

1. INTRODUCCIÓN

1.1. *Los materiales compuestos y sus procesos de unión*

Como es bien conocido los materiales compuestos son unos materiales cada vez más usados en todos los aspectos, tanto a nivel cotidiano como a nivel industrial, véase el caso de la industria aeronáutica, los molinos eólicos, el sector de la automovilística, etc. Estos materiales, a pesar de ser más caros tienen unas propiedades mecánicas en relación con su peso excepcionales lo que hace que en determinadas situaciones sea rentable su uso.

Para las estructuras de materiales compuestos los dos procedimientos de unión más importantes son las uniones remachadas y las uniones adhesivas.

Para determinar qué tipo de unión resulta más adecuada se debe tener en cuenta las características de cada unión y valorar las ventajas e inconvenientes que cada una presenta. Un resumen de dichas propiedades se muestra a continuación:

- El adhesivo actúa como membrana aislante, mientras que los remaches no, este hecho hace que en las uniones remachadas se deban tener en cuenta los fenómenos de corrosión, mientras que en las uniones adhesivas no
- En las uniones adhesivas la distribución de tensiones es más uniforme que en las uniones remachadas, esto hace que las uniones adhesivas tengan un mejor comportamiento a fatiga
- Los diseños con uniones adhesivas son más ligeros que con uniones remachadas
- Si se necesita un acabado suave, en las uniones adhesivas no es necesario tomar ninguna precaución especial, mientras que en las otras es necesario un avellanado que origina una disminución de la sección resistente

- El adhesivo actúa también como membrana sellante, lo que garantiza la estanqueidad de la unión, mientras que con remaches es necesario añadir un agente estanco
- En muchos casos las uniones adhesivas son más baratas que las remachadas
- Para las uniones adhesivas se necesitan tratamientos superficiales, mientras que las remachadas no
- El empleo de algunos adhesivos hace necesario el uso de ciclos de curado con alta temperatura y presión, con el consiguiente encarecimiento de la unión
- Los adhesivos tienen peores comportamientos tanto a alta como a baja temperatura, así como a creep, que las uniones remachadas. A alta temperatura pierden toda su capacidad portante, mientras que a baja temperatura se vuelven excesivamente frágiles
- Algunos adhesivos son altamente inflamables y tóxicos
- Muchos adhesivos se degradan muy fácilmente con la radiación ultravioleta y en ambientes un poco adversos, lo que conlleva que necesiten una capa protectora

En la siguiente página se ilustran los tipos de uniones remachadas más comunes (Figura 1)¹ y uniones adhesivas a solape más utilizadas (Figura 2).

¹ Si desea profundizar en el estudio de los tipos de remaches y sus particularidades puede consultar: "Introducción al análisis y diseño con materiales compuesto", "Composite airframe structures".

Para un mayor estudio de las uniones adhesivas consultar: "Structural Adhesive Joints in Engineering" Robert D. Adams and William C. Wake

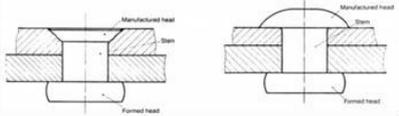
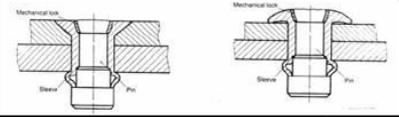
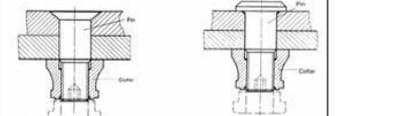
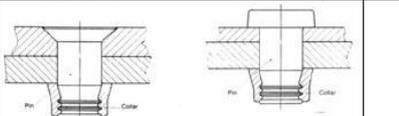
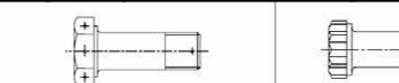
Fijaciones permanentes	Remaches sólidos	
	Remaches ciegos	
	Remaches roscados	
	Remaches estampados	
Fijaciones desmontables	Bulones	

Figura 1. Esquema de los remaches más utilizados

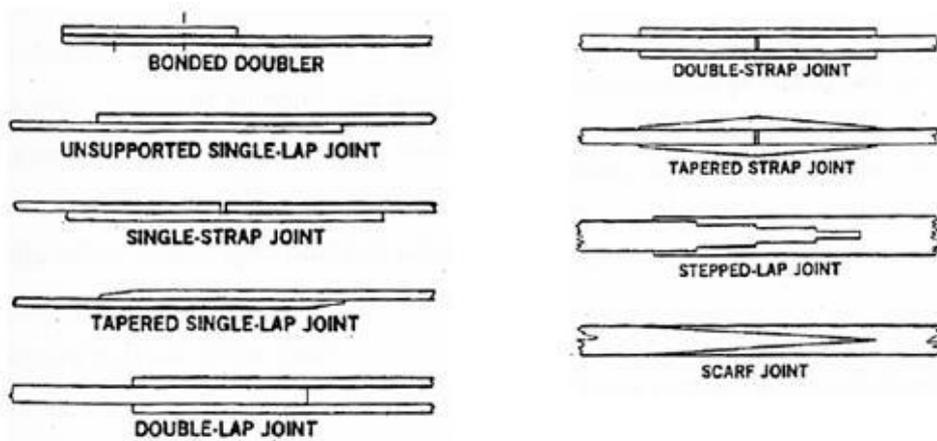


Figura 2. Tipología de las uniones adhesivas más comunes a solape

Posteriormente se hará un análisis con más profundidad de la unión a solape simple.

1.2. Tipos de adhesivos y ensayos de caracterización de adhesivos

Un adhesivo es aquella sustancia capaz de mantener unidas las superficies en contacto de dos sólidos, ya sean del mismo o de distinto material.

Actualmente, el uso de estos productos está aumentando rápidamente para todo tipo de aplicaciones, constituyendo una auténtica revolución de los métodos tradicionales para fijar y unir.

Procesos clásicos tales como soldadura y remachado están siendo sustituidos por procesos de encolado, principalmente desde la aparición de los modernos adhesivos sintéticos de tipo polímero, cuya utilización está hoy muy generalizada.

Se puede comprobar que la resistencia de una unión adhesiva no sólo depende del estado superficial de los adherentes y de lo correctamente que se haya realizado el encolado, sino también de las propiedades mecánicas de los adhesivos, es decir, de su módulo elástico, su resistencia, etc. Los adhesivos poliméricos tienen unas propiedades muy distintas a los materiales metálicos o a los materiales cerámicos porque su estructura atómica es muy distinta. Mientras en los materiales metálicos el módulo elástico aumenta conforme aumenta la fuerza necesaria para separar unos átomos de otros, en los polímeros el módulo aumenta conforme aumenta la fuerza necesaria para mover unas moléculas respecto a otras.

Con respecto a la resistencia de un metal, el fallo por rotura dúctil se producirá por deslizamiento de planos atómicos de unos con respecto a otros formando 45° con el plano perpendicular a la dirección de la carga, esto implica que en la rotura del metal están implicadas fuerzas interatómicas, fuerzas mucho más grandes que las fuerzas intermoleculares que están involucradas en la resistencia de un polímero.

En la siguiente gráfica se muestra una tabla con los principales tipos de adhesivos, con su forma estructural en el estado ya curado.

Monomer or groups of atoms, etc., curing agent if needed	Polymer structure (before curing)	Final structure
<p><i>Simple monomer</i> e.g. vinyl acetate $(CH_2=CH.OCOCH_3)$</p>	<p><i>Long regular chain</i> Polyvinyl acetate (PVA) $\left[\begin{array}{c} -CH_2-CH- \\ \\ OCOCH_3 \end{array} \right]_n$</p>	Unchanged
<p>Methyl cyanoacrylate $CH_2=C(CN).COOCH_3$</p>	<p>Poly cyanoacrylate $\left[\begin{array}{c} -CH_2-C(CN)- \\ \\ COOCH_3 \end{array} \right]_n$</p>	
<p><i>Simple monomer</i> Metal oxide or sulphur</p>	<i>Long regular chain</i>	Three dimensional, cross-linked by metal oxide or sulphur.
<p>e.g. Chloroprene $(CH_2=CCl-CH=CH_2)$</p>	<p>Polychloroprene $[-CH_2-CCl=CH-CH_2-]_n$</p>	There will be one cross-link between any two chains every, say, 100 carbon atoms.
<p><i>More complex monomer with functionality separated to both ends of a larger molecule</i></p>	<i>Three dimensional structure with each monomer unit joined to two others at each end</i>	Unchanged
<p>e.g. Diacrylate Epoxy resin e.g. Diglycidyl ether of bisphenol A</p>	<p>Anaerobic adhesive $CH_2-CH \left[\begin{array}{c} \diagdown \\ O \end{array} \right] - [Ar-CH-CH_2]_n - Ar-CH-CH_2 \left[\begin{array}{c} \diagup \\ O \end{array} \right] - CH_2$ Ar represents the complex group derived from bisphenol A. The monomer itself occurs in admixture with polymer, n being small. Sometimes the monomer, which can be some other diglycidylether is reacted directly with curative.</p>	Cross-linked by reacting terminal epoxy groups with polyamines or epoxy groups and hydroxy groups with acid anhydrides. There are other cross-linking agents.
<p><i>Prepolymer and small molecule</i> e.g. Unsaturated polyester + styrene monomer</p>		<i>Three dimensional, cross-linked structure</i>
<p>Saturated polyester + diisocyanate or polyisocyanate</p>		Polyester resin Polyurethane
<p>Rubber polymer of high M.Wt. dissolved in acrylic monomer or mixture of monomers. Accelerator applied separately to one adherend.</p>		Modified or toughened acrylic
<p><i>Condensation of small molecules to resinous adhesives</i></p>	<i>Reactive stage liquid or powder</i>	<i>Fully reacted inert mass</i>
<p>e.g. Phenol + formaldehyde Resorcinol + formaldehyde Urea + formaldehyde</p>	<p>Stage 'A' phenolic resin</p>	Stage 'C' resin
	<p><i>Mixed polymers</i></p>	<i>Three dimensional, cross-linked structures</i>
	<p>Epoxy-nylon Epoxy-polysulphide Epoxy-phenolic</p>	Epoxy cross-linked by reaction with other polymer sometimes in the presence of other curatives.
	<p>Phenolic-nitrile</p>	The 'nitrile' is an acrylonitrile-butadiene copolymer or nitrile rubber. It reacts chemically with the phenol formaldehyde resin which is present in its 'B' stage.
	<p>Phenolic-polyvinyl-formal acetal butyral</p>	As with phenol-nitriles, a chemical reaction may occur but is less likely. The PF component converts to a 'C' stage resin.

Tabla 1. Estructura química de adhesivos tipo polímero más utilizados².

² Las tablas se obtuvieron de: "Structural adhesive Joints in Engineering" Robert D. Adams and William C. Wake

Evidentemente para poder diseñar una unión adhesiva es necesario conocer sus propiedades, tanto mecánicas como químicas. Para ello se usan los ensayos de caracterización.

Para el caso de los ensayos destructivos tenemos:

- Ensayos de cortadura
- Ensayos de uniones a tope
- Ensayos de pelado
- Ensayos de vida a fatiga
- Ensayos de tracción plana en probetas Sandwich
- Ensayo “Wedge Cleavage Test”

En las siguientes tablas se esquematizan los ensayos mencionados arriba³ así como la norma ASTM que los regula.

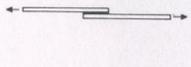
<i>Parameter/schematic</i>	<i>Title</i>	<i>Materials</i>	<i>ASTM</i>	<i>BS</i>
Definitions	Standard definitions of terms relating to adhesives	All	D 907-82	
Static tension lap shear strength	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal)	M	D 1002-72 (1978)	5350: C5 (1976)
	Bond strength in longitudinal shear	MP		
	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading at elevated temperatures (metal-to-metal)	M	D 2295-72 (1978)	
	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading in the temperature range of -267.8 to -55°C (-450 to -67°F)	M	D 2557-72 (1978)	
	SRP determining the strength of adhesively-bonded rigid plastic lap-shear joints in shear by tension loading	P	D 3163-73 (1979)	
	SRP determining the strength of adhesively bonded plastic lap-shear sandwich joints in shear by tension loading	P	D 3164-73 (1979)	
	Static tension lap-shear strength and modulus (thick adherend)	SP measuring strength and shear modulus of non-rigid adhesives by the thick adherend tensile lap specimen	MW	D 3983-81

Tabla 2. Distintos tipos de ensayos sobre adhesivos-1

³ Una detallada descripción de los ensayos mencionados se puede encontrar en: “Structural Adhesive Joints in Engineering” cuyos escritores son Robert D. Adams y William C. Wake con una descripción detallada de toda la problemática y particularidades. También se puede encontrar en páginas web como en páginas web como www.adhesivetoolkit.com

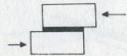
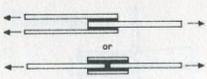
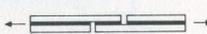
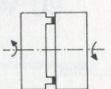
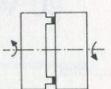
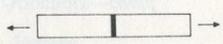
Static compression lap shear strength 	STM strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading	W	D 905-49 (1981)	
Static tension double-lap shear strength 	STM strength properties of double-lap shear adhesive joints by tension loading Bond strength in longitudinal shear	M MP	D 3528-76 (1981)	5350: C5 (1976)
Static tension lap shear strength 	STM strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading	W	D 2339-70 (1976)	
295 Static shear 	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading of laminated assemblies	M	D 3165-73 (1979)	
Static shear 	STM shear strength and shear modulus of structural adhesives (napkin ring)	M	E 229-70 (1981)	
Tensile butt 	STM tensile properties of adhesive bonds (π test)	M, W	D 897-78	
	STM tensile strength of adhesives by means of bar and rod specimens Determination of bond strength in direct tension	M M	D 2095-72 (1978)	5350: C3 (1978)
	Determination of bond strength in direct tension in sandwich panels	foam plastic, honeycomb		5350: C6 (1981)

Tabla 3. Distintos tipos de ensayos sobre adhesivos-2

Appendix—contd.

Parameter/schematic	Title	Materials	ASTM	BS
Peel 	STM peel or stripping strength of adhesive bonds (180° peel) 180° peel test for a flexible-to-rigid assembly	M, P, W others M, P	D 903-49 (1978)	5350: C11 (1979)
296 	STM cross-lap specimens for tensile properties of adhesives STM climbing drum peel test for adhesives	G, M, W M, honeycomb	D 1344-78 D 1781-76 (1981)	
	Climbing drum peel test	M, honeycomb		5350: C13 (1980)
	STM peel resistance of adhesives (T-peel test) 180° T-peel test for flexible-to-flexible assembly	M or any flexible material M or any flexible material	D 1876-72 (1978)	5350: C12 (1979)
	SP determining durability of adhesive joints stressed in peel STM floating roller peel resistance of adhesives	All M	D 2918-71 (1981) D 3167-76 (1981)	
	Floating roller peel test 90° peel test for a flexible-to-rigid assembly	M or any flexible material Any		5350: C9 (1978) 5350: C10 (1979)

Tabla 4. Distintos tipos de ensayos sobre adhesivos-3

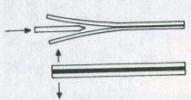
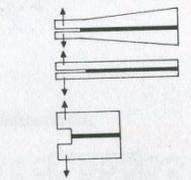
		90° peel test for a rigid-to-rigid assembly	M		5350: C14 (1979)
		STM adhesive bonded surface durability of aluminium (wedge test)	M	D 3762-79	
		STM strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading (engineering plastics to engineering plastics)	P	D 3807-79	
297	Cleavage 	SP fracture strength in cleavage of adhesives in bonded joints	M	D 3433-75 (1980)	
		Strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading (engineering plastics-to-engineering plastics)	Various engineering plastics materials	D 3807-79	
		STM cleavage strength of metal-to-metal adhesive bonds	M	D 1062-78	
Creep		RP conducting creep tests of metal-to-metal adhesives	M	D 1780-72 (1978)	
		STM creep properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal)	M	D 2294-69 (1980)	
Fatigue		Creep and resistance to sustained application of force	M, P		5350: C7 (1976)
		STM creep properties of adhesives in shear by compression loading (metal-to-metal)	M	D 2293-69 (1980)	
		STM fatigue properties of adhesives in shear by tension loading (metal/ metal)	M	D 3166-73 (1979)	

Tabla 5. Distintos tipos de ensayos sobre adhesivos-4

Appendix—contd.

Parameter/schematic	Title	Materials	ASTM	BS
Impact 	STM impact strength of adhesive bonds	M, W	D 950-78	
298 Environment	STM resistance of adhesive bonds to chemical reagents	All	D 896-66 (1979)	
	STM effect of moisture and temperature on adhesive bonds	All	D 1151-72 (1979)	
	STM resistance of adhesives to cyclic laboratory aging conditions	All	D 1183-70 (1981)	
	SP atmospheric exposure of adhesive bonded joints and structures	All	D 1828-70 (1981)	

Tabla 6. Distintos tipos de ensayos sobre adhesivos-5

Para el caso de los ensayos no destructivos tenemos que los más frecuentes son:

- Ultrasonidos
- “Coin-tap”
- Emisión acústica
- Métodos térmicos
- Radiografías
- Interferometría

A continuación se exponen unas figuras de ejemplos de algunos métodos nombrados anteriormente de ensayos no destructivos.

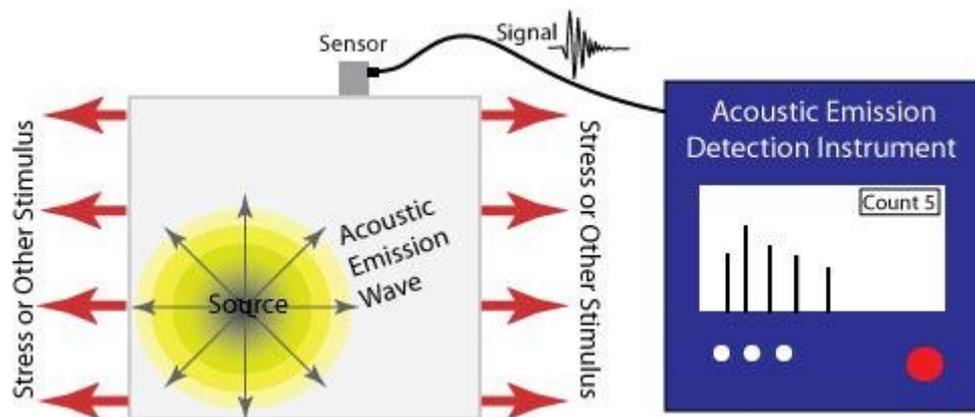


Figura 3. Sistema de emisión acústica

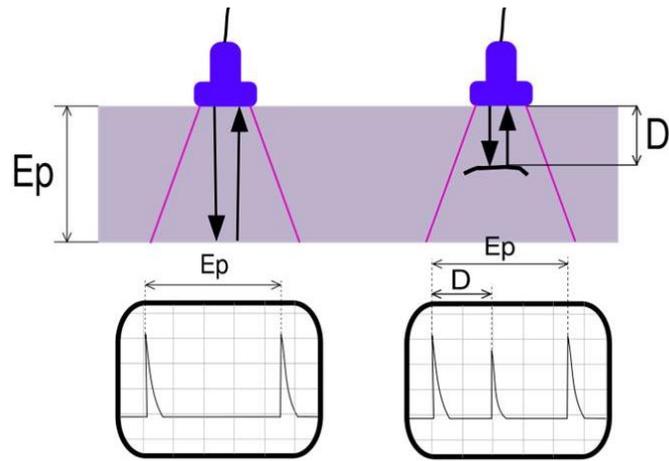


Figura 4. Ultrasonidos, pulso eco

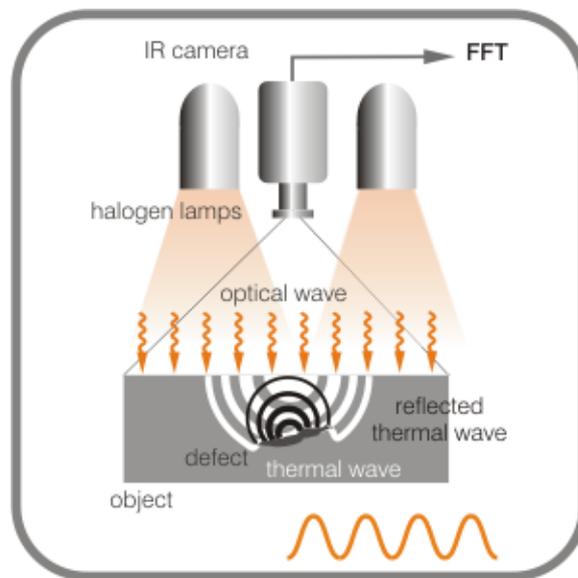


Figura 5. Métodos térmicos

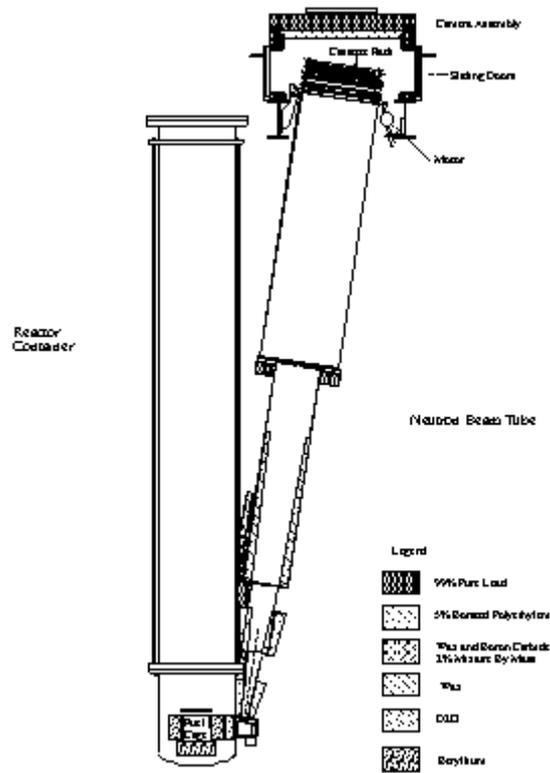


Figura 6. Radiografía

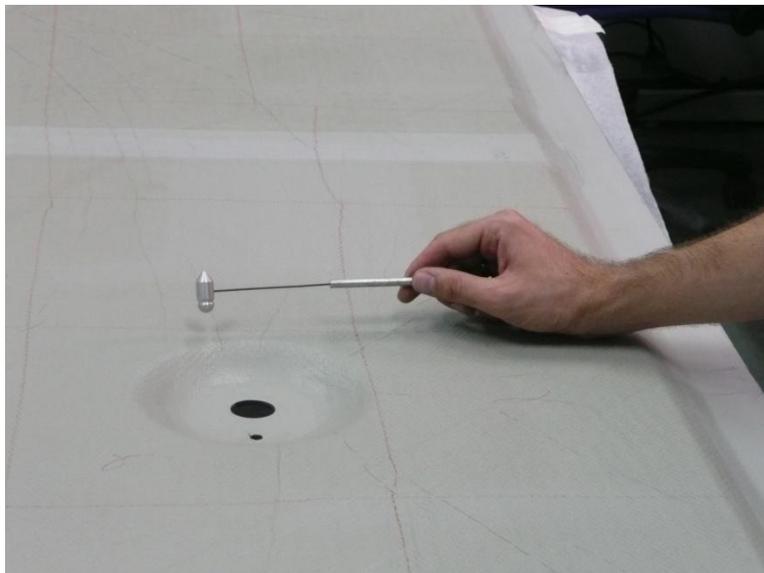


Figura 7. Ensayo de "Coin-Tap"

1.3. Objetivos del proyecto

Debido a que cada vez es más necesario la generación de energía de forma limpia y renovable, se apuesta cada vez más por formas de generación de electricidad como la energía eólica. En este sentido empresas como Gamesa o Endesa son referentes de la construcción de molinos eólicos. Este proyecto intenta mejorar el proceso de pegado de los materiales utilizados para la construcción de las palas de los aerogeneradores. Mediante el conocimiento del efecto que determinados parámetros tienen en el proceso de encolado.

En concreto, el objetivo del proyecto es el estudio de la influencia que sobre la resistencia a cortadura simple de una unión adhesiva tienen los siguientes parámetros:

- Efecto de la humedad y la temperatura durante el “Open time⁴”
- Efecto del ciclo de curado
- Efecto del espesor de la capa de adhesivo
- Efecto del vacío durante el curado del adhesivo
- Tiempo transcurrido desde la eliminación del pelable hasta la aplicación del adhesivo
- Estudio del efecto del agente de desmolde con el que se fabrica el material compuesto y el material que se usa como pelable.

Para ello se realizarán un conjunto de ensayos de solape simple, cada serie tendrá un parámetro diferencial sobre el resto, manteniendo el resto de parámetros constantes.

⁴ *Open time*: Es el tiempo que transcurre desde que se completa la mezcla de los componentes que forman el adhesivo hasta que se pone en contacto el adhesivo con los adherentes (hasta justo antes de comenzar el ciclo de curado)

Los adherentes serán compuestos de fibra de vidrio y los adhesivos serán adhesivos poliméricos con base Poliuretano.

El tipo de adhesivo o tipos de adhesivos sobre los que se va a realizar el estudio, porque se van a utilizar dos tipos de adhesivos, son adhesivos mixtos, compuestos por una base y un endurecedor que han de ser mezcladas justo antes de realizarse la unión. Los dos adhesivos son de tipo poliuretano. La mezcla debe hacerse de forma lenta y constante para asegurar que la micción ha sido completa habiendo introducido el mínimo aire posible, para evitar que durante el curado se formen burbujas que cree porosidad. Al final del apartado se definen todos los conceptos necesarios y se explica con más precisión todo lo que conlleva el proceso de encolado.

Los pasos seguidos para la realización del siguiente trabajo han sido:

- Recepción de la información necesaria para la realización del proyecto
- Búsqueda de la norma indicada para la realización del proyecto y realización de la pauta a seguir basada en esta norma
- Elaboración de un plan de ensayos en el que se especifican los diferentes parámetros a controlar
- Fabricación de las probetas siguiendo la pauta marcada por la norma aplicada
- Realización de los ensayos
- Análisis y valoración de los resultados

Para una mejor comprensión de las tareas y procesos que describimos en los capítulos siguientes se realiza en el capítulo una serie de definiciones de la terminología asociada a las uniones adhesivas.

1.4. Definiciones previas

1.4.1. Pelable

Un pelable es una capa de un material distinto al material que compone el prepreg utilizado para hacer el laminado. Dicha capa suele ser transparente. Su finalidad es la de proteger las capas externas del material de cualquier contaminación que pueda sufrir durante el transporte al lugar en el que se realiza el encolado. Ya que para realizar una apropiada unión adhesiva es necesario que las superficies a encolar se encuentren lo más limpias posibles.

Dicho pelable se elimina con relativa facilidad, en dicha eliminación se ha de tomar las debidas precauciones para no dañar la capa externa del material, para no dañar la superficie a encolar. La eliminación del pelable se deber llevar a cabo justo antes de realizar la unión, de esta forma garantizamos que las superficies a pegar están lo más limpias posible.

La fotografía muestra uno de los pelables utilizados.



Figura 8. Muestra de pelable

1.4.2. Open time

Es el tiempo que transcurre desde que se termina la mezcla de los dos componentes del adhesivo hasta que se colocan las dos superficies a unir. El proceso es el que sigue:

1. Primero se coloca la parte inferior de la probeta sobre la base (plancha de aluminio)
2. Se elimina el pelable de la zona a unir
3. Se toman otras precauciones que se describirán posteriormente
4. Se vierten sobre un vaso de precipitados los dos componentes del adhesivo en las proporciones adecuadas
5. Se mezclan lenta y constantemente la base y el endurecedor
6. Una vez se ha completado correctamente la mezcla se aplica sobre la parte inferior ya preparada anteriormente
7. Se elimina el pelable de la parte superior de la probeta
8. Se coloca adecuadamente
9. Se introduce el conjunto en el horno para aplicar el ciclo de curado, con un poco de presión sobre la zona de encolado para asegurar el contacto

El open time es tiempo que transcurre desde el paso 6 hasta el que concluye el paso 8.

1.4.3. Sistema de desmolde

Un sistema de desmolde es un sistema cuyo objetivo es el de extraer la pieza curada en autoclave de la forma más limpia y provocando el menor número de defectos en el material a curar.

El sistema de desmolde está compuesto por:

- Agente limpiante
- Agente desmoldeante
- Agente sellante

El agente limpiante se usa para dejar la superficie del molde lo más limpia posible. A ser posible pulida, para que la superficie tenga la menor rugosidad posible y nada incrustado. Como agentes limpiantes se suelen usar acetona, butanona, etc.

El agente desmoldeante tiene por objeto facilitar la eliminación de la bolsa de vacío sin que nada de ella llegue a formar parte de la capa externa del material. Como ejemplo de este tipo de agentes se usa una lámina de teflón.

El agente sellante se utiliza para poder cerrar la bolsa de vacío.

1.4.4 Tejido aireador

El tejido aireador o “Breather Fabric” en inglés es un tejido de poliéster o material análogo que se coloca entre el material a curar y la bolsa de vacío. Es un tejido muy poroso cuya finalidad es la de distribuir uniformemente la presión ejercida en el autoclave y la de absorber el exceso de resina que se pueda liberar durante el curado, evitando así que esta pueda llegar a estar en contacto con el material de la bolsa de vacío, lo que haría imposible la eliminación posterior de dicha bolsa. La siguiente foto nos muestra un ejemplo de este material.



Figura 9. Muestra de Tejido aireador

1.4.5. Cinta de control de espesor

Dicha cinta tiene por objeto es asegurar que el adhesivo tiene el espesor deseado. Las cintas son unas tiras de fibra de vidrio a $\pm 45^\circ$, con el espesor adecuado. El espesor de estas tiras se consigue poniendo más o menos capas, estas tiras son de fabricación propia. Se colocan a ambos lados de la zona a encolar.