

3. Diseño de uniones adhesivas

3.1 Principios básicos. ⁽³⁾⁽⁷⁾

Una unión mediante adhesivos debe ser diseñada de tal forma que el adhesivo trabaje sometido a cargas de cortadura todo lo posible, evitando esfuerzos de pelado que son los que peor soporta. Los esfuerzos de tracción son aceptables pero peligrosos, pues cualquier pequeña desviación en la línea de aplicación de las cargas, se traduce en la aparición de momentos flectores, que someten al adhesivo, a indeseables esfuerzos de pelado.

Para obtener una máxima eficacia de los adhesivos, las uniones adhesivas deben ser específicamente diseñadas. Para lograr una máxima efectividad, las uniones adhesivas deben ser diseñadas de acuerdo con los siguientes principios generales:

-El área pegada debe ser tan grande como sea posible, dentro de lo permitido por la geometría de la unión y las limitaciones de peso.

-Un porcentaje máximo del área pegada debe contribuir a la resistencia de la unión.

-El adhesivo debe estar solicitado en la dirección de su máxima resistencia.

-La tensión debe ser mínima en la dirección en la que el adhesivo sea más débil.

En el diseño de uniones específicas para la utilización de adhesivos, las características básicas de estos deben imponer la planificación de diseño, teniendo en cuenta que una unión adhesiva actúa sobre un área, no sobre un punto. La unión debe ser diseñada de tal forma que se minimice la concentración de tensiones.

Es necesario también, evaluar algunos factores adicionales cuando se contempla el uso de adhesivos. Entre otros, se deben considerar los siguientes:

-El adhesivo debe ser adecuado para los sustratos.

-Compatible con los métodos de producción.

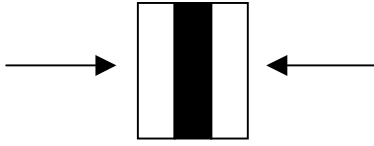
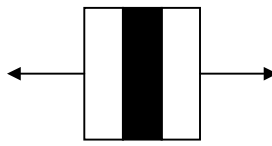
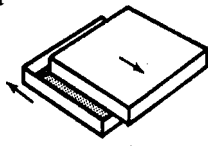
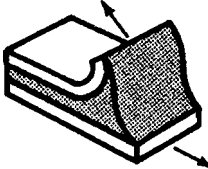
-Transmitir las cargas de trabajo previstas.

-Y resistir los ambientes a que estará expuesto.

También es preciso considerar la preparación de las superficies, los métodos de aplicación y los sistemas de curado, así como el tiempo y el coste de estos aspectos de la unión.

Resumiendo, el diseño de la unión se considera el parámetro más importante para obtener el mayor rendimiento del adhesivo elegido. El diseño debe ajustarse a los límites de aplicación del adhesivo (p.ej. profundidad de curado, relleno de holguras, tiempo de vida útil, etc.) y optimizarse para evitar las cargas más severas sobre una unión (pelado, desgarro).

3.2 Tipos de sollicitación.⁽³⁾⁽⁴⁾

Tipos de sollicitación	
<p>Compresión</p> 	<p>Los esfuerzos de compresión son producidos por fuerzas perpendiculares al plano de unión y producen un acortamiento en el sentido en que se ejercen. Quizás sean los que den menos probabilidades de fallo. Aún así, es un tipo de unión que tiene aplicaciones limitadas.</p>
<p>Tracción</p> 	<p>Los esfuerzos de tracción, se producen cuando fuerzas exteriores actúan perpendicularmente al plano de unión, en el sentido que tienden a alargar la probeta. Cuando las fuerzas se distribuyen uniformemente sobre la sección, estas uniones por adhesivos tienen buenas resistencias a tracción, porque todo el adhesivo contribuye a la resistencia de la unión. Pero si la carga aplicada está concentrada en algún punto de la superficie la resistencia de la unión no será uniforme y se crearán tensiones que conducirán a la rotura.</p>
<p>Cortadura</p> 	<p>Las tensiones se producen en este caso, paralelas al plano de unión. En los esfuerzos de cortadura distribuidos uniformemente sobre la unión adhesiva, toda la superficie unida resulta cargada simultáneamente.</p>
<p>Pelado</p> 	<p>Este tipo de esfuerzos se presenta, cuando uno de los sustratos es flexible en comparación con el otro. El efecto de pelado es aplicar una tensión muy alta en el borde de la unión, y con ella se produce la rotura de la unión. Es quizás donde se encuentra la mínima resistencia de las uniones adhesivas.</p>

Al diseñar una junta adhesiva, se pretende conseguir que la distribución de tensiones sea lo más uniforme posible. Por tanto es necesario conocer cómo se distribuyen las tensiones en la unión adhesiva sometida a una fuerza.

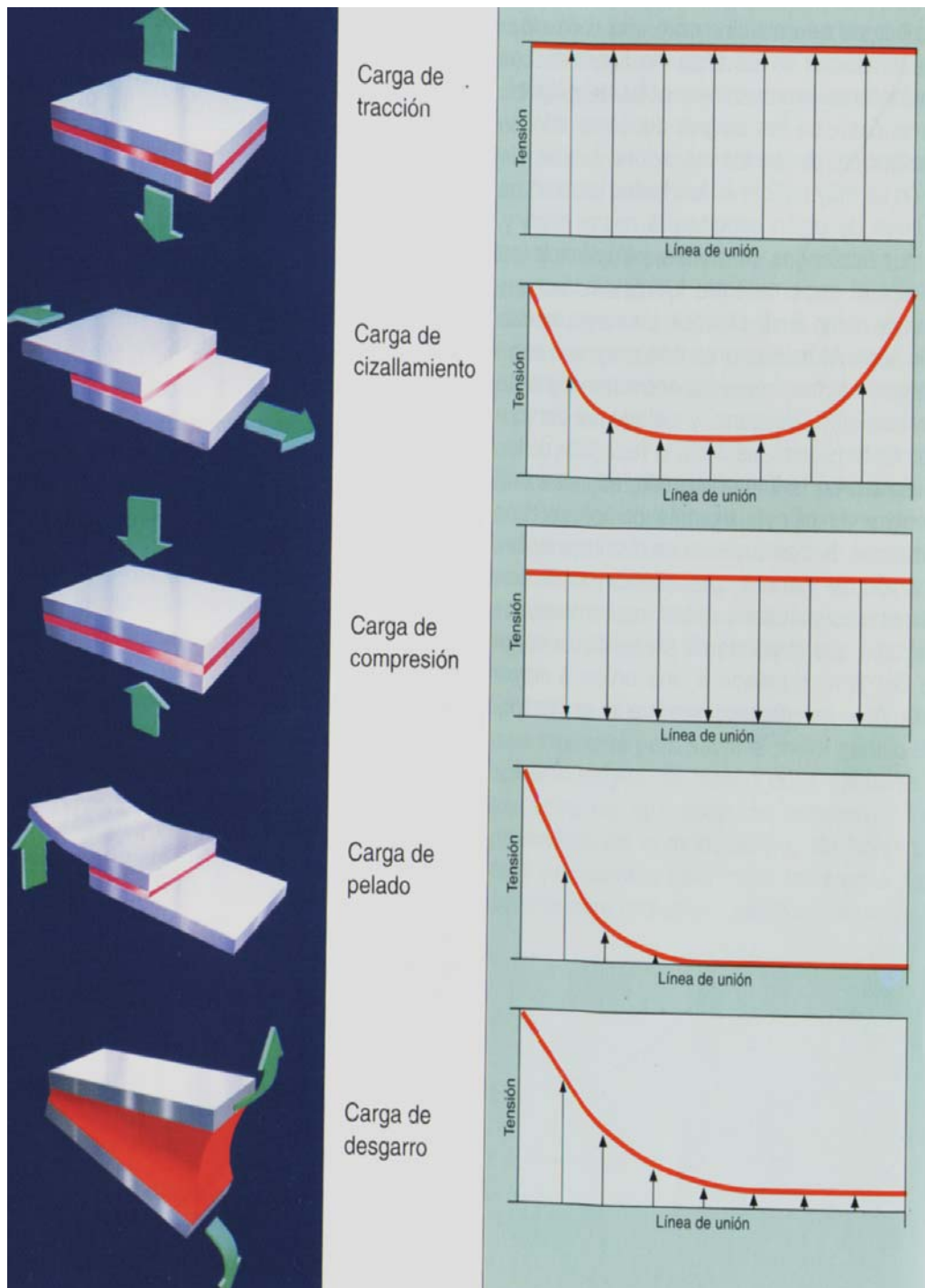


Figura 3.1 Tipos más comunes de cargas y su distribución de tensiones a lo largo de la línea de unión.

A la hora de realizar una unión adhesiva las tensiones que aparecen son mas complicadas que las definidas, dando lugar a juntas que están sometidas a distintos tipos de esfuerzos simultáneamente.

Así, además de la clasificación realizada anteriormente, los esfuerzos mecánicos se clasifican según su valor y duración en:

- Esfuerzos transitorios.
- Esfuerzos estáticos o permanentes.
- Esfuerzos dinámicos.
- Esfuerzos combinados.

3.2.1 Esfuerzos transitorios.

Los esfuerzos transitorios son consecuencia de un incremento único del esfuerzo hasta una carga máxima. Son aislados y ocasionales, y aunque por ello, puedan parecer de menor importancia, esto no es así. Estos esfuerzos, son los que se aplican en la fase de diseño, para determinar las resistencias nominales de los adhesivos.

3.2.2 Esfuerzos estáticos o permanentes.

Los esfuerzos estáticos o permanentes son esfuerzos constantes que se prolongan a lo largo del tiempo.

Si el esfuerzo actúa en una dirección durante un tiempo prolongado, puede producirse un fenómeno de fluencia. Esto conduce a un desplazamiento relativo de los elementos de unión, sin necesidad de incrementar la fuerza aplicada. Debido a este fenómeno, en el interior de la unión adhesiva, la cohesión se irá reduciendo progresivamente bajo la acción de una fuerza hasta que las moléculas comienzan a deslizarse unas sobre las otras. La consecuencia es una deformación plástica, no apreciable si no se dispone de aparatos de medida de precisión. Este fenómeno presenta una dependencia directa, con la temperatura.

Los fenómenos de fluencia, pueden eliminarse si escogemos adecuadamente los adhesivos. Un diseño correcto permite prevenir los fenómenos de fluencia o, al menos, reducirlo a límites admisibles.

3.2.3 Esfuerzos dinámicos.

Se distinguen dos tipos de ciclos de sollicitación dinámica:

- Regulares (vibratorios).
- Irregulares (impactos).

En el caso de un esfuerzo alternativo regular, el adhesivo tiene que absorber la energía de deformación. Esto puede provocar la fatiga del material, la cual puede desembocar en el fallo de la unión adhesiva.

Cuando se trata de esfuerzos regulares o repetidos periódicamente y acompañados de ciclos bruscos, la elección del adhesivo, es más complicada. En estos casos, hay que realizar ensayos comparativos teniendo en cuenta la aplicación que se prevé, o encomendarse a un cálculo de resistencia basado en valores conocidos de la resistencia permanente, afectados por coeficientes de seguridad.

El cálculo y diseño de ensamblajes adheridos que tengan que soportar esfuerzos dinámicos, obligan en cualquier caso, al conocimiento de las propiedades de resistencia a la fatiga del adhesivo.

En el caso de impactos, las consecuencias sobre una determinada unión adhesiva dependen de forma directa de la naturaleza de los sustratos. Al margen de las deformaciones que se puedan provocar sobre los sustratos, el impacto produce una onda de compresión, que se transmite por las diferentes partes del conjunto, dependiendo de la capacidad de absorción de energía de los materiales que componen los sustratos.

Los esfuerzos transitorios, los esfuerzos estáticos y los esfuerzos cíclicos permiten cálculos de resistencia simples y pueden solucionarse mediante un buen diseño. Los conocimientos y experiencias adquiridas en la construcción ayudan mucho a la búsqueda de soluciones.

3.3 Tensiones internas. ⁽³⁾

Las uniones adhesivas, tienen la característica de unir sustratos diferentes al adhesivo. Esto puede causar tensiones adicionales en la unión, derivados de los diferentes coeficientes de dilatación, de ambos materiales. Debido a estas diferencias, los adhesivos que requieren temperaturas de curado superiores a la temperatura ambiente, una vez curados se enfrían, y las diferencias en los coeficientes de dilatación originan deformaciones térmicas que derivan en tensiones internas en la unión. En este tipo de uniones existen otros fenómenos, tales como evaporación de disolvente, reacciones de polimerización, etc. Pueden ir acompañados también de contracciones de volumen.

Estas tensiones internas, llamadas residuales son difíciles de calcular analíticamente; por esta razón se emplean métodos fotoelásticos en su estudio. Como ejemplo, se muestra en la figura siguiente, el estudio fotoelástico de una probeta a solape simple.



Figura 3.2 medida de tensiones por celdas fotoelásticas.

En la práctica, la mayoría de los análisis sobreestiman tales tensiones, pues la mayoría de los adhesivos son elásticos y no hay que tener en cuenta la relajación de tensión del adhesivo. Sin embargo, cuando tales tensiones son perjudiciales, técnicas como el empleo de un adhesivo más flexible, el uso de mayor espesor en la capa de adhesivo, la utilización de una temperatura de endurecimiento más baja y la utilización de un ciclo de enfriamiento más largo y lento, pueden ser empleadas para eliminar el problema.

3.4 Consideraciones en el diseño de uniones típicas.

Existen numerosos tipos de uniones posibles, algunos tipos más usuales son los que se exponen brevemente y son quizás, los mas usados y conocidos:

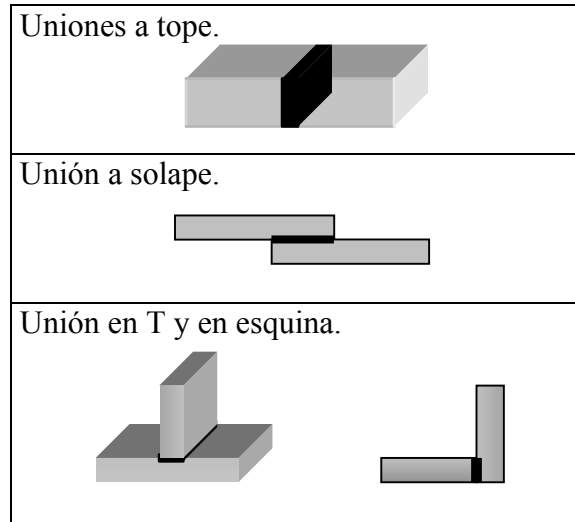


Figura 3.3 Uniones adhesivas típicas.

Aunque el modo de clasificar los tipos de uniones adhesivas es muy diverso según el enfoque que se pretenda seguir.

Vamos pues, a ver brevemente las características principales de algunos tipos de uniones para así poder estudiar los inconvenientes y poder mejorar la resistencia mecánica de las mismas.

3.4.1 Uniones adhesivas a tope.

Las uniones a tope resisten considerablemente los esfuerzos de tracción y compresión. Con el inconveniente de que si la carga se desalinea respecto al eje de revolución se puede producir el desgarro de la unión. Este tipo de unión se mejora biselando las caras de unión y así se reduce la posibilidad de desgarro y se incrementa el área de unión.

Cuando no es posible biselar se puede usar cubrejunta para asegurar la zona de unión, aunque a veces esto no es posible por consideraciones de diseño.

Los tipos de uniones a tope típicos, se muestran en la figura siguiente:

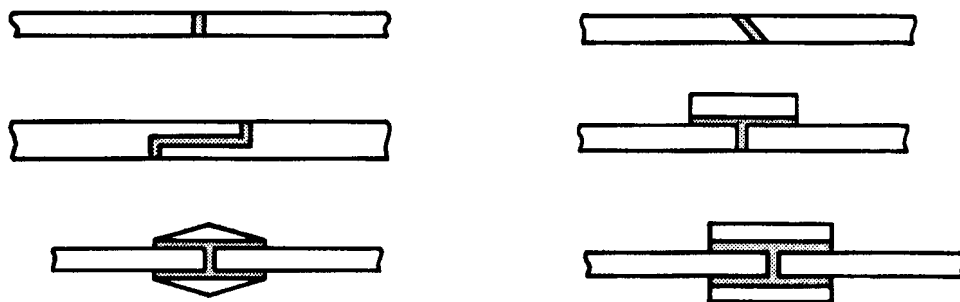


Figura 3.4 Uniones adhesivas a tope.

Dentro de las uniones a tope encontramos las uniones tubulares. Estas uniones se ven solicitadas igual que las uniones a tope, existiendo variaciones de diseño debidas a la geometría del tubo. A continuación se muestran los tipos de uniones tubulares, con algunas variantes de diseño.

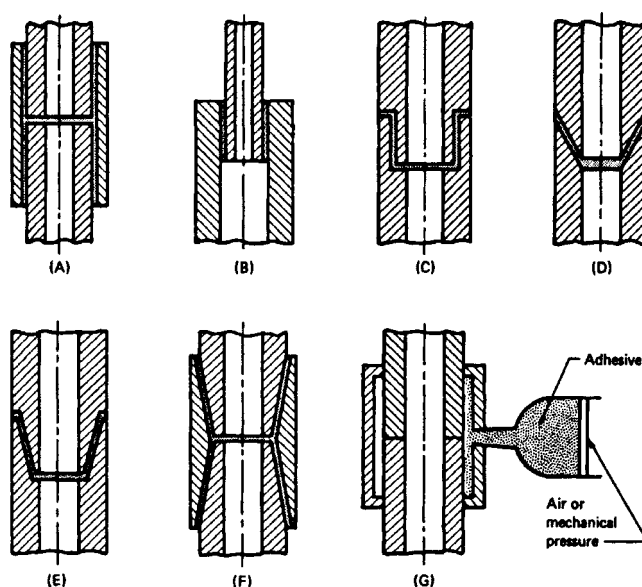


Figura 3.5 Uniones adhesivas tubulares.

3.4.2 Uniones adhesivas a solape.

Las uniones a solape, son las mas usadas al unir mediante adhesivos, pues son uniones sencillas de realizar y además, permiten unir materiales de espesores pequeños.

Como se indicó anteriormente, las uniones adhesivas tienen su máxima resistencia frente a los esfuerzos de cortadura, y en las uniones a solape, las cargas a tracción, solicitan la unión a cortadura.

Estas uniones son las que trabajan en la dirección de máxima resistencia del adhesivo, pero, aún así, sufren concentración de tensiones debido a la desalineación de las cargas, que ejercen efectos perjudiciales sobre la unión. Produciendo momentos flectores sobre los substratos que distorsionan la unión y producen efectos de desgarro.

Debido a la desalineación de las cargas, se produce una concentración de tensiones en las zonas finales de la unión, que son las iniciadoras de la rotura o desgarro. Existen distintas soluciones, que pueden mejorar la resistencia de las uniones. Estas soluciones introducen variantes en el diseño tanto de la zona de unión como en los espesores de los substratos, veámoslas:

-Diseñar la unión de forma que los esfuerzos estén alineados, evitando la distorsión de los adherentes.

-Rigidizar los substratos ó adherentes, para evitar los esfuerzos de desgarro. Esta rigidización puede producirse con un aumento de los espesores en los substratos o adherentes, cuando sea posible en las zonas de unión, para no hacer excesivo el peso final. Como se muestra en la figura.

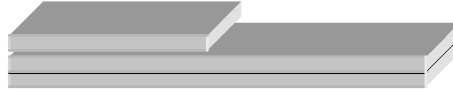


Figura 3.6 Aumento de espesor en el borde de la unión

-Flexibilizar los bordes de los substratos en la zona de unión, biselándolos por ejemplo, para que se adapten mejor, y se minimicen los esfuerzos de pelado.

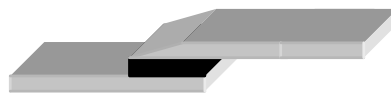


Figura 3.7 Biselado

Cuando por necesidades de diseño, la unión se ve solicitada a elevados esfuerzos de pelado, hay que recurrir a soluciones que logren impedir el movimiento en los bordes de la unión. Esto se puede conseguir como se ha dicho rigidizando los substratos, aumentando el área de unión en los bordes mediante un doblez generando un anclaje mecánico, o con uniones híbridas remachando ó con un punto de soldadura cuando sea posible. Estas posibles soluciones se muestran a continuación.

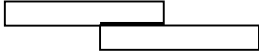

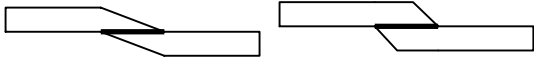
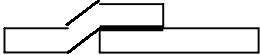

UNIONES SIMPLES	UNIONES REFORZADAS
Unión a solape simple. 	Unión a solape doble. 
	Unión a solape biselada. 
	Unión a solape. 
	Unión a solape con mecanizado. 

Figura 3.8 Uniones adhesivas a solape.

3.4.3 Uniones adhesivas en T y en esquina.

En este tipo de uniones son susceptibles de esfuerzos de desgarro o pelado, pues al ser uniones a tope, la concentración de esfuerzos es inevitable.

Para poder mejorar la resistencia de este tipo de uniones, se suele recurrir a soluciones de diseño, aumentando las áreas de unión, haciendo las uniones a tope en doble ángulo recto y otras que emplean escuadras y elementos que aumentan las áreas de unión y la rigidez del conjunto, para evitar los esfuerzos de flexión. Como se dijo, en algunas ocasiones se combinan las uniones mediante adhesivos con otros elementos de unión como remaches, puntos de soldadura entre otros, formando las conocidas uniones híbridas, esto también ocurre en este tipo de uniones.

En las uniones de este tipo, los esfuerzos transversales son muy peligrosos, pues producen esfuerzos de desgarro y de pelado. Los esfuerzos normales, de tracción, también son considerables pero los más peligrosos dentro de los esfuerzos normales, son los esfuerzos de compresión que pueden provocar el pandeo del perfil y la aparición de momentos flectores.

A continuación se muestran algunos tipos de uniones en ángulo, en T, en esquina, con algunas de las variaciones que se pueden aplicar cuando las condiciones lo permiten, que mejoran las propiedades mecánicas de la unión.

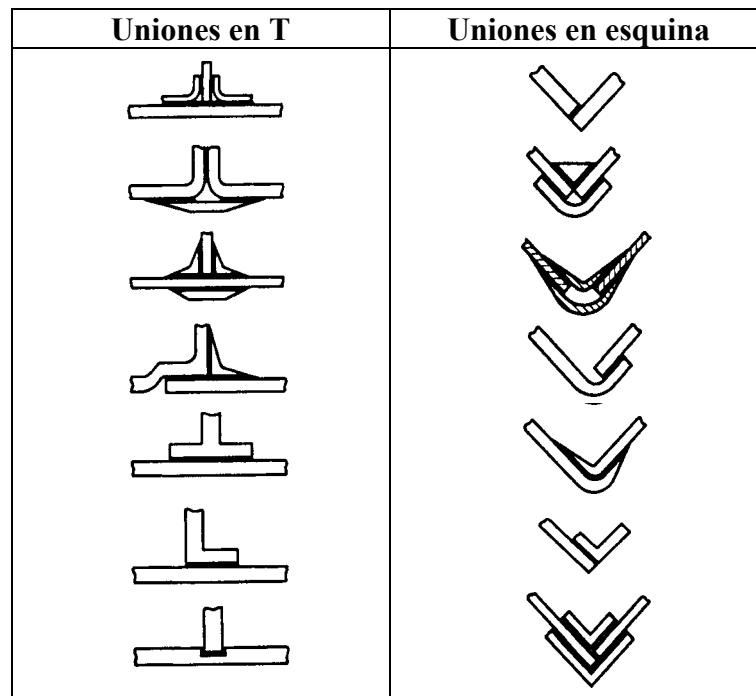


Figura 3.9 Uniones adhesivas en T y en esquina.

3.5 Mecanismos de fallo de las uniones adhesivas. ^{(1) (8)(9)}

Como se vio, el mecanismo de una unión adhesiva depende de la fuerza de unión entre el sustrato y el adhesivo (adhesión) y de las fuerzas internas del adhesivo (cohesión). Además, la función principal de una unión adhesiva estructural es transmitir una carga externa a los demás miembros estructurales. Si la unión no es capaz de transmitir la carga de una manera adecuada, sufrirá un daño que posiblemente desembocará en el fallo de la unión.

Así, las uniones por adhesivo pueden fracasar adhesiva o cohesivamente. La evaluación de la unión adhesiva una vez producida la fractura puede desvelar fallos que hayan sido producidos por un tratamiento inadecuado de las superficies a unir, por una falta de cohesión del adhesivo debida a una mezcla inadecuada ó incluso por un curado inadecuado, en el que el adhesivo no haya alcanzado las propiedades mecánicas deseadas.

Cuando en el estudio de una unión adhesiva, se trate de determinar las condiciones en que fallará un elemento estructural hay que tener en cuenta la posible existencia de defectos. Los poros, huecos y grietas son defectos intrínsecos del propio material y derivados de los métodos de fabricación de la unión.

En el caso de las grietas se pueden encontrar en la interfase del adhesivo sustrato y originará un desgarro de la unión, produciendo la rotura adhesiva. Pero también encontramos grietas en el adhesivo, que pueden romper los enlaces cohesivos del material y romper la unión. Los poros suelen ser derivados del proceso de aplicación del adhesivo y, aunque por su diminuto tamaño puedan parecer aceptables cuando la unión es solicitada a esfuerzos continuos o cíclicos, pueden ser muy desfavorables.

Cuando el fallo de la unión es adhesivamente, es decir, despegue del adhesivo del sustrato, es importante prestar una especial atención al proceso de fabricación de la unión. En algunas ocasiones un tratamiento inadecuado de los sustratos es la causa del fallo de la unión.

También ocurre que no hay adhesión debido a las reacciones químicas que se producen entre el adhesivo y el sustrato, en estos casos se precisa de imprimaciones para mejorar la adherencia. Así, cada unión debe ser proyectada para unas condiciones específicas, pues lo que en unas ocasiones puede ser causa de fallo, en otras puede ser aceptable sin afectar a la resistencia real de la unión.

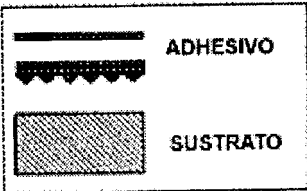
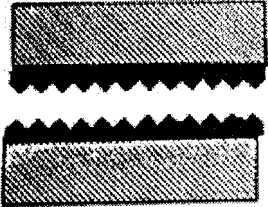
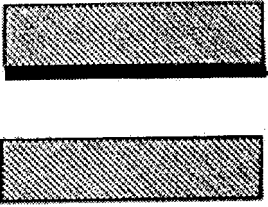
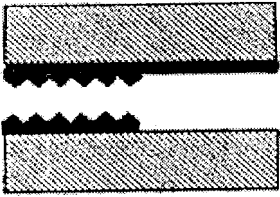
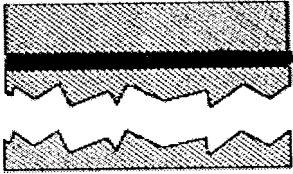
Los posibles modo de fallo que se pueden presentar en las uniones adhesivas, pueden resumirse en tres posibles modos de fallo:

-Fallo adhesivo: Es el fallo de la unión de las interfases entre el sustrato y el adhesivo.

-Fallo cohesivo: Se produce cuando la fractura es en el adhesivo, rompiéndose las fuerzas de cohesión del mismo.




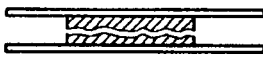


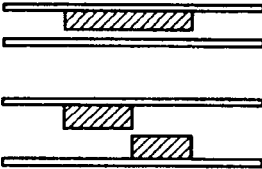
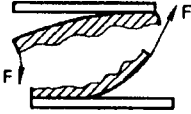
-Fallo del sustrato: en algunos casos se produce la rotura en el sustrato antes que en la unión adhesiva.

Veamos los principales tipos de fallo en uniones adhesivas, en la siguiente tabla:

Tipo de fallo	
 <p>ADHESIVO</p> <p>SUSTRATO</p>	<p>Fallo cohesivo Rotura cohesiva del material de unión Este tipo de rotura es la más deseable.</p> 
	<p>Fallo adhesivo Separación en la interfase sustrato adhesivo Este tipo de rotura es el más desfavorable y el menos deseable.</p>  <p>Es muy difícil predecir en que casos ocurrirá la rotura adhesiva, pues lamagnitud de las fuerzas de adherencia depende de numerosos factores, y difícilmente se pueden controlar en su totalidad.</p>
	<p>Fallo 50 %cohesivo – 50 %adhesivo</p>  <p>Este tipo de rotura es débil y se puede considerar como intermedia entre los dos tipos de rotura anteriores.</p>
	<p>Fallo del sustrato</p>  <p>En este tipo de rotura el sustrato falla antes que el adhesivo y se deduce que el adhesivo ha sido sobredimensionado. Este tipo de rotura puede desembocar en colapsos de la estructura muy peligrosos debido al uso de un adhesivo inadecuado.</p>

En la norma UNE-EN ISO 10365, Designación de los principales modelos de rotura, encontramos la siguiente designación de los principales modelos de rotura de juntas adhesivas, ilustradas mediante diagramas sus principales formas de presentación, tal y como se muestra a continuación.

Designación de los modelos de rotura

Modelos de rotura	
Sustrato	 <p>Rotura de uno o ambos sustratos (Rotura de sustrato)</p>
	 <p>Rotura en un sustrato (Rotura cohesiva de sustrato)</p>
	 <p>Rotura por deslaminación</p>
Adhesivo	<p>Tipos de roturas cohesivas</p>  <p style="margin-left: 200px;">Rotura cohesiva</p>
	
	
	<p style="margin-left: 150px;">} Rotura cohesiva especial</p>
	 <p style="margin-left: 200px;">Rotura adhesiva</p>
	 <p style="margin-left: 200px;">Rotura adhesiva y cohesiva con pelado</p>