente la obtención de métodos lineales de análisis de uniones mecánicas en materiales compuestos.

Dos de los modos de fallo representados en la figura 4.6, están relacionados directamente con las características de los elementos discretos de unión, y por tanto, dependen íntegramente de la elección del tornillo o tornillos adecuados para soportar la carga aplicada. Además, estos modos de fallo son comunes entre las uniones de MC y las uniones metálicas, y por tanto pueden ser tratadas por igual. Los demás modos de fallo dependen del material y de la geometría de la unión, pudiendo algunos de ellos ser prevenidos mediante el diseño adecuado de la geometría de la unión.

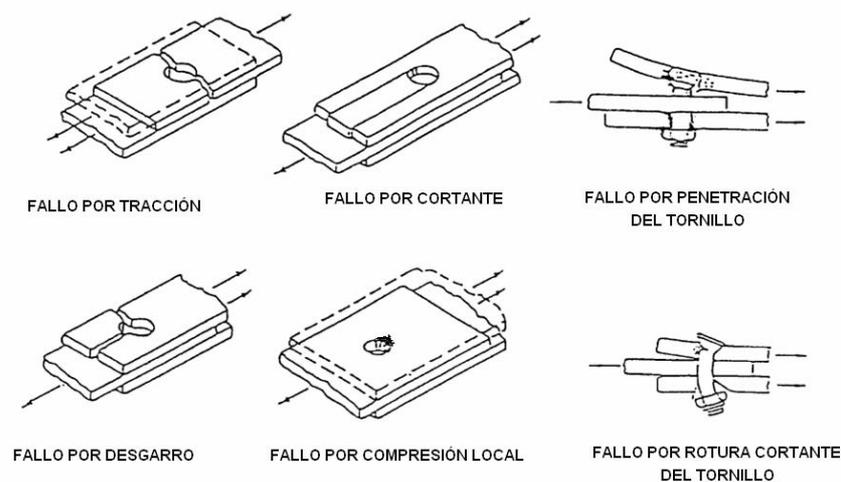


Figura 4.6. Modos de fallo en una unión atornillada (Stellbrink, 2001)

La situación ideal sería que todos los modos de fallo ocurrieran para el mismo nivel de cargas, pero desgraciadamente esto no es posible, y un diseño correcto deberá asegurar que la unión no se vea afectada por ninguno de ellos cuando entre en carga. El único modo de fallo no catastrófico es el de compresión local, por lo tanto las uniones deberán ser diseñadas para que este sea el primer fallo que se produzca al incrementar la carga. En los párrafos siguientes se explican las características de los modos de fallo relacionados con el diseño de los elementos composite.

Fallo por tracción

Las fracturas por tracción se producen en el plano perpendicular a la carga aplicada. Se presentan de forma catastrófica pues no se puede apreciar la aparición de daño en la pieza hasta cargas muy próximas a la de rotura. Además, después del fallo de la junta ésta no puede soportar ninguna carga apreciable. El material compuesto falla por fractura a tracción de las fibras. En los alrededores de la zona de máxima concentración de esfuerzos, aparecen pequeñas grietas en la matriz perpendiculares a la carga aplicada. Este modo de fractura es dependiente de la geometría (Mottram 2004).

Fallo por compresión local o Aplastamiento

Este tipo de fallo consiste en el aplastamiento de la superficie interior cilíndrica del agujero por la presión del tornillo. De todos los posibles modos de fallo es el que se presenta de manera menos catastrófica, pues después del fallo de la junta ésta puede normalmente seguir soportando una carga importante. En este caso se acepta que el fallo se inicia por compresión en la matriz, desarrollándose a continuación grietas y delaminaciones, y finalmente termina con el fallo a compresión y pandeo de las fibras. Los primeros indicios de daño se pueden apreciar claramente a partir del 80% de la carga de rotura, con la aparición de grietas en la matriz que se propagan a 45° de la dirección de la carga y a través del laminado (figura 4.7).



Figura 4.7. Fallo por compresión local para tornillos avellanados y regulares

Fallo por cortante

Algunos autores consideran la rotura a cortante como un caso especial de rotura por aplastamiento. Esta, no obstante, presenta una diferencia muy importante con la anterior: este modo de fallo se presenta de manera repentina y catastrófica. Los primeros síntomas de daño pueden apreciarse alrededor del 90% de la carga máxima, apreciándose la aparición de grietas en la matriz a 45° respecto a la dirección de la carga. En este caso, a diferencia del caso de aplastamiento, las grietas no se encuentran en la dirección del espesor del laminado, sino en la dirección del plano de la lámina.

Fallo por desgarro

La rotura por desgarro se produce como combinación de las roturas por cortante y por tracción. Como tal puede ser controlada evitando las anteriores. Se trata de una tipología de falla compleja, cuya aparición es muy esporádica en los ensayos realizados en uniones atornilladas. En la gran mayoría de casos, la unión fallará por cortante o por tracción, antes que por desgarro (Lutz y Wang, 2002).

Diseño de uniones atornilladas para MC

Para poder observar la influencia de distintos parámetros de una unión atornillada sobre su carga de ruptura, se adjuntan en la figura 4.8 las tensiones medias de comparación. Estas constituyen una herramienta muy práctica para el diseño preliminar de uniones atornilladas simples. Estos valores deben compararse con las resistencias respectivas, dependientes del material compuesto y los tornillos utilizados.

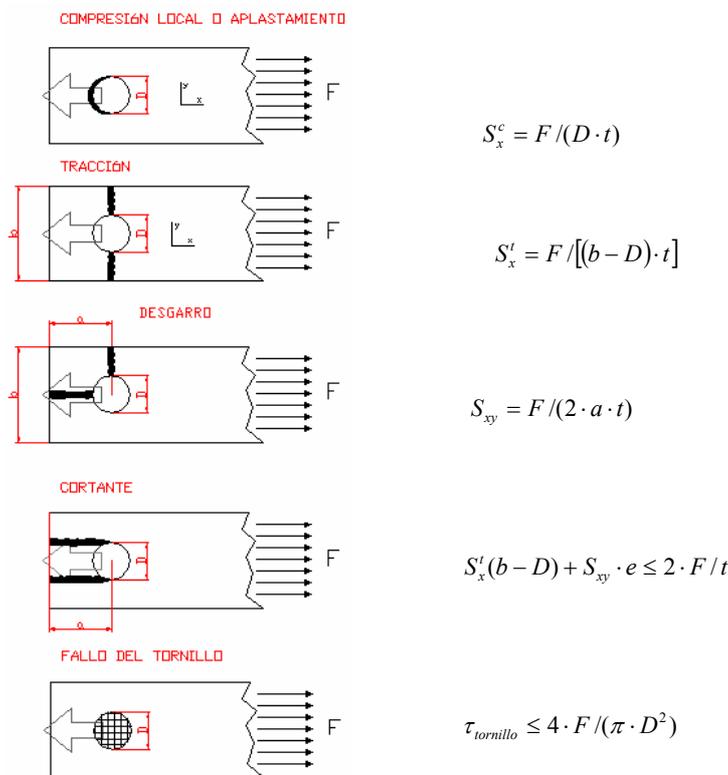


Figura 4.8. Tensiones medias de comparación según el modo de fallo (Stellbrink, 2001)

De todos modos, estas expresiones pueden utilizarse solamente a modo de prediseño, siendo necesaria su comprobación mediante cálculos más avanzados, como elementos finitos u otros métodos numéricos siempre que se necesite una precisión considerable. No obstante, como se ha comentado anteriormente, el diseño de las uniones atornilladas intentará siempre enfocarse a la falla por compresión local. Consecuentemente esta expresión será la más útil, intentando evitar el resto de los modos de fallo mediante diseños geométricos adecuados. Para ello, el primer parámetro a tener en cuenta, es el ratio d/b , donde “d” corresponde al diámetro del agujero del tornillo, que deberá ser el mismo que el del tornillo para unas prestaciones adecuadas, y “b” corresponde a la anchura del elemento a unir. Para valores pequeños de este ratio, el modo de fallo predominante será el fallo por compresión local, en cambio, para valores elevados de este ratio, el

fallo predominante es el fallo por tracción (Stellbrink, 2001). Esto se debe a que la resistencia a tracción es altamente dependiente de la sección del elemento disponible, y esta será tanto menor como elevado sea el valor de este ratio. En cambio, la resistencia a compresión local depende de otros muchos factores como el tamaño de las arandelas o la secuencia de apilado, entre otros. Así pues, será siempre deseable el diseño de uniones con anchuras elevadas y agujeros lo más pequeños posible, donde interviene la elección del tornillo adecuado, sin sobredimensiones.

Otro parámetro muy influyente en el diseño de las uniones atornilladas, es el ratio e/d , donde “d” sigue siendo el diámetro, y “e” la distancia al borde libre del espécimen. Un valor bajo del ratio e/d , conduce a fallos por cortadura, desgarro o tracción con desgarro, y por tanto debe ser rechazado. En cambio, un valor elevado de este ratio conduce a fallos por compresión local, cuyo carácter no catastrófico lo convierte en preferible. Es importante tener en cuenta que el aumento indefinido del ratio e/d , no conduce a un aumento igualmente indefinido de la resistencia a compresión local, sino que llega un momento en el que ésta se torna constante (Stellbrink, 2001). La obtención de un ratio e/d adecuado es más fácil de alcanzar que un ratio d/b adecuado. Ello se debe a las dimensiones necesarias inferiores para lograr el primer objetivo y a las configuraciones típicas de las uniones, donde las longitudes de solape (que son las que dominan el parámetro e) suelen estar menos limitadas que los anchos “b”. Así pues, los métodos de fallo predominantes en la mayoría de las uniones prácticas son los de tracción y de compresión local.

La secuencia de apilado de las láminas del MC afecta de forma muy significativa al valor de la resistencia a compresión local. Aunque se trata de un parámetro controlado por los fabricantes de materiales compuestos y resuelto por estos de manera adecuada, es importante una breve mención de su importancia. Las variaciones de la secuencia de apilado, medida como porcentaje de capas colocadas a 0° , suponen cambios de resistencia muy acentuados. Un diseño correcto para uniones atornilladas no deberá poseer grandes concentraciones de capas a cero grados en las capas superficiales (McCarthy, 2002). Ello puede obligar a añadir láminas superficiales en las zonas atornilladas en los elementos realizados por pultrusión. Este es el caso de los elementos estructurales de MC, en los cuales habrá que reforzar localmente (en las zonas previstas para las uniones) los perfiles en las capas superficiales con láminas a 90° . Además, resulta necesario la definición previa del par de apriete de los tornillos, pues este también influye en las características resistentes de las uniones atornilladas de materiales compuestos. Existe una relación directa entre el par de apriete y la resistencia a compresión local. La resistencia aumenta con la magnitud del apriete (Turvey, 2004). En elementos de material compuesto el apriete excesivo puede provocar daños alrededor del agujero, pero habitualmente, el tornillo se pasa de rosca antes de deteriorar el material (Stellbrink, 2001). De todos modos, el posicionado de arandelas entre la cabeza del tornillo o la tuerca y el material compuesto, pueden prevenir este deterioro

Para el cálculo global de las uniones atornilladas existe un método recogido y desarrollado en la normativa española para estructuras de acero (NBE-EA 95). Este es de vigente aplicación (año 2005) para estructuras con elementos metálicos y tornillos de acero ordinarios, calibrados o de alta resistencia. La destrucción de una costura en una estructura metálica puede presentarse por aplastamiento de las paredes de la chapa contra el vástago del tornillo (lo que equivale al fallo por compresión local o aplastamiento en materiales compuestos). Esta equivalencia puede inducir al proyectista a buscar la solución fácil extrapolando el método

para tornillos de acero a los formados por MC. La forma de evaluar la tensión máxima a aplastamiento que es capaz de aguantar la unión para estructuras metálicas puede ser correcta para materiales isótropos diferentes del acero, como otros metales o algunos plásticos. Pero en el caso de los materiales compuestos, la naturaleza anisótropa de éstos y las características resistentes derivadas de su naturaleza laminar, provocan comportamientos peculiares que suponen un tratamiento particular de sus análisis mecánicos. Por este motivo, aunque los resultados de la aplicación del método para el acero en tornillos de MC no se aleje en demasía de la realidad, no puede ser aceptado como método de cálculo práctico fiable.

Al no poder usar el método de cálculo para uniones atornilladas de acero para el MC, aparece el problema de que no existe una normalización para los tornillos de MC. Ello implica la no existencia de un método teórico de cálculo normalizado. La solución pasa por aplicar métodos prácticos de cálculo desarrollados por empresas fabricantes de MC con el soporte técnico de equipos de investigación.

En párrafos anteriores se ha comentado que para cualquier unión de MC siempre se intentará que el primer fallo que se produzca (en caso de producirse) sea el de compresión local del tornillo. Para ello resulta vital el tipo de tornillo a utilizar. En la tabla siguiente (tabla 4.2), se pueden apreciar los valores de la tensión de agotamiento por aplastamiento para distintos tipos de tornillos:

Tabla 4.2. Valores de la tensión de agotamiento por aplastamiento (MPa)

Elementos de unión / materiales tornillos	Acero A-37	Acero A-42	Acero A-52	Viniléster reforzado con fibra de vidrio
Tornillos ordinarios	384	416		-----
Tornillos calibrados	480	520	720	-----
Tornillos de alta resistencia	720	780	1080	-----
Tornillos MC				240

Las diferencias entre la tensión de agotamiento por aplastamiento de los tornillos de acero respecto a los de MC, es muy grande. Debido precisamente a que las uniones deben diseñarse para que fallen por aplastamiento, esta diferencia de tensiones de agotamiento se presenta como un hándicap muy difícil de superar por parte de los tornillos de MC, con lo que puede suceder que no quede más solución que unir perfiles estructurales de MC mediante tornillos de acero.

4.3. Uniones soldadas

Las uniones soldadas se usan con cierta frecuencia en la unión de plásticos en general (Kagan, 2003). Es por ello que también se considera la posibilidad de su aplicación en la unión de elementos de MC. El objetivo principal de las uniones soldadas es la obtención de ensamblajes cuya zona de unión sea prácticamente inexistente. Es decir, transformar dos elementos a unir en uno solo, con propiedades iguales a un elemento individual que no haya sufrido el proceso de unión. Este método pretende ser posible mediante la fusión de las dos partes (pasando parte de los mismos de sólido a líquido para volver a solidificar posteriormente), y su consecutiva unión mezclándose los dos elementos formando uno solo. Si este proceso ideal fuera posible, sería, sin duda, muy adecuado para materiales compuestos. El hecho que dos elementos de MC se unan y

trabajen como uno solo es el resultado deseado en cualquier tipología de unión. Pero existen varios factores que impiden esta unión perfecta, y que convierten al método de unión soldada en una mala elección para su aplicación en las estructuras de materiales compuestos actuales.

En primer lugar, y como inconveniente más importante en su aplicación a ensamblaje de estructuras actuales, es la imposibilidad de utilizar este método en MC formados por matrices termoestables (las más usadas en la actualidad). Ello es debido a que sólo las matrices termoplásticas pueden llevarse a estado líquido mediante la aplicación de energía en forma de calor, y volver a recuperar sus características al enfriarse. Pero este es sólo un inconveniente por el momento, pues las matrices termoplásticas están siendo ampliamente estudiadas para sustituir a las termoestables, sus prestaciones mecánicas son muy parecidas y resulta posible un casi total reciclado de ellas (Miravete, 2000-1). Esta provisional imposibilidad actual de aplicación no supone un motivo para dejar de lado este método que va cobrando importancia a medida que también lo hacen las matrices termoplásticas.

Así pues, la imposibilidad de aplicación de este método en matrices termoplásticas, es un inconveniente para la aplicación de este tipo de uniones en las estructuras actuales, pero no es un factor que impida la ejecución de la unión perfecta en el futuro. Sí lo es, en cambio, la rotura de la continuidad de las fibras (Grimm, 1995). Un perfil individual pultruido presenta una continuidad total de las fibras en toda su longitud, dado que el proceso de fabricación así lo permite. Por otro lado, la unión de dos miembros distintos siempre presentará una zona de discontinuidad de fibras, aunque éstas se encuentren muy cerca las unas de las otras. Por este motivo se produce una pequeña sección débil en la unión. Una posible solución puede pasar por intentar paliar esta debilidad con la adición de fibras de altas prestaciones en la zona de unión, pero ello supone tan solo una disminución de esta debilidad, no la anula completamente.

Otro inconveniente que presentan las uniones soldadas para MC, que impide también la realización de la unión perfecta, es la dificultad de control del proceso de enfriado y solidificación del plástico cuando se trabaja en la intemperie (condición de trabajo habitual en construcción). Además, algunos de los métodos de soldadura utilizados son de difícil aplicación si no se realizan en el laboratorio, debido a las herramientas y otros utensilios que se utilizan. El perfeccionamiento de las técnicas puede solucionar este inconveniente o al menos disminuir sus efectos negativos con el paso del tiempo, posibilitando una más fácil aplicación del método de la soldadura in situ (Revuelta, 2004-1)..

Al enfrentar dos sólidos para realizar una unión soldada entre ellos, es necesario un método u otro de sujeción, según las características de la tecnología de unión utilizada. Así, en tecnologías en las que se lleva a la fusión una parte importante de los sólidos a unir, es necesario un sistema de sujeción muy sofisticado para que el polímero líquido no se desparrame. Ello dificulta todavía más la ejecución de la unión perfecta in situ, pues cuanto mayor sea la cantidad de polímero unido, más se asemejará el ensamblaje a una pieza única.

Aunque, tal y como se acaba de explicar, actualmente no es factible la utilización de la soldadura para unir elementos estructurales de MC, esta no se descarta a largo plazo, reduciéndose a medio o corto plazo para las uniones que no se consideren estructurales. Por este motivo, seguidamente se comentan de forma muy superficial los principales métodos de soldadura de plásticos que se pueden encontrar (Kenny, 2003).

El primer método a comentar es el de calentamiento en masa. En este se lleva gran parte de los materiales a unir a la fusión (no sólo la parte estricta de la soldadura) procediéndose posteriormente al enfriado y moldeado por presión de la unión mediante herramientas muy complejas. Esta técnica presenta serios problemas de aplicación en la construcción, donde lo interesante es el poder realizar la unión en la misma obra. La complejidad de las herramientas necesarias (con posibilidad de derrames de elementos líquidos) y las estrictas condiciones de enfriamiento de los materiales, convierten una obra de construcción en un entorno no adecuado para esta técnica.

El segundo método a comentar es el de calentamiento por fricción. Este se basa en utilizar la fricción entre los elementos a unir para calentar su superficie de contacto. Una vez llegado a la temperatura adecuada, se procede a su unión mediante la aplicación de presión. Existen diversas variantes de este método. Las más conocidas son la soldadura ultrasónica, la soldadura por rotación y la soldadura por vibración. La aplicación de este tipo de soldadura no es muy recomendable para MC en la construcción. En primer lugar el montaje necesario es muy complejo para realizar las uniones en la misma obra, y en segundo lugar, la fricción entre MC puede dañar seriamente a los propios materiales compuestos, deteriorando el laminado (llegando incluso a romper fibras).

El tercer método es la soldadura por calentamiento electromagnético. En esta se calienta sólo la parte de las piezas a unir mediante estímulos externos. Las variantes más conocidas son la soldadura por inducción, la soldadura por microonda y la soldadura con resistencia. Su aplicación en obra es potencialmente aceptable. Por último, el cuarto método es el de soldadura con las llamadas técnicas de dos etapas. Estas tienen en común que realizan un calentamiento de la zona a unir y precisan de un material exterior para realizar la soldadura. Este material exterior se puede usar sólo para calentar la unión y después extraerlo (soldadura por lámina), o bien puede ser un material de aportación a la unión (soldadura con gas). Su hipotética aplicación en la construcción es relativamente sencilla.

Aparte de los métodos indicados, se están desarrollando otros potencialmente aplicables al sector de la construcción. Concretamente el que mayor potencial presenta es el de la soldadura por láser. Esta técnica utiliza un haz de láser para derretir el plástico de la junta, procediéndose posteriormente al enfriado con la presión adecuada. Esta solución permite uniones muy precisas reduciendo las posibilidades de distorsión o daño al resto del material. Es una técnica cara que de momento sólo se desarrolla en laboratorio y bajo estrictas medidas de seguridad (Kagan 2003).

4.4. Uniones encajadas

Las uniones encajadas tienen como propósito principal eludir o minimizar la utilización de elementos discretos de unión o adhesivos, en el ensamblaje de dos elementos. Se trata, tal y como su nombre indica, de diseñar piezas preparadas para encajar las unas con las otras, procediéndose a su unión final. Hasta el momento sus aplicaciones más típicas comprenden las uniones de piezas de madera, plástico y en conexiones

de elementos electrónicos. La esencia de las uniones encajadas consiste en la obtención de formas especiales que logren la función de unión deseada.

Hasta el día de hoy, debido a la debilidad de los materiales en los que se utilizaban este tipo de uniones, no ha sido posible la aplicación a uniones estructurales. No obstante, con la aparición de los MC, o mejor dicho, tras su expansión, se han realizado estudios (Recasens, 2002) que persiguen utilizar uniones encajadas de materiales compuestos, denominadas “composite integral fit joint” (uniones CIF), para obtener sistemas de unión estructurales.

Una unión CIF puede definirse como una unión encajada entre dos o más componentes formados de MC. Las superficies de unión en contacto se mantienen íntegras a las de diseño y fabricación de cada uno de los componentes por separado. La unión se mantiene por interferencia material entre las superficies de contacto. Así pues, este tipo de unión difiere de otros métodos donde es necesario el aporte de un material adicional (como pernos o adhesivos), o el aporte de energía externa (como en uniones soldadas), para mantener las partes unidas una vez la configuración de la unión ha sido establecida. Ejemplos de las partes de una unión en una dimensión y otra en dos dimensiones empleando el método de unión CIF se observan en las figuras 4.9 y 4.10.

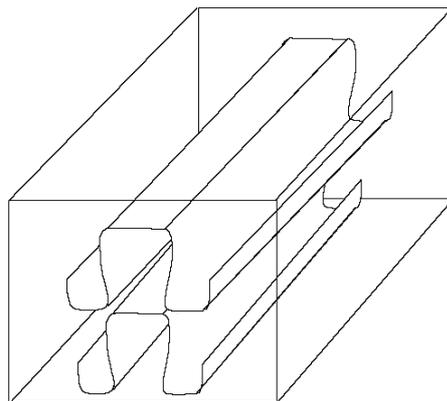


Figura 4.9. Unión CIF bidimensional

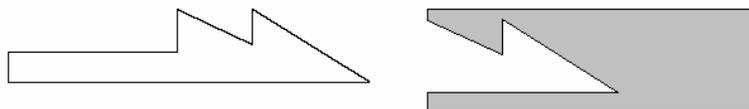


Figura 4.10. Partes de una unión CIF unidimensional

Esta tipología de uniones se está usando en la actualidad para materiales plásticos. Se utilizan en transportes, en elementos eléctricos, en todo tipo de electrodomésticos, muebles, etc. Las fuerzas de unión conseguidas son relativamente bajas con lo que sus aplicaciones no acostumbran a ser muy exigentes. La introducción de refuerzos de fibras en los polímeros implica una mejora sustancial de las propiedades mecánicas del material, permitiendo un aumento sustancial de las fuerzas de unión. Con la introducción de los materiales compuestos, que combinan la resistencia equiparable al acero con la facilidad de obtención de formas de los

plásticos, surge la posibilidad de la aplicación estructural de las uniones encajadas. Ello abre un potencial abanico de posibilidades de aplicación como por ejemplo las uniones entre elementos estructurales de un edificio industrial. A las uniones CIF con aplicaciones en la construcción se las conoce como uniones C-Locks (Lee y Hahn, 1997-2).

Para poder entender los usos potenciales de las uniones CIF es necesario conocer los elementos que constituyen la unión. En estas se pueden distinguir tres elementos o funciones (puede darse el caso que un mismo elemento tenga más de una función): elementos de inserción, elementos de sujeción y elementos de traba. Cada uno de estos elementos cumple una función específica, e indica el comportamiento necesario dentro de la unión para la ejecución de un encaje efectivo. Las definiciones de estos elementos son las siguientes:

- Elementos de inserción: Son las características geométricas y las propiedades materiales de estas características, correspondientes al elemento composite que es insertado en la región del ensamblaje, para unir un componente con el otro. La sujeción y la traba del elemento de inserción en el lugar determinado, constituyen la unión CIF.
- Elementos de sujeción: Son las características geométricas y las propiedades del material asociado a éstas, correspondientes al elemento composite que proporciona la fuerza de sujeción para formar la unión entre los componentes. Es el elemento o función que realmente transmite la carga de la unión una vez está esta realizada. Esta fuerza de sujeción debe ser vencida, si se pretende desensamblar la unión CIF.
- Elementos de traba: Son las características geométricas y las propiedades del material asociado a éstas, que aseguran que los elementos de inserción no puedan ser extraídos del elemento de sujeción, por eliminado de moción, por deflexión o por desalineado de la unión. Este elemento debe asegurar que el elemento de inserción no pueda salir de la zona de ensamblaje una vez la unión está trabajando. Estas características de traba deben ser superadas para desensamblar la unión.

Por ejemplo, en el caso de los componentes de la unión CIF unidimensional ilustrada en la figura 4.10, los elementos de unión pueden ser fácilmente identificados. El elemento de inserción es el elemento unidimensional en forma de cuchillo que se debe introducir; el elemento de sujeción y el elemento de traba, lo forman conjuntamente las características geométricas de las dos partes reflejadas en la figura 4.10, mediante la forma en diente de sierra de sus componentes. Gracias a esta forma, la unión no se puede desensamblar con facilidad (elemento de traba) y se pueden transmitir las cargas de la unión (elemento de sujeción).

Los elementos de unión básicos pueden ser clasificados según las diferentes direcciones espaciales en las que pueden ser resistidas las fuerzas de unión, o lo que es lo mismo, las direcciones en las que se transmite la carga en la unión. En elementos de inserción, el diseño de los perfiles puede ser muy simple y directamente fabricado utilizando procesos de fabricación como pultrusión, si el perfil está de acuerdo con los ilustrados en las figuras 4.11a y 4.11b. En el caso de elementos de inserción más complejos, como los de las figuras 4.11c y 4.11d, que combinan varios elementos básicos, los múltiples ejes de simetría y resistencia ante esfuerzos proporcionan un mayor desafío para fabricar componentes individuales y sus elementos de unión.

Es por ello que resulta necesario el realizar un diseño particular para cada caso concreto, no permitiéndose generalizar este tipo de uniones a soluciones más o menos estandarizadas (Lee y Hahn, 1998).

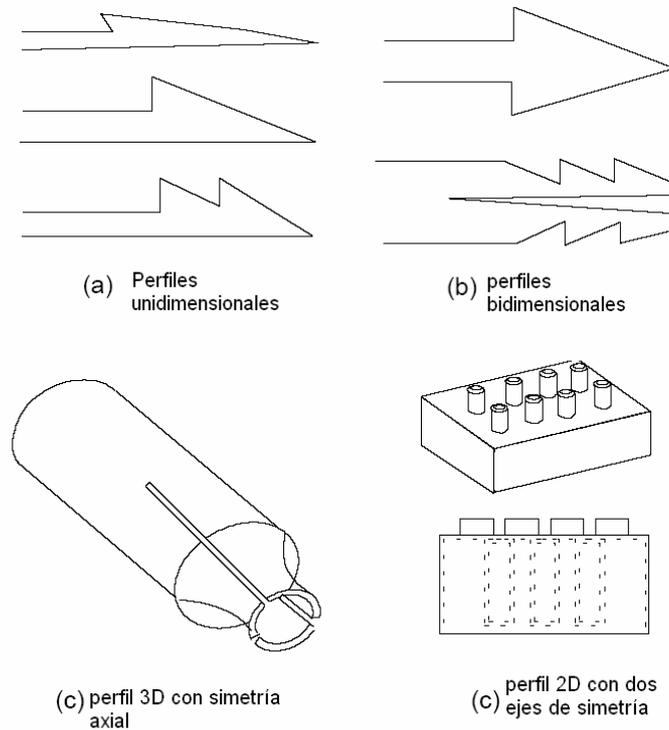


Figura 4.11. Tipos de elementos de inserción

Las propiedades mecánicas de las uniones tipo CIF tampoco pueden generalizarse, ya que existen infinidad de diseños y configuraciones posibles para cada ensamblaje. Así pues, la resistencia de cada unión CIF debe ser evaluada individualmente, dependiendo de su geometría y del material utilizado. Esta evaluación puede realizarse mediante programas informáticos basados en métodos numéricos como los elementos finitos. Esta solución implica que el proceso de cálculo para cada unión sea tedioso y con una inversión de tiempo relativamente grande. Ello es normal si se considera que esta técnica aplicada a los MC es muy reciente y su estudio es muy precario (Recasens, 2002).

Tal y como se ha comentado, las uniones CIF dependen en gran medida de la geometría otorgada a cada uno de los componentes de la unión, y por tanto, para cada aplicación se precisará una geometría determinada. Así pues, para aplicaciones estructurales de edificios industriales, se debería buscar una geometría determinada para obtener un ensamblaje efectivo. Para que esta tipología de unión de MC sea competitiva, se deben estandarizar soluciones facilitando en gran medida su cálculo y su control. Por este motivo se concluye que no resulta viable la aplicación de estas tipologías de uniones para elementos estructurales de edificios industriales en la actualidad, aunque no se descartan para un periodo de tiempo relativamente lejano (medio plazo).

Clasificación de las uniones C-Locks

Las C-Locks pueden ser clasificadas en base a múltiples criterios (Lee y Hahn, 1998). Los más importantes son en función de: a) los tipos de carga que suelen encontrarse en la región de la unión, b) las secciones de los perfiles a unir, c) la forma del propio C-Lock, d) el material de los perfiles a unir, e) el material de composición de las propias C-Locks. Según los tipos de carga, las C-Locks pueden dividirse en C-Locks para cortante, para tracción, para compresión, para torsión y C-Locks multiaxiales.

Según las secciones de los perfiles a unir, las C-Locks pueden dividirse en:

- C-Locks pares (si los perfiles a unir son de la misma sección y dimensiones)
- C-Locks semi pares (si los perfiles a unir son de la misma sección, pero con dimensiones distintas)
- C-Locks dispares (si los perfiles a unir tienen secciones y dimensiones distintas)
- Según la forma de los C-Locks, estos pueden dividirse en:
 - C-Locks intraperfil (si el elemento de inserción del C-Lock se introduce dentro de los perfiles a unir. Este tipo de C-Lock solamente puede utilizarse con perfiles huecos).
 - C-Locks perfilados: (si la unión C-Lock tiene una forma compatible con los miembros a unir de modo que ayude al encaje entre ellos).
 - C-Locks interperfil: (si la unión C-Lock envuelve a los perfiles a unir).

De acuerdo con los materiales de los perfiles a unir, las C-Locks pueden ser:

- C-Locks para uniones composite/composite
- C-Locks para uniones composite/no composite
- C-Locks para uniones no composite/no composite (aunque no serían propiamente uniones CIF)

Finalmente, la unión C-Lock poseerá diferentes características en función de la composición del composite utilizado. De este modo, pueden obtenerse C-Locks con multitud de propiedades físicas, químicas o mecánicas.

4.5. Propiedades constructivas de cada técnica de unión

El comportamiento resistente de cada tipología de unión se analiza en capítulos posteriores sobre uniones concretas de edificios industriales. En este apartado se incluye una comparación a nivel de propiedades constructivas (no estructurales) de las distintas soluciones de uniones sin considerar las prestaciones resistentes. Son aspectos catalogados como secundarios en frente del estructural, pero que en muchas ocasiones pueden acabar de decidir la mejor selección de la tipología de unión para cada unión en particular. Así pues, la resistencia superior de una de las técnicas respecto las demás, no la convierte en única candidata para transmitir las cargas entre elementos de un edificio industrial, ya que no siempre se requerirán niveles de resistencia que solamente puedan ser cumplidos por ella. Existen otros aspectos, que aunque de menor importancia, deben ser analizados y en algunas ocasiones pueden terminar de perfilar una decisión sobre la selección del mejor método de unión. En la tabla 4.3 se analiza la resistencia a la intemperie, la resistencia al

agua y la resistencia a las elevadas temperaturas de cada tipo de unión, estudiándose en capítulos posteriores la resistencia, el tiempo y los costes de ejecución de unión.

Tabla 4.3. Comparación no estructural.

	Resistencia a Temperaturas elevadas	Resistencia a agentes ambientales	Resistencia al agua
Unión atornillada con tornillos metálicos.	Presentan resistencias a la temperatura muy superiores al resto de técnicas de unión. Pero de todos modos, ésta se ve limitada por el material que forma la estructura. Para poliéster reforzado será de unos 100°C	Aunque existen recubrimientos en forma de pinturas y sprays, los tornillos, como cualquier elemento metálico, son susceptibles de ser atacados por agentes corrosivos	Los tornillos metálicos, a pesar de los recubrimientos que actúan como retardantes de lo inevitable, llegan a oxidarse en presencia del agua.
Unión atornillada con tornillos composite.	Este parámetro dependerá del material compuesto utilizado para la fabricación de los tornillos. Este material suele ser viniléster reforzado con fibra de vidrio, que a pesar de no ser el material compuesto con mayor temperatura de utilización, ésta es muy similar a la de la propia estructura. Unos 100° aproximadamente.	Del mismo modo que los MC a unir, presentan muy buena resistencia a agentes corrosivos ambientales típicos.	La resistencia al agua de los tornillos composite es excelente
Unión adhesiva	Dependiendo del adhesivo elegido, se puede llegar a temperaturas de hasta 316°C sin pérdida notable del resto de propiedades. No obstante, los adhesivos estructurales típicos como los epoxi y los acrílicos presentan temperaturas de operación entre -54°C y 82°C con un máximo de 135°C, y de -21,85°C a 149°C con un máximo de 204 °C respectivamente.	El adhesivo estructural por excelencia, es decir el adhesivo Epoxi, presenta una resistencia a agentes corrosivos excelente. Los acrilatos también ofrecen muy buena resistencia a estos agentes, pero inferior que los epoxi.	El adhesivo estructural por excelencia, es decir, el adhesivo epoxi presenta muy buena resistencia al agua Los acrilatos también ofrecen buena resistencia al agua, pero inferior a la de los epoxi.
Unión encajada	Presentan la temperatura de utilización de su material compuesto constituyente. En el caso de que se construyan con Epoxi reforzado con fibra de carbono, será de unos 110°C, si en cambio están formados por poliéster reforzado, será de unos 100°C.	Del mismo modo que los materiales a unir, presentan muy buena resistencia a agentes corrosivos ambientales típicos.	Al unir elementos formados de PRFV, la resistencia al agua es excelente
Unión atornillada con tornillos metálicos + adhesiva	La unión adhesiva es el elemento limitante	La unión atornillada es el elemento limitante	La unión atornillada es el elemento limitante
Unión atornillada con tornillos composite + adhesiva	La unión atornillada es el elemento limitante	Los tornillos y el adhesivo presentan comportamientos muy similares ante agentes corrosivos	Los tornillos y el adhesivo presentan comportamientos muy similares ante la presencia de agua
Unión encajada + adhesiva	La unión encajada es el elemento limitante	Los elementos a encajar y el adhesivo presentan comportamientos muy similares ante agentes corrosivos	Los elementos a encajar y el adhesivo presentan comportamientos muy similares ante la presencia de agua

De la tabla 4.3, se puede concluir que la técnica adhesiva y la técnica encajada son las que presentan mejores propiedades constructivas (no estructurales), seguidas de la atornillada con tornillos composite y atornillada metálica. Es importante puntualizar que todos estos factores pueden ser mejorados gracias a recubrimientos, cargas y aditivos, pero esta comparación se ha querido enfocar desde la naturaleza propia del material que corresponde a los elementos de unión.