

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE POSGRADO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Evaluación estructural de uniones adhesivas permanentes en materiales compuestos de matriz polimérica en aplicaciones marinas y aeroespaciales”

T E S I S

Presentada para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ING. ESTEBAN SALAZAR MONTES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ ROMERO

MEXICALI, B. C.

DICIEMBRE DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el esfuerzo y dedicación en esta investigación a mi Director de tesis Dr. Miguel Ángel Martínez Romero, Dr. Juan de Dios Ocampo Díaz, Dr. Israel Saucedá Meza, M.I. Eddna Teresa Valenzuela Martínez, por su ayuda y apoyo incondicional en el desarrollo de toda la investigación.

A mis maestros de la maestría, gracias a ellos por compartir su conocimiento.

A los responsables de los laboratorios de Ingeniería mecánica y aeroespacial, por haberme facilitado el uso del equipo en dichas instalaciones para realizar el trabajo experimental.

Al Sindicato estatal de trabajadores universitarios (SETU) por darme el apoyo para poder realizar mi investigación.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres Basilio Salazar y María M. Montes por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaron. Gracias por darme las facilidades para cursar una carrera que es mi presenta y será mi futuro, todo esto se los debo a ellos.

A mis familiares que en este transcurso de mi vida se nos adelantaron en el camino, mi padre Basilio Salazar (Q.E.P.D.) y mi abuelo Román Salazar (Q.E.P.D.), por brindarme su cariño y apoyo siempre, esto también se lo debo a ustedes.

A mis sobrinos, Alan, Ángel y Ricardo, esperando vean en mí un ejemplo a seguir.

A mi hermano, Ricardo Salazar, por estar conmigo, apoyarme siempre y orientarme para tomar mejores decisiones.

A mi novia Elda Judit Tavarez Durán, por brindarme apoyo incondicional, para poder desarrollar toda esta investigación.

Finalmente a todos aquellos familiares y amigos que no mencioné pero que han sido parte especial en el camino que he recorrido. Ustedes saben quiénes son.

Contenido

Capítulo 1 ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
Capítulo 2 ÍNDICE DE TABLAS	XII
Capítulo 3 GRÁFICAS	XIII
Capítulo 4 GLOSARIO.....	XIV
Capítulo 5 RESUMEN.....	XV
Capítulo 6 ABSTRACT	XVI
Capítulo 7 HIPÓTESIS.....	XVII
Capítulo 8 OBJETIVO.....	XVII
Capítulo 9 METAS	XVII
Capítulo 10 JUSTIFICACIÓN	XVII
Capítulo 1 ESTADO DEL ARTE DE MATERIALES COMPUESTOS.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Historia de los materiales compuestos y sus aplicaciones	2
1.3 Desarrollo de los materiales compuesto	2
1.3.1 Introducción	2
1.3.2 Fibras de vidrio	3
1.3.3 Fibras de carbono.....	4
1.3.4 Fibra aramida o kevlar	6
1.4 Clasificación de los materiales	6
1.4.1 Clasificación de los materiales según su origen	6
1.4.2 Clasificación de los materiales según sus propiedades	7
1.5 Propiedades en ambiente marinos.....	7
1.6 Utilización de materiales compuestos en la industria naval.	8
1.6.1 Futuro de los materiales compuestos en la industria naval.....	9

1.7 Procesos de manufactura de materiales compuestos	10
1.7.1 Método de contacto manual (hand lay-up)	10
1.7.2 Método de proyección (spray-up)	10
1.7.3 Bolsa de vacío, bolsa de presión, autoclave	11
1.7.4 Enrollamiento de fibras	12
1.7.5 Molde de centrifugado	12
1.7.6 Moldeo por compresión en caliente	12
1.7.7 Pultrusión	13
1.7.8 Moldeo por inyección o moldeo de transferencia	13
1.7.9 Moldeo por transferencia o inyección	14
Capítulo 2 ANTECEDENTES DE LAS UNIONES	14
2.1 Introducción	14
2.1.1 El reto de unir todo con todo	14
2.1.2 Las uniones.	14
2.2 Uniones mecánicas	15
2.2.1 Técnicas de unión mediante dispositivos accesorios.	15
2.2.2 Técnicas de unión mediante ensamblaje	16
2.2.3 Técnicas de unión mediante engarzado o engargolados.	16
2.2.4 Uniones soldadas.	18
2.3 Uniones con adhesivos	18
2.3.1 Ideas generales.	18
2.3.2 Principales ventajas de los adhesivos.	19
2.3.3 Uniones híbridas.	19
2.3.4 Distribución de tensiones en montajes soldados, remachados y unidos con adhesivos.	20
2.4 Adhesivos	20

2.4.1 Definición.	20
2.4.2 Fundamentos.	21
2.4.3 Historia.....	22
2.4.4 Adhesión y Cohesión.	22
2.4.5 Mecanismos de actuación del adhesivo.	24
2.4.6 Adhesión estructural.	25
2.4.7 Diseño de uniones adhesivas.	25
2.4.9 Unión adhesiva de substratos de plástico.....	33
2.4.10 Durabilidad de las uniones adhesivas.	34
2.4.11 Selección de adhesivos.	37
2.4.12 Preparación de la superficie.	39
2.4.13 Aplicaciones de los adhesivos.	42
2.4.14 Limitaciones de los adhesivos.	43
2.4.15 Ventajas y desventajas de los adhesivos.....	44
Capítulo 3 INTRODUCCIÓN A LOS ADHESIVOS	46
3.1 Introducción	46
3.2 Ventajas e inconvenientes de las uniones adhesivas.....	47
3.3 Adhesión	49
3.3.1 Modos de fallo	50
3.3.2 Formación de la unión adhesiva	51
3.4 Solicitaciones de la unión adhesiva	52
3.5 Adhesivos acrílicos	52
3.5.1 Generalidades.....	53
3.5.2 Mecanismo de curado de los adhesivos acrílicos	53
3.5.3 Composición de los acrílicos	54

3.5.4 Ventajas e inconvenientes.....	54
Capítulo 4 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN UNIONES ADHESIVAS	55
4.1 Introducción y objetivos	55
4.2 Descripción de tratamientos.....	55
4.2.1 Limpieza superficial.....	56
4.3 Tratamientos abrasivos	58
4.4 Imprimación.....	59
4.5 Tratamientos mediante plasma	60
Capítulo 5 EXPERIMENTACIÓN.....	61
5.1 Materiales de trabajo.....	62
5.2 Selección de materiales.....	62
5.2.1 Fibra de vidrio.....	63
5.2.2 Resina epóxica	63
5.2.3 Adhesivo epóxico.....	63
5.2.4 Film de adhesivo	64
5.2.5 Fibra de vidrio molida en 1/16.....	65
5.3 Normatividad	66
5.4. Elaboración de laminados	67
5.5 Corte de laminados material compuesto	69
5.6 Tratamientos superficiales	72
5.6.1 Limpiado con acetona y lijado	72
5.6.2 Uniones de las probetas	73
5.7. Pruebas de Tensión.	77
5.7.1 Pruebas con adhesivo epóxico	77
5.7.2 Pruebas con adhesivo FM 99	78

5.7.3 Pruebas utilizando resina como adhesivo; curado por separado y juntas	79
5.7.4 Pruebas utilizando resina mezclada con fibra de vidrio molida como adhesivo; curado por separado y juntas	80
En estos casos como en el anterior seguimos el mismo procedimiento lo único que se vario fue el agente adhesivo que utilizamos para hacer los dos tipos de unión, en este caso fue resina mezclada con fibra de vidrio molida.....	80
Los resultados obtenidos para las probetas separadas unidas con la mezcla se muestran en la tabla 5.5 y para las probetas unidas al mismo tiempo que el curado se muestra en la tabla 5.6.....	80
Capítulo 6 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	81
6.1 Análisis de Resultados Obtenidos en pruebas de tensión.	81
6.2 Los datos de los fabricantes para los dos adhesivos	85
6.3 Comparación de los resultados obtenidos de los adhesivos utilizados.	86
Capítulo 7 CONCLUSIÓN	88
Capítulo 8 RECOMENDACIÓN PARA TRABAJOS FUTUROS	89
Capítulo 9 BIBLIOGRAFÍA.....	90

Capítulo 1 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los materiales compuestos	1
Figura 2 Moldeo por contacto a mano	10
Figura 3 Proceso de proyección simultánea.....	11
Figura 4 Proceso de fabricación de bolsa de vacío	11
Figura 5 Enrollamiento en húmedo de filamentos	12
Figura 6 Moldeo por prensado	12
Figura 7 Moldeo por pultrusión	13
Figura 8 Moldeo por transferencia de resina	13
Figura 9 Tipos de uniones.....	14
Figura 10 Diseño de engarce para evitar que los cantos queden expuestos.....	17
Figura 11 Deformaciones producidas en las chapas unidas mediante recalcado.....	17
Figura 12 Método de realización de la unión por clinchado.....	18
Figura 13 Distribución de tensiones en diferentes tipos de unión	20
Figura 14 Esquema de las fuerzas esenciales que actúan entre dos sustratos unidos con adhesivo	20
Figura 15 Tela de araña sujeta por adhesivo natural.....	22
Figura 16 Capullo de orugas sujeto por adhesivo natural.....	22
Figura 17 Esquema general de fuerzas de adhesión y cohesión	22
Figura 18 Partes de una unión con adhesivo.....	23
Figura 19 Tipos de fallos de una unión con adhesivo.....	24
Figura 20 Tracción y su comportamiento	26
Figura 21 Cizallamiento y su comportamiento	26
Figura 22 Compresión y su comportamiento.....	26
Figura 23 Pelado y su comportamiento	27

Figura 24 Desgarro y su comportamiento.....	27
Figura 25 Diseños típicos de unión para minimizar las cargas de pelado y desgarro	27
Figura 26 Diseños típicos de unión para maximizar el área de la unión	28
Figura 27 Uniones a solape. Dimensiones fundamentales.....	29
Figura 28 Uniones a solape. Tipos de tensiones generadas durante el proceso de carga	29
Figura 29 Unión a solape descargada y en tensión. Curva de tensiones cortantes en la unión a solape	29
Figura 30 Unión a solape simple. Diseño normal sin optimizar.....	31
Figura 31 Diferentes diseños para minimizar el problema de las fuerzas excéntricas en las uniones solapadas ³¹	
Figura 32 Carga máxima de rotura en función de la longitud de solape	32
Figura 33 Distribución de tensiones en uniones con diferente longitud de solape.....	32
Figura 34 Resistencia al calor de un adhesivo anaeróbico	35
Figura 35 Envejecimiento por temperatura de un adhesivo anaeróbico	36
Figura 36 Esquema general para la realización de tratamientos superficiales.....	40
Figura 37 Ventajas de la unión con adhesivos frente a la unión con remaches.....	44
Figura 38 Posicionamiento de los adhesivos ^[10]	47
Figura 39 Esquema básico de una unión adhesiva ^{[10] [53]}	47
Figura 40 Se expresa la definición de variables en una unión por solape simple.....	48
Figura 41 Tipos de unión para cargas medias – bajas	49
Figura 42 Tipos de unión para cargas medias – altas	49
Figura 43 Diagrama resistencia / espesor	49
Figura 44 Esquema de adhesivo bond modos de falla:	51
Figura 45 Desengrasado con disolvente orgánico en fase vapor	57
Figura 46 Sistema de limpieza en baño de ultrasonidos	57
Figura 47 Limpieza de superficies mediante frotado.....	58

Figura 48 Tratamiento abrasivo mediante chorro de arena	58
Figura 49 Tratamiento mediante plasma de baja presión	60
Figura 50 Diagrama esquemático de metodología.....	62
Figura 51 Propiedades y presentaciones de la fibra.....	63
Figura 52 Film adhesivo FM 99	64
Figura 53 Materiales para proceso de bolsa de vacío	65
Figura 54 Fibra de vidrio molida a 1/16	65
Figura 55 Mezcla de resina con fibra molida.....	66
Figura 56 Diagrama para probetas corma ASTM D-1002.....	66
Figura 57 Proceso de elaboración de laminado	67
Figura 58 Laminados curados al mismo tiempo	68
Figura 59 Mezcla de resina epóxica con fibra molida de vidrio 1/16.....	68
Figura 60 Impregnación de fibras con resina epóxica	69
Figura 61 Laminado Terminado.	69
Figura 62 Segunda opción banco de corte para loseta, madera y disco con recubrimiento de diamante.....	70
Figura 63 Tercera opción banco de corte de loseta con disco con recubrimiento de diamante....	70
Figura 64 Laminado de fibra de vidrio, las orillas algunas partes están desfasadas las capas	70
Figura 65 La minado de fibra de vidrio en proceso de escuadrarlo.....	71
Figura 66 Cupones de prueba e instrumentos de medición utilizados.....	71
Figura 67 Fotos de las probetas marcadas cortadas y con medidas	72
Figura 68 Cupón de prueba antes del tratamiento de lijado.....	72
Figura 69 Cupón de prueba después del tratamiento superficial de lijado y uno sin tratamiento	72
Figura 70 Cupones de prueba dejando secar después de limpiarlos con acetona el área del tratamiento	73
Figura 71 Adhesivo epóxico parte A y B, mezcla de las dos partes.....	74

Figura 72 Mezcla 1 a 1 de las dos partes del adhesivo.	74
Figura 73 Se pesa y vierte el adhesivo en los cupones de prueba.....	74
Figura 74 Abrazadera (clamps) utilizados para realizar la unión de los dos cupones.	75
Figura 75 Probetas listas para realizar las pruebas de tensión.	75
Figura 76 Probetas curándose en el horno	75
Figura 77 Laminados separados unidos con resina.....	76
Figura 78 Laminados curados ya con la unión.	76
Figura 79 Probetas por separado unidos con resina mezclada con fibra de vidrio molida.....	76
Figura 80 Probetas unidas con resina mezclada con fibra de vidrio molida.....	76
Figura 81 Máquina de tensión utilizada.....	77
Figura 82 Prueba de tensión, probetas adhesivo epóxico.	77
Figura 83 Pruebas de tensión probetas con adhesivo FM 99.....	78

Capítulo 2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Materias primas que componen un material compuesto.....	3
Tabla 1.2 Propiedades principales de los diferentes tipos de fibras de vidrio	4
Tabla 1.3 Propiedades materiales y mecánicas de las fibras de carbono.....	5
Tabla 2.1 Selección de adhesivos en función de los sustratos a unir.....	37
Tabla 3.1 Ventaja y desventaja de uniones por adhesivo	48
Tabla 4.1 Dureza de materiales usados como abrasivos.....	59
Tabla 5.1 Resultados de pruebas de tensión, probetas con adhesivo epóxico.	78
Tabla 5.2 Resultados de pruebas, probetas con adhesivo FM 99.	79
Tabla 6.1Tabla del fabricante Fiber Glast Developments Corporation	85
Tabla 6.2Manejo de propiedades Cytac engineered materials.....	86

Tabla 6.3 Propiedades del adhesivo Cytec engineered materials	86
---	----

Capítulo 3 GRÁFICAS

Gráfica 6.1 Resultados obtenido del adhesivo epóxico (carga y deformación).....	82
Gráfica 6.2 Resultados obtenidos del adhesivo FM 99 (carga y deformación)	82
Gráfica 6.3 Resultados obtenido de la unión por separado con resina	83
Gráfica 6.4 Resultados obtenidos de probetas unidas al mismo tiempo con resinas	83
Gráfica 6.5 Resultados obtenidos de probetas unidas por separado con mezcla de resina y fibra de vidrio molida	84
Gráfica 6.6 Resultados obtenidos de probetas unidas al mismo tiempo con mezcla de resina con fibra	84
Gráfica 6.7 Resultados obtenidos de carga, de las probetas con los diferentes tipos de materiales adhesivos	87
Gráfica 6.8 Resultados obtenidos de deformación de las probetas con los diferentes tipos de materiales adhesivos	87
Gráfica 7.1 Tabla que muestra los resultados de esfuerzos obtenidos de la pruebas.....	88

Capítulo 4 GLOSARIO

Anisotrópicas: Debido a que el vidrio presenta una estructura amorfa, sus propiedades son isotrópicas, es decir, son las mismas a lo largo y ancho de la fibra (a diferencia de la fibra de carbono, cuya estructura molecular hace que sus propiedades sean diferentes a lo largo y ancho, es decir, anisotrópicas).

Aramida: Se utiliza para fabricar una gran variedad de prendas, accesorios y equipos seguros y resistentes a los cortes. Es liviana, duradera y extraordinariamente fuerte. Sí, más conocida por su uso en balística y en armaduras corporales resistentes a los cortes ^[28].

Bismaleimidas: Se caracteriza por sus favorables propiedades mecánicas estabilidad y dimensional; así como también gran resistencia al calor, oxidación, radiación, etc. Por otra parte, en termino moldeo, es similar a la resina epoxi.

Carburo: Compuesto binario del carbono con un elemento menos electronegativo que él. Se excluyen los compuestos de carbono-hidrógeno. Los carburos son compuestos de metal-carbono, si el boro y el silicio se incluyen entre los metales normales ^[27].

Deposiciones químicas: es un proceso químico utilizado para producir productos de alta pureza y de alto rendimiento de materiales sólidos. El proceso se utiliza a menudo en la industria de semiconductores para producir películas delgadas.

Estructuras offshore: es una estructura situada en el mar y que por tanto se encuentra sometida a la acción del oleaje, y además a unas condiciones meteorológicas adversas. Estos fenómenos es importante tenerlos en cuenta en el diseño y el cálculo de estas estructuras ya que el tiempo meteorológico es una de las principales causas de fallos en las estructuras offshore ^[32].

Fenólica: La resina fenol-formaldehído es una resina sintética termoestable, obtenida como producto de la reacción de los fenoles con el formaldehído. A veces, los precursores son otros aldehídos u otro fenol. Las resinas fenólicas se utilizan principalmente en la producción de tableros de circuitos.

Geopolimero: es un término que abarca una clase de materiales sintéticos, aluminio, silicato, con uso potencial en una serie de ámbitos, esencialmente como un reemplazo para el cemento Portland y de avanzados materiales compuestos de alta tecnología, las aplicaciones de cerámica o como una forma de piedra artificial ^[29]

Poliacrilonitrilo: El Poliacrilonitrilo (PAN) es un polímero utilizado en la fabricación de fibras sintéticas, se utiliza, por ejemplo, para hacer suéteres y para fabricar telas para carpas.

Poliamidas: Una poliamida es un tipo de polímero que contiene enlaces de tipo amida. Las poliamidas se pueden encontrar en la naturaleza, como la lana o la seda, y también ser sintéticas, como el nailon o el kevlar.

Poliéster: Resina plástica que se obtiene mediante una reacción química y que es muy resistente a la humedad y a los productos químicos

Polieterimida: Este avanzado polímero ofrece alta prestaciones térmicas, mecánicas y eléctricas. Es un material especificado como aislante eléctrico/electrónico. La Polieterimida ofrece una elevada resistencia térmica a sustancias químicas y su temperatura de uso continuo es hasta + 170°C ^[31].

Pultrusión: Es un proceso de producción automatizada en continuo de perfilaría de PRFV que permite obtener cualquier tipo de perfil longitudinal con un buen acabado superficial. En el proceso de pultrusión la fibra de vidrio se impregna con una resina termoestable que reacciona químicamente cuando se le aplica calor.

Racores: Es una pieza metálica con o sin roscas internas en sentido inverso, que sirve para unir tubos, por ejemplo los cuadros de bicicletas, u otros perfiles cilíndricos.

Roblón: Clavija de metal que después de pasar por uno de los agujeros de la pieza que ha de sujetar, se remacha por el extremo opuesto formando otra cabeza.

Trefilado: Se entiende por trefilar a la operación de conformación en la reducción de sección de un alambre o varilla haciéndolo pasar a través de un orificio cónico practicado en una herramienta llamada hilera o dado

Troncocónicos: Es un volumen de revolución generado por un trapecio rectángulo al tomar como eje de giro el lado perpendicular a las bases.

Viniléster: Son productos intermedios en cuanto a prestaciones mecánicas. La resistencia química de las resinas viniléster es excelente. Son sistemas muy usados en aplicaciones anticorrosión. Reaccionan por polimerización, acelerada y catalizada de modo similar a las de Poliéster ^[30].

Capítulo 5 RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados obtenidos de la investigación realizada sobre el tema de evaluación estructural de uniones adhesivas permanentes en materiales compuestos de matriz polimérica en aplicaciones marinas y aeroespaciales. Este proceso se inició con el análisis de información de los tipos de materiales compuestos, su manufactura, características y propiedades mecánicas, así como de los tipos de uniones utilizadas en los compuestos de matriz polimérica y sus aplicaciones, haciendo énfasis en las uniones mediante adhesivo.

Posteriormente, se realizó el diseño y la manufactura de probetas para pruebas de tensión de matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio, las cuales se unieron a traslape con la

finalidad de realizar pruebas de tensión y determinar mediante los resultados el comportamiento mecánico de las uniones, realizando las pruebas de acuerdo a la norma ASTM D 1002.

Se manufacturaron un total de 56 probetas, todas estas se manufacturaron de 8 capas de fibra de vidrio tejida con orientaciones 0° 90°, resina epóxica y se utilizó el método de bolsa de vacío para poder realizar estos laminados probetas, de características similares ya que fueron elaboradas de la misma manera, lo único que cambio fue la forma y el adhesivo utilizado para realizar las uniones, estas uniones fueron a traslape simple basándose en la norma ASTM D-1002, las probetas fueron sometidas a pruebas de tensión, los resultados obtenidos en estas pruebas fueron aceptados conforme a lo que se esperaba, las pruebas tuvieron un buen comportamiento, en base a estos resultados podemos concluir que en relación a los resultados mostrados se ve una ligera tendencia sobresaliente de las demás en las probetas unidas con adhesivo epóxico y por ende el proceso de manufactura también cumple con los requerimientos para los cuales se utilizar.

Capítulo 6 ABSTRACT

This paper presents the results obtained from the research carried out on the subject of structural evaluation of permanent adhesive bonds in polymer matrix composite materials in marine and aerospace applications. This process began with the analysis of information on the types of composite materials, their manufacture, characteristics and mechanical properties, as well as the types of joints used in the polymer matrix composites and their applications, with an emphasis on adhesive bonding.

Subsequently, the design and manufacture of test tubes for stress tests of polymer matrix reinforced with glass fiber, which were joined to overlap in order to perform stress tests and determine through the results the mechanical behavior of the joints, was performed according to ASTM D 1002.

A total of 56 specimens were manufactured, all of them were manufactured from 8 layers of woven fiberglass with 0 ° and 90 ° orientations, epoxy resin and the vacuum bag method was used to make these laminated specimens, of similar characteristics since they were elaborated in the same way, the only thing that changed was the shape and the adhesive used to make the joints, these joints were of simple overlap based on the ASTM D-1002 standard, the test pieces were subjected to stress tests, the results obtained were accepted according to what was expected, the tests had a good behavior, based on these results we can conclude that based on the results shown there is a slight outstanding tendency of the others in the test pieces joined with epoxy adhesive and therefore, the manufacturing process also meets the requirements for which it is used.

Capítulo 7 HIPÓTESIS

Las uniones adhesivas utilizadas en materiales compuestos de matriz polimérica reforzadas con fibras de vidrio tejida con orientaciones 0° 90° , son capaces de soportar elevadas cargas a tensión, sin embargo, se considera que dicho tipo de uniones es más susceptible a presentar fallas ante la aplicación de cargas a tensión que superen los 103 N/mm^2 [57].

Capítulo 8 OBJETIVO

Determinar el comportamiento mecánico de uniones mediante adhesivos tipo epóxico, film fm99 y resina epóxica mezclada con fibra de vidrio molida, e probetas de material compuesto de matriz polimérica reforzadas con fibra de vidrio tejida con orientaciones 0° 90° , mediante cargas a tensión, con la finalidad de determinar su rango de operatividad estructural.

Capítulo 9 METAS

- Identificación de normas estándar para la prueba mecánica viables para la evaluación de cupones de prueba de material compuestos de matriz poliméricas reforzados con fibra de vidrio tejida con orientaciones 0° 90° , nidos mediante adhesivos.
- Selección de adhesivos más viables para la unión de probetas a traslape
- Elaboración de cupones de prueba con materiales determinados para la realización de uniones en cupones de prueba.
- Ensayo mecánico a tensión con equipo de prueba, y adquisición de datos. Mediante software.
- Interpretación de resultados de las pruebas a través de tablas y gráficos.

Capítulo 10 JUSTIFICACIÓN

Una de las situaciones a las que se encuentra expuesta la manufactura y el ensamble de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio tejida con orientaciones 0° 90° , en sistemas de transporte de alta tecnología, es la transferencia de nuevos materiales y procesos de manufactura que sean confiables para soportar altas cargas, presiones y velocidades a diversas temperaturas.

Además de que existe una falta de datos que muestren una convergencia entre valores específicos como el módulo de elasticidad, resistencia máxima, carga última.

Capítulo 1 ESTADO DEL ARTE DE MATERIALES COMPUESTOS

1.1 Introducción

Los materiales son las sustancias que componen todos los cuerpos en la naturaleza, desde el comienzo de la civilización, los materiales junto con la energía han sido utilizados por el hombre para mejorar su nivel de vida. Como los productos están fabricados a base de materiales, estos se encuentran en cualquier parte alrededor nuestro. Los más comúnmente encontrados son madera, hormigón, ladrillo, acero, plástico, vidrio, caucho, aluminio, cobre y papel ^[1].

En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible. De acuerdo con este principio de acción combinada, las mejores propiedades se obtienen por la combinación razonada de dos o más materiales diferentes.

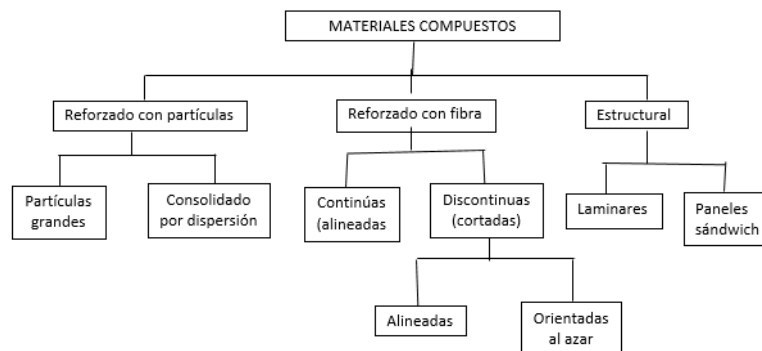


Figura 1 Clasificación de los materiales compuestos ^[35]

Un esquema simple para clasificar los materiales compuestos consta de tres divisiones (Figura 1): compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales; además, existen dos subdivisiones para cada una. Se debe mencionar que la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tienen una relación longitud-diámetro (factor de forma) muy alta ^[35].

Los ingenieros especializados en investigación trabajan para crear nuevos materiales o para modificar las propiedades de los ya existentes, los ingenieros de diseño usan los materiales ya existentes, los modificados o los nuevos para diseñar o crear nuevos productos y sistemas. Algunas veces el problema surge de modo inverso: los ingenieros de diseño tienen dificultades en un diseño y requieren que sea creado un nuevo material por parte de los científicos investigadores e ingenieros.

1.2 Historia de los materiales compuestos y sus aplicaciones

Al contrario de lo que se pudiera pensar, el concepto de material compuesto es tan antiguo como la naturaleza misma, un ejemplo de ello lo tenemos en la madera, en la cual las fibras de celulosa se unen mediante una matriz de lignina. En el caso de los huesos, existen también estructuras reforzadas y rigidizadas con fibras ^{[2] [35]}.

Sin embargo, en lo que a construcción naval se refiere, estudiaremos los materiales compuestos de matriz polimérica.

Mediante la elección de un sistema de matriz adecuado y su asociación con fibras de refuerzo, se obtiene un material con cualidades que no son alcanzables por cada uno de los materiales homogéneos que lo componen.

El reto actual de los materiales compuestos consiste en dar con las mejores asociaciones de fibra-matriz, proporcionando cada vez materiales con mejores prestaciones para el fin que son concebidos ^[2].

1.3 Desarrollo de los materiales compuesto

1.3.1 Introducción

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. Además de fibra y matriz, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación ^{[3] [36] [40]}.

Los materiales compuestos de matriz polimérica han adquirido una importancia cada vez mayor, como alternativa para el diseño de equipamiento y estructuras en aplicaciones estructurales, en sectores tan exigentes como el aeroespacial, terrestre y naval. En la Tabla 1 se puede observar el componente de cada materia.

Tabla 1.1 Materias primas que componen un material compuesto ^[3]

Fibras	• Fibras cerámicas (carburo de silicio, alúmina) • Fibras metálicas • Fibras inorgánicas (carbono, vidrio, boro) • Fibras orgánicas (aramida, polietileno)
Matrices	• Matrices inorgánicas (cemento, geopolímero, yeso) • Matrices termoestables (epoxi, viniléster, poliéster, fenólica, esteres cianato, bismaleimidas, poliamidas, polieteramida) • Matrices termoplásticas (abs, polipropileno, policarbonato, acetato, polieterimida, nilón, poliamida)
Núcleos	• Nidos de abeja (aluminio, nomex, polipropileno) • Espumas (poliuretano, poliestireno, pvc) • Sándwich tejido 3d, madera de balsa
Adhesivos	• Epoxi, poliuretano, acrílicos
Recubrimientos	• Cerámicos, fenólicos, epoxi + arena

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas, las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado modulo específico ^{[3] [35]}.

1.3.2 Fibras de vidrio

Los poliésteres reforzados con fibras de vidrio son denominados con las siglas en inglés: FRP (Fiber Reinforced Polyester) o las siglas en español PRF (poliésteres reforzados con fibras de vidrio). El vidrio, tal y como lo conocemos, es un material frágil y extremadamente quebradizo, pero sus características se ven afectadas positivamente al transformarlo en delgados filamentos. Resumiendo el proceso nos cercioramos de que, en la fase inicial de fabricación, se fusionan en un horno elementos tales como el óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de magnesio, óxido de aluminio, óxido de boro y óxido de hierro ^{[39] [42]}.

Luego, las propiedades mecánicas son generalmente anisotrópicas y varían mucho según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material: ordenadas uniaxialmente, parcialmente ordenadas y desordenadas. Son las fibras más utilizadas principalmente por su costo ^[4].

Las aplicaciones más comunes son: carrocerías de automóviles y barcos, recipientes de almacenaje, principalmente la industria del transporte.

En general, este tipo de fibras presenta un diámetro comprendido entre 8 y 15 μ m. Existen diferentes grados de fibra de vidrio y dependiendo de las condiciones que requiere la obra se utilizan unos u otros. Estos son ^[3]:

- Vidrio eléctrico (e-glass): es un vidrio borosilicato. Tiene una gran resistencia eléctrica y por ello es utilizado en la gran mayoría de los productos FRP (Fibras reforzadas con polímeros).
- Cristal de la ventana (a-glass): solamente usado para elementos específicos en estructuras.
- Resistente a la corrosión (c-glass): también se le denomina vidrio alcalino-resistente, es decir, tiene una elevada resistencia química.
- Vidrio estructural o de alta resistencia (s-glass): usado mayormente para producir fibras con una alta resistencia usadas ampliamente en el mundo de la ingeniería aeronáutica y militar.

Tabla 1.2 Propiedades principales de los diferentes tipos de fibras de vidrio ^[3]

Tipo	Cristal de la ventana	Vidrio eléctrico	Vidrio estructural o de alta resistencia	Resistente a la corrosión
Diámetro de hilo [μ m]	5 a 13	10 a 20	10	10
Densidad [Kg/m^3]	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad [Gpa]	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción [Gpa]	3,1	3,4	4,56	3,4 a 4,4
Módulo específico	28	28	34	32,82

Las fibras de vidrio pueden tener diferentes presentaciones en su uso como material de refuerzo de matrices orgánicas. Se describen brevemente las tres presentaciones más usadas:

- Mat: fieltros de hilos cortados o continuos aglomerados mediante un ligamento químico (emulsión o polvo).
- Roving: bobinas de filamentos (Directo) o hilos de vidrio (Ensamblado) que han recibido un ensimaje plástico compatible con las resinas.
- Tejido: superficies constituidas por mechas de roving directo en trama y urdimbre, tratados principalmente con encimas plástico.

1.3.3 Fibras de carbono

Identificados con las siglas inglesas CFRP (Carbón Fiber Reinforced Plastics), están dotadas de propiedades y características especiales que las hacen bastante más caras que las

fibras de vidrio puesto que están fabricadas para ser aplicadas en ámbitos relativos a la automoción, a la aeronáutica, a la aviación aeroespacial^[39].

Matriz epoxi. Tiene tres variantes, alta resistencia, intermedio y alto módulo (HM), con módulo de elasticidad superior a 300 Gpa y relación resistencia a la tracción/módulo de tensión menor del 1%^[8]. Son muy útiles para aplicaciones donde los factores críticos son la rigidez, resistencia y bajo peso pero donde el precio es un factor secundario. Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil^[42].

Los precursores son el Poliacrilonitrilo (PAN) o la brea. En general las fibras de carbono se obtienen a partir de las fibras de PAN en tres etapas: 1) estabilización [donde se estiran las fibras PAN (Poliacrilonitrilo) y se oxidan a 200-220 °C mientras se mantiene la tensión]; 2) carbonización [calentamiento a 1000-1500 °C en atmósfera inerte para eliminar H, O, N, proceso en el que se forman algunas fibras de grafito pero no demasiadas]; 3) gratificado [calentamiento a $T > 1800$ °C para aumentar el módulo de elasticidad a expensas de disminuir un poco la resistencia a la tracción, en esta etapa se transforma casi todas las fibras a estructura grafito y aumentan su orientación]^{[39] [42]}.

Las fibras de carbono son sólidos que presentan una morfología fibrosa en forma de filamentos con un contenido mínimo en carbono del 92% en peso. Es un material que presenta elevadas propiedades mecánicas, como es su módulo de deformación y su resistencia a la tracción, siendo de gran interés su uso en estructuras que se encuentran sometidas a cargas repetitivas o de fatiga^[3].

- A partir de las temperaturas de tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibras de carbono:
- Fibra de carbono de alto módulo (HM): es la más rígida y requiere una mayor temperatura en el tratamiento.
- Fibra de carbono de alta resistencia (HR): es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a tracción.
- Fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es la menor de las tres pero su comportamiento mecánico es bueno.

Tabla 1.3 Propiedades materiales y mecánicas de las fibras de carbono^[3]

Tipo	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	(III)
Diámetro de hilo [μm]	8	7	7,5
Densidad [Kg/m ³]	1750	1840	1820
Módulo de Elasticidad [Gpa]	230	390	290
Resistencia a tracción [Gpa]	2,6 a 5	2,5	3,1
Módulo Específico	130	210	160

1.3.4 Fibra aramida o kevlar

Cuyo nombre comercial es kevlar, se comercializan en diversos grados de resistencia. Características generales de las fibras de aramida, que conviene aquí reseñar, son su baja densidad, su elevada resistencia a la tracción, a la fatiga y a los agentes químicos. Como características negativas sólo citar su dificultad para ser impregnada con la resina y su sensibilidad a las radiaciones ultravioletas. Kevlar 29 es una fibra de baja densidad y alta resistencia adecuada para aplicaciones específicas como protección balística, cuerdas y cables [39].

Según el procedimiento de fabricación se distinguen dos tipos de fibras de aramida en función de su rigidez:

- Fibras de bajo módulo ($E = 70 \text{ GPa}$)
- Fibras de alto módulo ($E = 130 \text{ GPa}$)

Las fibras de aramida consisten en cadenas moleculares de poliamida aromática llamadas kevlar. La aramida se utiliza en materiales compuestos que requieren un bajo peso, una alta resistencia, rigidez, resistencia a la fatiga y a la ruptura a tracción. Tiene un buen comportamiento al corte y son muy susceptibles a la humedad.

Los materiales compuestos de fibra de aramida se consideran de altas prestaciones, ya que sus características mecánicas son muy elevadas, especialmente la resistencia al impacto. Sin embargo, tienen como punto débil la resistencia a compresión.

1.4 Clasificación de los materiales

1.4.1 Clasificación de los materiales según su origen

Materiales naturales: son aquellos que se encuentran en la naturaleza, las personas utilizamos materiales naturales con diferente origen: mineral, vegetal o animal [1] [37].

Materiales de origen mineral: se obtienen a partir de rocas y minerales. Los metales, la piedra o la arena son materiales de origen mineral.

Materiales de origen vegetal: se obtienen a partir de las plantas, el material de origen vegetal más importante es la madera, pero también existen otros que empleamos de forma habitual, como las fibras vegetales (algodón, lino, mimbre) o el corcho.

Materiales de origen animal: se obtienen a partir de animales, se obtienen el cuero o la lana que usamos en muchas prendas de vestir, en bolsos, zapatos, etc.

Materiales sintéticos: son aquellos creados por las personas a partir de materiales artificiales. Es decir, no se encuentran en la naturaleza ni ellos ni ninguno de sus componentes [37].

1.4.2 Clasificación de los materiales según sus propiedades

Según estas propiedades, podemos clasificar los materiales más usuales en los siguientes grupos: maderas, metales, plásticos, materiales pétreos, cerámicas y vidrios o materiales textiles.

Los materiales de cada uno de estos grupos poseen estructuras y propiedades distintas. Metales. Tienen como característica una buena conductividad eléctrica y térmica, alta resistencia, rigidez, ductilidad. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Las aleaciones (combinaciones de metales) conceden alguna propiedad particularmente deseable en mayor proporción o permiten una mejor combinación de propiedades ^[1].

Los metales: Estos materiales son sustancias inorgánicas que están compuestas de uno o más elementos metálicos, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos, ejemplo de elementos metálicos son hierro, cobre, aluminio, níquel y titanio mientras que como elementos no metálicos podríamos mencionar al carbono ^[37].

Los cerámicos: Tienen baja conductividad eléctrica y térmica y son usados a menudo como aislantes. Son fuertes y duros, aunque frágiles y quebradizos. Nuevas técnicas de procesos consiguen que los cerámicos sean lo suficientemente resistentes a la fractura para que puedan ser utilizados en aplicaciones de carga. Dentro de este grupo de materiales se encuentran: el ladrillo, el vidrio, la porcelana, los refractarios y los abrasivos ^{[1][37]}.

Los polímeros: en estos se incluyen el caucho, los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Se producen creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas fundamentalmente del petróleo ^[37].

1.5 Propiedades en ambiente marinos

Luego de las diferentes clasificaciones llevadas a cabo respecto de los tipos de materiales compuestos, y de los diferentes materiales que pueden intervenir en su composición como matrices, podemos afinar que los materiales compuestos de matriz polimérica, y en especial los de matrices termoestables, son los más utilizados con tales propósitos, argumentando a continuación algunas de las razones más importantes que derivan de este hecho ^[5].

El voluminoso tamaño que por lo general poseen las embarcaciones, hace impensable económicamente, al menos de momento, la utilización de otros materiales compuestos diferentes de aquellos en que intervengan las matrices termoestables.

Los materiales compuestos de matriz metálica se basan en la incorporación de refuerzos con fibras continuas, fibras discontinuas, y en la adición de partículas. La fabricación de estos compuestos se hace bien por la acción de presión y temperatura sobre

las capas del refuerzo entre láminas del metal, de forma que las láminas se deforman en torno a las figuras y se enlazan unas y otras, o bien mediante complicados procesos metalúrgicos de polvos y procesos de infiltración por fusión. Los costos de tales procesos hacen difícil su aplicación en la construcción de embarcaciones, siendo su finalidad, casi exclusivamente, aeroespacial.

Los materiales compuestos de matriz cerámica tienen como objetivo principal la de mejorar las características de los materiales cerámicos. Conocidas las propiedades de resistencia a las altas temperaturas de los materiales cerámicos. Los compuestos cerámicos buscan solución a la fragilidad que tienen muchos de los materiales a bajas temperaturas, evitando la fractura sin sacrificar la resistencia. Los tipos de refuerzo pueden ser a través de fibras continuas, fibras discontinuas y refuerzos con partículas. Los procesos de fabricación se basan en deposiciones químicas de vapor para la impregnación de los refuerzos, encapsulamiento de las fibras mediante un material vítreo-cerámico, o la compresión isostática en caliente. En todo caso, la complejidad de los procesos, así como la finalidad última de los materiales obtenidos, se alejan de la problemática presente en diseño y construcción de embarcaciones ^[5].

Por último, de los materiales compuestos de matriz polimérica, solo tienen utilidad en el campo naval las matrices termoplásticas y las termoestables. Los termoplásticos se utilizan únicamente en la construcción de piezas de tamaño reducido, debido a que su estructura molecular es lineal o ramificada; necesitan de calor y alta presión para moldearse, lo que eleva el costo de los moldes; la impregnación de las fibras de refuerzo se torna dificultosa dada la alta viscosidad de la matriz durante su elaboración, y éstas tienen tendencia a fluir a temperaturas medias.

En cambio, los materiales compuestos de matriz termoestable no necesitan de grandes inversiones en moldes ni controles de temperatura, ya que la mayoría de resinas se procesan a temperatura ambiente. Los procesos de fabricación requieren moldes sencillos, construidos por lo general con los mismos compuestos u otros más sencillos, como la madera, y las propiedades físicas y mecánicas finales son más que aceptables. El costo de la materia prima es razonable y la mano de obra, a pesar de ser numerosa y artesanal, no requiere de un alto grado de capacitación ^[5].

Por lo expuesto anteriormente, podemos concluir que los materiales compuestos utilizados en construcción naval quedan circunscriptos casi pura y exclusivamente a los poliméricos, y específicamente a aquellos que emplean matrices termoestables.

1.6 Utilización de materiales compuestos en la industria naval.

El uso de materiales compuestos orgánicos (OMC) en aplicaciones marinas data del año 1940. En la actualidad su uso se ha extendido a pequeñas embarcaciones. La utilización en grandes navíos y estructuras offshore no se ha generalizado debido fundamentalmente a que los diseñadores y constructores de este tipo de estructuras no están familiarizados con este tipo de material y deben desarrollar nuevas tecnologías que permitan su aplicación en la industria naval.

Existen en la actualidad una fuerte demanda de materiales compuestos para la fabricación de embarcaciones, submarinos y estructuras offshore debido a que permiten una reducción en peso del 25-50 % con respecto a los materiales tradicionales (aluminio y acero). Además, tienen una elevada resistencia a la corrosión (que se traduce en una disminución del mantenimiento), baja conductividad térmica, no resulta atraída por campos magnéticos y su reparación resulta sencilla ^[6].

En la industria naval el uso de materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio se ha extendido debido fundamentalmente a que presenta una muy buena relación precio-resistencia. Las fibras de vidrio tipo E son las más utilizadas debido a que tienen una buena resistencia y son resistentes al ataque del agua marina. La fibra de vidrio tipo S tiene una resistencia superior a la tipo E y tiene muy buena resistencia a la fatiga, pero su costo es elevado.

La aplicación naval más significativa de los materiales es en la construcción de buques buscaminas, debido a que este tipo de embarcaciones requiere fundamentalmente materiales con bajas propiedades magnéticas y buena resistencia a cargas de impacto. Otra aplicación la constituyen las embarcaciones de patrulla rápida. En la marina comercial existen aplicaciones en embarcaciones pesqueras pequeñas (<25m longitud) que se benefician en la reducción del peso y en el mantenimiento. En estructuras offshore los materiales compuestos se utilizan debido a su bajo peso y elevada resistencia a la corrosión. En el sector de las embarcaciones de competición los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono y aramida resultan muy utilizados debido fundamentalmente a su elevada resistencia en comparación con los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio, minimizan el peso y permiten construir embarcaciones de altas prestaciones. En el mundo de la competición los diseñadores utilizan tecnologías de punta, lo que permite obtener datos valiosos en cuanto a las prestaciones de los materiales que resultan útiles en otras aplicaciones en la industria naval ^[6].

1.6.1 Futuro de los materiales compuestos en la industria naval

Como resultado del continuo desarrollo de estos materiales, las propiedades mecánicas y físicas no se encuentran suficientemente caracterizadas. Los materiales compuestos de matriz de resina termoestable y refuerzos de fibra de altas prestaciones (aramida, carbono) resultan adecuados para estructuras que requieren poco peso con buenas características mecánicas. A pesar de poseerlas es necesario realizar mejoras y ensayos para establecer su respuesta bajo condiciones de servicio, por ejemplo degradación a la exposición por largo tiempo en agua de mar, cargas de fatiga impacto o resistencia al fuego ^[6].

Los materiales compuestos resultan especialmente indicados para colocar en su interior sensores y actuadores durante el proceso de fabricación con el objetivo de controlar deformaciones, temperaturas, vibraciones, rigidez, etc. Esta característica puede

facilitar información a diseñadores para optimizar el diseño estructural y los factores de seguridad en las estructuras.

Los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC) y los compuestos de matriz metálica (MMC) se utilizan solo en casos excepcionales en los que se requiere elevada resistencia a las temperaturas y rigidez.

Los métodos de ensayo de materiales compuestos se basan en los realizados en la industria aeronáutica y algunos no pueden aplicarse a la industria naval, por lo tanto es necesario definir ensayos y metodologías que permitan caracterizar estos materiales para aplicaciones en esta industria ^[6].

1.7 Procesos de manufactura de materiales compuestos

1.7.1 Método de contacto manual (hand lay-up)

Se coloca sobre el molde fieltros de fibra enrollada, mechas trenzadas y otros tejidos hechos de fibras y se impregnan con resina a brocha y pasando un rodillo. Se ponen capas hasta que se llegue al espesor de diseño. El moldeado cura sin calor ni presión, Figura 2 ^{[7][43]}.

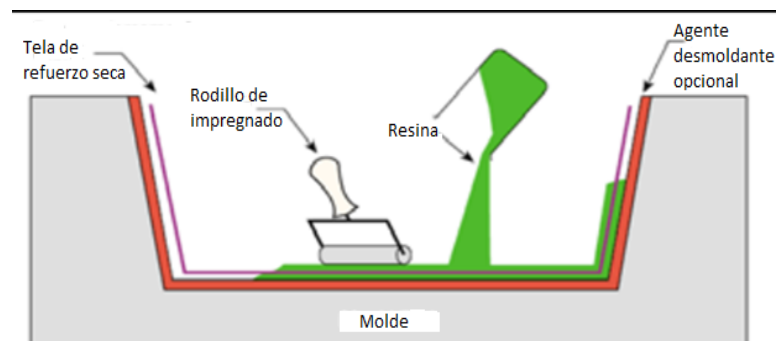


Figura 2 Moldeo por contacto a mano ^{[7][41]}.

1.7.2 Método de proyección (spray-up)

Se proyecta simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes de que la resina endurezca, Figura 3 ^{[7][43]}.

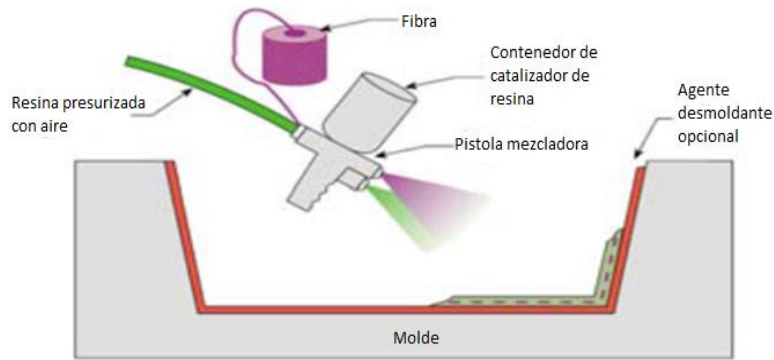


Figura 3 Proceso de proyección simultánea ^[7] [41].

1.7.3 Bolsa de vacío, bolsa de presión, autoclave

Se pre-impregnan capas de fibra, normalmente hojas unidireccionales, como resina y se curan parcialmente, para formar un pre-impregnado. Las hojas de pre-impregnado se colocan en la superficie del molde en orientación determinada, se cubren con una bolsa flexible, y se consolidan usando otro de vacío o de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida ^[43].

Se coloca una bolsa flexible sobre la mezcla de la resina y la fibra de refuerzo y se aplica presión sobre el molde en un intervalo que va de 200 a 400 kPa (30 a 50 psi). Si se requiere mayor calor y presión para producir partes con mayor densidad y menos huecos, todo el ensamble se coloca en una autoclave (cámara bajo calor y presión). Si se desean propiedades direccionales específicas, es necesario mantener la orientación de las fibras, Figura 4 ^[7].

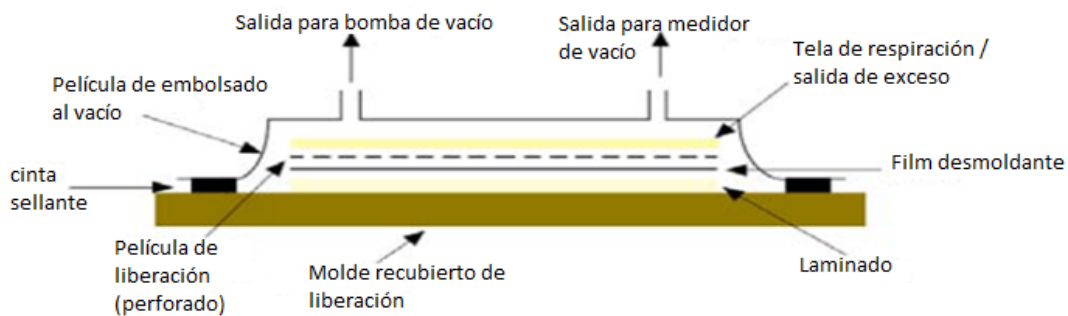


Figura 4 Proceso de fabricación de bolsa de vacío ^[7] [41].

1.7.4 Enrollamiento de fibras

Mechas o hilos continuos de fibra se pasan sobre rodillos y guías y pasan por un baño de resina y se enrollan después, usando una maquina controlada por programa sobre un mandril con ángulos preestablecidos. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente, normalmente un tubo, del mandril, Figura 5 ^{[7] [43]}.

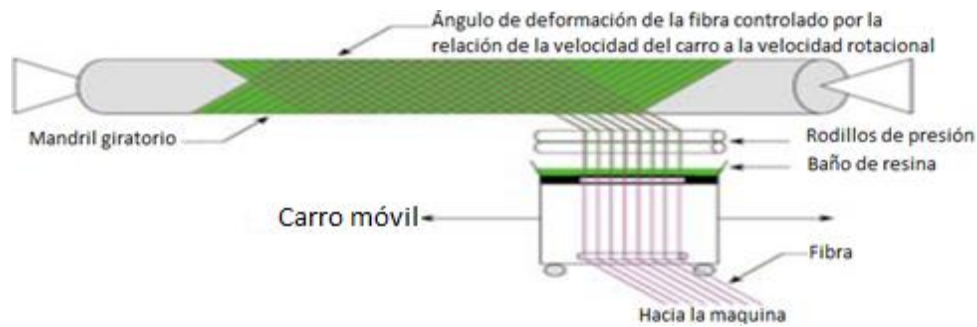


Figura 5 Enrollamiento en húmedo de filamentos ^{[7] [41]}.

1.7.5 Molde de centrifugado

Se trata de un proceso similar al devanado de filamentos (filament windin) en cuanto a que permite obtener cuerpos huecos cilíndricos o eventualmente troncocónicos, en este caso en particular con la ayuda de la fuerza centrífuga ^{[7] [43]}.

1.7.6 Moldeo por compresión en caliente

Las matrices o útiles, calientes y acoplados, se cargan con materia prima (compuestos de hojas continuas SMC, premix o pasta DMC, tejido o pre impregnado unidireccional) y se comprimen para que se adapten a la cavidad y curen, Figura 6 ^[7].

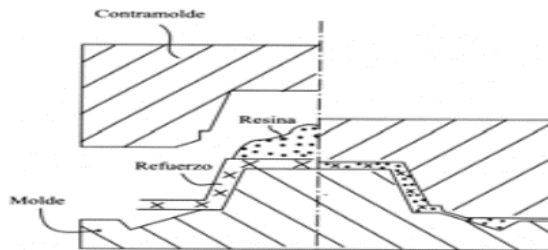


Figura 6 Moldeo por prensado ^[7].

1.7.7 Pultrusión

Una alimentación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregnan con resina y se comprimen a través de un útil calentado (trefila) para darle la forma de la sección final. Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total, Figura 7 ^{[7][43]}.

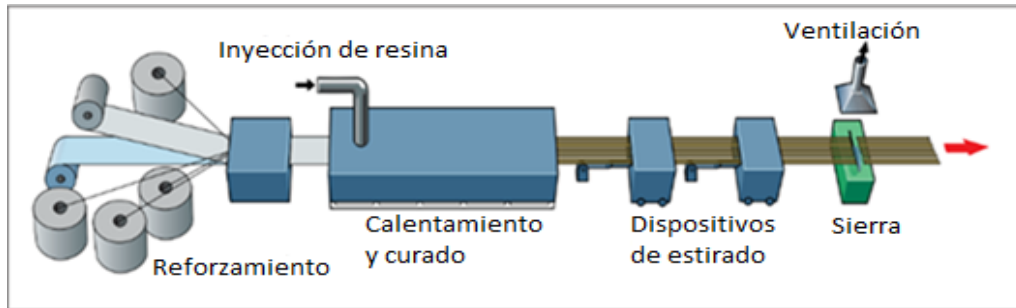


Figura 7 Moldeo por pultrusión ^[7].

1.7.8 Moldeo por inyección o moldeo de transferencia

Este proceso se basa en el moldeo por transferencia. Una resina se mezcla con un catalizador y se fuerza, mediante una bomba de desplazamiento positivo tipo pistón, dentro de la cavidad del molde, que se llena con un refuerzo de fibras. Este proceso es una alternativa viable para el arreglo manual, el rociado y el moldeo por compresión para volúmenes bajos o medios de producción. Figura 8 ^[7].

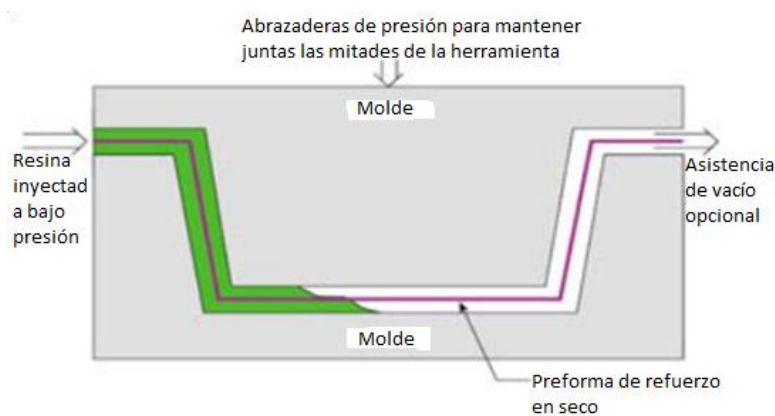


Figura 8 Moldeo por transferencia de resina ^{[7][41]}.

1.7.9 Moldeo por transferencia o inyección

Ésta es una operación automatizada que combina los procesos de moldeo por compresión, por inyección y por transferencia. Esta combinación tiene buen acabado superficial, estabilidad dimensional y propiedades mecánicas obtenidas en el moldeo por compresión, capacidad de alta automatización y el bajo costo del moldeo por inyección y por transferencia ^{[7] [43]}.

Capítulo 2 ANTECEDENTES DE LAS UNIONES

2.1 Introducción

2.1.1 El reto de unir todo con todo.

El unir unas cosas con otras ha sido y es, una necesidad primordial del hombre, la cual incluye todos los sistemas y actividades productivas en que intervienen los materiales. Desde la fabricación de muebles, coches, edificios, ordenadores, vestidos y demás objetos que utilizamos en nuestra vida diaria, son productos complejos que necesitan para realizarse la colaboración de diferentes partes elementales, fabricadas por separado, que finalmente deben ser unidas ^[50].

En un expendedor de unos grandes almacenes se puede encontrar infinidad de productos para un mismo sistema de unión: madera, papel, metal, cerámica, plástico, vidrio y sus correspondientes combinaciones; madera con vidrio, cerámica con metal o plástico con papel. Algunos de estos adhesivos se venden como universales, es decir, que el fabricante lo recomienda como solución eficaz para cualquier sistema de unión ^[9].

2.1.2 Las uniones.

Las formas de unión de dos piezas independientes se dividen en tres grandes grupos: mecánicas, soldadas y adhesivas, o una combinación de las anteriores, uniones mixtas (Figura 9). Las uniones mecánicas (atornillado, roblonado, remachado o cosido, etc.) han sido las más empleadas, para todo tipo de materiales, hasta principios del siglo XX ^[50].



Figura 9 Tipos de uniones ^{[9] [50]}.

Durante ese siglo la soldadura de los materiales metálicos alcanzó un nivel tan sorprendente, que de ser un proceso residual, se transformó en el sistema más importante de unión desde el punto de vista de los materiales, tecnologías y procesos desarrollados. Relegando a los otros sistemas de unión a un segundo plano.

El desarrollo de los polímeros sintéticos durante la segunda mitad del siglo XX, el principal cambio no ha sido únicamente la aparición de nuevas formulaciones y aplicaciones, sino el cambio de mentalidad que ha supuesto el diseño de nuevos componentes, o el rediseño de estructuras tradicionales para que su unión adhesiva sea más eficiente, los adhesivos pueden llegar a convertirse en el sistema de unión más importante del siglo XXI^{[9] [50]}.

Los principales inconvenientes de los adhesivos provienen de su naturaleza polimérica: en primer lugar sólo son estables a temperaturas relativamente bajas, en segundo lugar envejecen con el tiempo y tercer lugar se degradan en función de su naturaleza, con la humedad, el calor, la luz u otras radiaciones ionizantes. Estas limitaciones permiten que otros sistemas de unión como la soldadura de los materiales metálicos mantengan su hegemonía en todas aquellas aplicaciones donde no sea posible la presencia estable de uniones adhesivas^{[9] [50]}.

2.2 Uniones mecánicas.

2.2.1 Técnicas de unión mediante dispositivos accesorios.

2.2.1.1 Puntas.

El dispositivo de unión más antiguo y sencillo es el clavo o más estrictamente la punta; se trata de un dispositivo que se aplica a la unión y sujeción de materiales no frágiles, generalmente madera y sus derivados, corcho, yeso, etc., las puntas están fabricadas en acero de diferentes calidades y pueden estar protegidas mediante un galvanizado o un baño de metal que las hace más resistentes a la corrosión; su forma alargada y esbelta debe tener la suficiente rigidez como para penetrar en la madera sin doblarse y a la vez ser tenaces para no partirse fácilmente y, cuando se considere conveniente, ser remachadas^[9].

2.2.1.2 Roblonado y remachado.

Un remache consiste en una espiga de diámetro $\varnothing$, provista de una cabeza de asiento, que está destinada a introducirse a través de las piezas a enlazar, previamente perforadas, de forma que - una vez introducido se le forme una segunda cabeza que efectúe el cierre de la unión. Cuando se ha formado esta segunda cabeza el remache se ha transformado en un roblón^[47].

La unión mediante roblones se realiza a través de perforaciones practicadas en las piezas a unir de forma que el roblón actúa como un tornillo pasante; la diferencia estriba en que el roblón no se rosca a la última pieza a unir, ni se sujeta mediante una tuerca, sino

que la parte de roblón que sobresale de la estructura se remacha hasta formar una segunda cabeza que impide que el roblón se suelte ^[9].

2.2.1.3 Tornillos.

Para formar uniones desmontables, así como para lograr una mayor velocidad de ejecución de las uniones, se utilizan los tornillos. Se distinguen tres clases de tornillos: Los ordinarios o tornillos negros; los calibrados o ajustados y los de alta resistencia, que tienen su estudio separado, ya que producen una unión diferente a los dos primeros. La forma de trabajar de los tornillos es análoga a la de los roblones, de ahí que el cálculo de las costuras atornilladas, así como su morfología, sean las mismas y se puedan estudiar de manera conjunta ^[47].

2.2.1.4 Otros dispositivos de unión mecánica.

Hay una gran variedad de dispositivos que permiten unir partes en un todo, los más habituales son las abrazaderas y los racores. Las abrazaderas son dispositivos que constan de una pletina y un tornillo que permite fijarlas sobre las piezas a unir, generalmente tubulares. Los racores son dispositivos, fileteados interiormente, que unen tubos roscados en sus extremos, pudiendo ser rígidos o flexibles, de acuerdo con la finalidad que posean.

2.2.2 Técnicas de unión mediante ensamblaje.

Se llama ensamblaje a la conexión o unión de dos o más piezas, habitualmente de madera, pero también plástico, metacrilato o cualquier otro material capaz de ser cortado y tallado, de forma que unas piezas encajen rígidamente en otras, en muchas ocasiones, además del encastre entre piezas, se refuerza la unión mediante adhesivos, puntas, tornillos, etc.

Los tipos de ensamblaje más habituales son los siguientes: ensamblaje a tope, que en realidad es el simple contacto entre piezas reforzado mediante adhesivo o puntas, ensamblaje de caja y espiga, de cola de milano, ensamblaje recto de media madera caracterizado por tener espigas más finas y numerosas que el de caja y espiga ^[9].

2.2.3 Técnicas de unión mediante engarzado o engargolados.

Se producen por medio de una secuencia de dobleces en radios agudos. Los engargolados plegados se pueden hacer impermeables con o sin rellenos como adhesivos, sellos poliméricos o soldadura. Algunos engargolados se realizan a lo largo de líneas rectas, otros se hacen a lo largo de los bordes de piezas circulares, como las tapas de latas. Un doblez se forma cuando los bordes de una pieza se voltean sobre la otra ^[48].

Esta técnica de unión se puede combinar fácilmente con el pegado, permite obtener una junta estanca mediante la adición de masilla, adhesivo o una junta, en la medida de lo posible, el engarce debe diseñarse de forma que los cantos no queden expuestos (Figura 10). Sin embargo, el engarce queda limitado a geometrías sencillas, lo que excluye su utilización en esquinas.

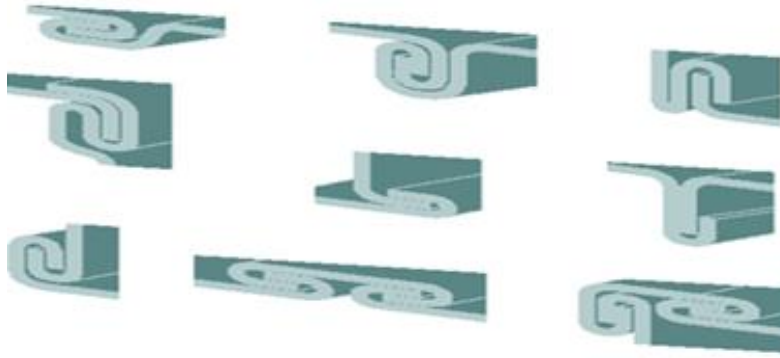


Figura 10 Diseño de engarce para evitar que los cantos queden expuestos

La unión realizada no se puede desmontar, desde un punto de vista mecánico, presenta una baja resistencia al deslizamiento en el sentido del engarce y una reducida resistencia a la apertura.

2.2.3.1 Técnicas de unión mediante recalcado o clinchado.

Es un método de unión de chapas y perfiles sin aportación de material, que se realiza en frío, consiste en crear una deformación que afecta a ambas chapas (Figura 11), de manera que esta deformación es la que las mantiene unidas.

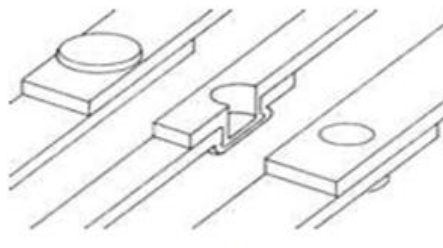


Figura 11 Deformaciones producidas en las chapas unidas mediante recalcado

El clinchado permite unir las chapas y los perfiles por deformación en dos espesores o más. Este método permite unir las chapas aunque sus superficies estén lacadas, pintadas, plastificadas o metalizadas.

En el clinchado un punzón empuja a las dos chapas hasta un agujero de la máquina de forma que se produce una gran deformación permanente en las dos chapas (figura 12). Las deformaciones producidas impiden que las chapas unidas se separen.

Con este método se obtiene una unión de alta calidad en cuanto a su aspecto, resistencia y además es fácilmente repetible. La característica de este sistema es que el

mismo metal a unir provee la unión sin generación de calor, ruido o agregado de otros componentes ^[9].

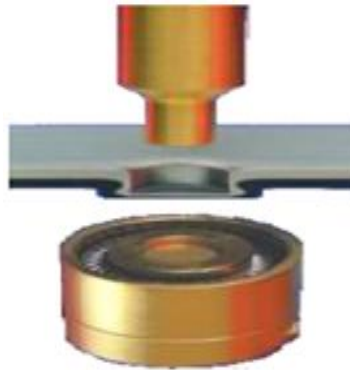


Figura 12 Método de realización de la unión por clinchado

2.2.4 Uniones soldadas.

Soldar es unir dos piezas de igual o distinta naturaleza mediante una perfecta unión entre ellas, casi siempre con la aportación de calor, con o sin aplicación de presión, y con o sin empleo de material de aportación, pudiendo tener este la misma o distinta composición que los metales a unir. El procedimiento de soldadura más antiguo entre los conocidos es el de soldadura por forja, que consiste en calentar las piezas a unir hasta su punto de fusión, para luego unir las entre sí por presión ^[47].

El desmontaje no es posible o es muy difícil. Durante la soldadura se alcanzan altas temperaturas, que causan tensiones no deseadas pudiendo provocar el fallo del componente y modificaciones de la estructura cristalina de las piezas metálicas ^[9].

2.3 Uniones con adhesivos.

2.3.1 Ideas generales.

Los primeros adhesivos ya se utilizaban 3300 años AC, eran adhesivos derivados de sustancias naturales tales como la caseína de la leche, la sangre de animales, colas obtenidas por calentamiento a temperaturas de ebullición de huesos de animales y de raspas de peces, almidón obtenido de las plantas, resinas de los árboles, etc. Sin embargo el empleo de los adhesivos prácticamente desaparece en la Edad Media, para reaparecer de nuevo en los siglos XVII al XIX, usándose en sectores artesanales de muebles y marroquinería. A finales del siglo XIX se desarrollaron los adhesivos de caucho. Pero el gran desarrollo de los adhesivos sintéticos se produjo en el siglo XX, especialmente después de la Segunda Guerra Mundial. Cuando se empezaron a utilizar materiales más resistentes, metales, cementos, plásticos, cerámicas, etc., la

misión del adhesivo dejó de ser el coadyuvador, en igualdad de condiciones, a la resistencia del conjunto, pasando a ser complemento de otro tipo de uniones tales como puntas, tornillos, ensamblajes, etc.^{[9][50]}.

Con el desarrollo de la química orgánica, los adhesivos experimentaron un avance extraordinario, basado en la aplicación de polímeros a la unión química de elementos destinados a trabajar como un todo, la resistencia de las uniones así realizadas alcanza valores que permiten utilizar las piezas adheridas como elementos estructurales, en estos casos, la adherencia suele ser física; hay una ocupación de las rugosidades y poros, inherentes a estos materiales, que permite la trabazón o fijación del conjunto.

Quizás el punto débil de la unión realizada mediante adhesivos esté en su baja resistencia a los esfuerzos de tracción, y es también en ese terreno donde la utilización de los nuevos adhesivos poliméricos ha obtenido mejores resultados^[9].

2.3.2 Principales ventajas de los adhesivos.

Respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales, las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas^[44]:

- Se consigue una alta distribución de tensiones, que además es uniforme, lo que reducirá la formación de puntos de concentración de tensiones en nuestra unión.
- No se produce distorsión del sustrato.
- Las uniones son selladas, evitando la entrada de suciedad u otros cuerpos a la unión.
- Permiten uniones híbridas, es decir, uniones entre componentes de distintos materiales.
- Permiten un aislamiento acústico, térmico y eléctrico.
- Generalmente son más económicas que otros métodos de ensamblaje

2.3.3 Uniones híbridas.

Se denominan uniones híbridas a aquellas en que dos o más medios de unión distintos, soldadura o tornillos, colaboran para transmitir un determinado esfuerzo entre dos piezas distintas. No se consideran como tales la transmisión de un cierto esfuerzo de una pieza a otra utilizando un determinado medio de unión, y de esta segunda pieza a una tercera utilizando un medio diferente^[49].

Las uniones híbridas soldadura adhesivo se desarrollaron en la Unión Soviética para la fabricación de aviones de transporte, posteriormente varias compañías aeronáuticas norteamericanas estudiaron el proceso.

2.3.4 Distribución de tensiones en montajes soldados, remachados y unidos con adhesivos.

Los estados tensionales a los que quedan sometidas dos placas que se unen mediante soldadura y mediante adhesivo son similares, es decir en ambos casos las tensiones a lo largo de toda la longitud de unión son uniformes, tienen un valor constante.

Sin embargo cuando se trata de uniones con remaches las tensiones a lo largo de la unión son variables (Figura 13).

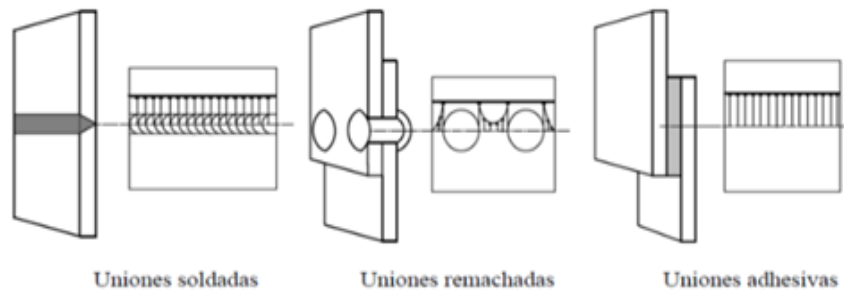


Figura 13 Distribución de tensiones en diferentes tipos de unión ^[48].

2.4 Adhesivos.

2.4.1 Definición.

Un adhesivo es un material que permite la unión entre dos superficies o sustratos, en el que actúan dos fuerzas esenciales, la adhesión y la cohesión (Figura 14): la adhesión es la fuerza de unión que se produce entre el adhesivo y el sustrato y la cohesión es la resistencia ejercida en el interior del adhesivo ^{[44] [50] [52]}.

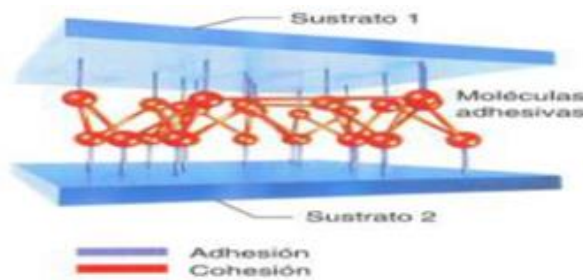


Figura 14 Esquema de las fuerzas esenciales que actúan entre dos sustratos unidos con adhesivo ^{[44] [50] [52]}.

Los adhesivos son puentes entre las superficies de los sustratos, sean éstos del mismo o de diferente material.

La capacidad de retener materiales juntos no es, una propiedad intrínseca de una sustancia sino que, más bien, depende del contexto en el que se usa la sustancia.

A principios del siglo XX Budgett comprobó que la resistencia de dos superficies unidas por presión y muy limpias era muy débil, frente a la obtenida cuando se interponían entre ambas superficies capas delgadas de aceite o agua, donde la resistencia de la unión era mucho mayor. En todos los casos la rotura tenía lugar en la capa de líquido y nunca por la interface líquido-sólido, demostrando que la resistencia de la unión era debida a las fuerzas de cohesión del líquido. La adhesión depende de tres factores: mecánico (rugosidad y acabado superficial), físico (humectación del sustrato) y químico (naturaleza y afinidad que existe entre el sustrato y el adhesivo) ^[50].

El adhesivo, una vez aplicado, alcanzará sus máximas propiedades tras el proceso de curado. El curado consiste en la transformación del adhesivo desde un líquido, más o menos viscoso, en un sólido. Este proceso puede durar, en función del adhesivo, desde escasos segundos a varias semanas.

2.4.2 Fundamentos.

El funcionamiento, y en muchos casos la existencia, de gran variedad de productos y estructuras de uso común en la sociedad moderna, dependen de los adhesivos y sellantes, muchas variedades de contrachapado no existirían si no fuera por los adhesivos, las construcciones que utilizan paredes prefabricadas no existirían sin los sellantes. La aviación de alta tecnología, particularmente los modelos militares, no habrían logrado su actual nivel de desarrollo sin las estructuras unidas con adhesivos. Asimismo, el aislamiento de los paneles múltiples de cristales de ventanas, depende de los adhesivos sellantes para su desarrollo.

Entre las cintas adhesivas por presión, que requieren la sola presión del índice para hacer su función, y el mundo de la alta tecnología de los adhesivos estructurales aeroespaciales que requieren la ayuda de una tecnología complementaria para su uso apropiado, existe un amplio espectro de adhesivos de varias formas y funciones.

La forma más común de realizar este curado, en el caso de los adhesivos, es mediante la aplicación de calor y presión. Los métodos necesarios para la aplicación de calor y presión son altamente dependientes de la geometría (y tamaño) de las piezas a unir y pueden tener un gran impacto en la fabricación.

Lo cual significa que la aplicación de la tecnología apropiada de adhesivos, requiere una cuidadosa integración de la tecnología de materiales con (por lo menos) las consideraciones de diseño, fabricación, utilización, y costo.

2.4.3 Historia.

Los adhesivos son productos orgánicos naturales o sintéticos, los cuales son utilizados por gran variedad de animales en aplicaciones tales como telas de araña (Figura 15), capullos de orugas (Figura 16), huevos de insectos adheridos sobre hojas o ramas, agrupaciones de huevos de peces y anfibios, nidos de pájaros, etc.^[50].



Figura 15 Tela de araña sujeta por adhesivo natural^[50].



Figura 16 Capullo de orugas sujeto por adhesivo natural^[50].

El hombre primitivo descubrió también el uso de los adhesivos, los primeros hallazgos se remontan a la Prehistoria. Se han encontrado puntas de jabalina unidas a sus astas, así como collares en los que la sangre de animales era el agente adhesivo^{[9] [50]}.

Plinio describe cómo los romanos calafateaban sus naves con alquitrán de madera de pino y cera de abeja. Los romanos, al igual que los primitivos chinos, obtenían un adhesivo sacado del jugo del muérdago que untaban en las ramas para atrapar a los pájaros. Durante el Imperio Bizantino se conocen recetas para fabricar adhesivos de los peces, cuernos de venado y queso.

Durante la Edad Media el uso de adhesivos en Europa Occidental se reduce considerablemente. Entre otros se perdió el arte de encolado y es hasta el siglo XVI cuando aparecen muebles ingleses donde vuelven a utilizarse los adhesivos.

A finales del siglo XVII se funda en Holanda la primera planta industrial para la producción de colas animales. En el año 1800 comienza la fabricación comercial de cola de caseína en Alemania y Suiza. En 1823 el caucho natural empieza a utilizarse comercialmente como adhesivo. En 1840 comienzan a usarse los sellos de correos que emplean adhesivos con base almidón. En esas mismas fechas se descubre la vulcanización (curado del caucho natural por acción del azufre) que además de mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad del caucho, permitía la unión de caucho y metal, desarrollándose los adhesivos en base de látex hacia 1897^{[9] [50]}.

La madera contrachapada fue desarrollada hacia 1900, donde se utilizaban adhesivos para unir varias capas de madera. En 1910 se desarrolló el fenol formaldehído, que fue el primer

adhesivo sintético. Durante la 1ª Guerra Mundial se utilizaron adhesivos de origen animal y natural (albúmina, leche) para unir las estructuras de fuselajes y alas de los aviones realizadas en madera. En 1929 se patentó el adhesivo de dos componentes de curado en frío, fabricado con resinas fenólicas ^[50].

En la década de 1950 se empezaron a formular los adhesivos epoxi. A partir de los cincuenta, se han desarrollado gran variedad de adhesivos que incluyen los cianoacrilatos, anaeróbicos, diversos copolímeros, acrílicos, silanos, etc.

En la actualidad, los adhesivos ocupan una posición ya importante en la unión y/o sellado de juntas en gran cantidad de aplicaciones: industria aeronáutica, automóvil, ferroviaria, naval, mobiliaria, armamento, embalaje, línea blanca, construcción, etc. Y su desarrollo implica cada vez más sistemas y componentes, tanto actuando en solitario como en combinación con otros sistemas de unión ^[9].

2.4.4 Adhesión y Cohesión.

2.4.4.1 Definiciones.

La adhesión es, la suma de las fuerzas físicas y mecánicas de atracción y adsorción. La máxima adhesión se consigue cuando el adhesivo está en contacto íntimo con las zonas a unir (Figura 17). Este es el motivo por el que el adhesivo debe penetrar totalmente en la rugosidad superficial y mojar toda la superficie ^{[44] [50]}.

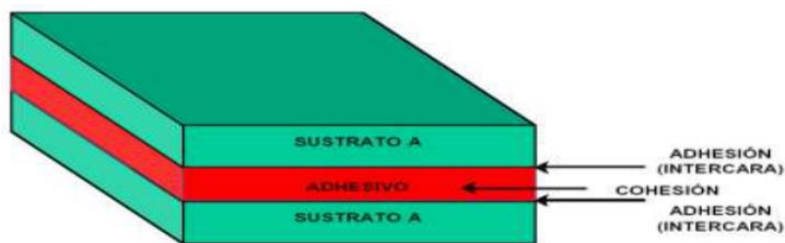


Figura 17 Esquema general de fuerzas de adhesión y cohesión ^[9]

La resistencia de la fuerza adhesiva depende del grado de mojado y de la capacidad adhesiva de la superficie. Para una determinada tensión superficial del adhesivo, el mojado depende de la energía superficial del sustrato. La contaminación superficial reducirá notablemente esta energía, por lo que la limpieza de las superficies a unir es un factor importante para obtener una buena unión adhesiva ^[50].

La cohesión es la fuerza entre las moléculas dentro del propio adhesivo, manteniendo el material unido. Estas fuerzas incluyen los enlaces interatómicos fuertes de las cadenas poliméricas y los enlaces intermoleculares débiles (fuerzas de Van Der Waals) de atracción entre distintas cadenas. La cohesión del adhesivo será por tanto la máxima resistencia esperable de la unión adhesiva ^{[9] [50]}.

2.4.4.2.- Partes que componen la unión.

En la Figura 18 se muestra un ensamblaje unido mediante un adhesivo ideal. La terminología, tal como se define en ASTM D907-89, tiene el siguiente significado:

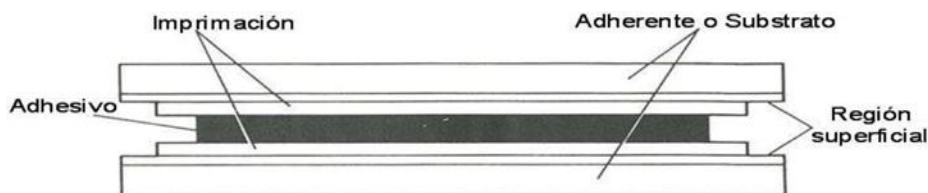


Figura 18 Partes de una unión con adhesivo.

- Adherente: Es un cuerpo retenido a otro cuerpo mediante un adhesivo.
- Sustrato: Es un material que está en la superficie, sobre el cual se esparce una sustancia que contiene el adhesivo, con algún propósito, tal como afianzar o revestir. Un término más amplio que adherente.
- Imprimación: Es un revestimiento que se aplica en la superficie, anterior a la aplicación de un adhesivo, para mejorar la adhesión.
- Adhesivo: Es una sustancia capaz de retener juntos materiales a través de la superficie de contacto.

2.4.4.3 Tipos de fallos de la unión.

El mecanismo de una unión adhesiva depende de la resistencia de la unión entre el sustrato y el adhesivo y de las fuerzas internas del adhesivo. 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 manera adecuada, sufrirá un daño que posiblemente, desembocara en el fallo de la unión ^{[44] [46] [50]} (Figura 19):

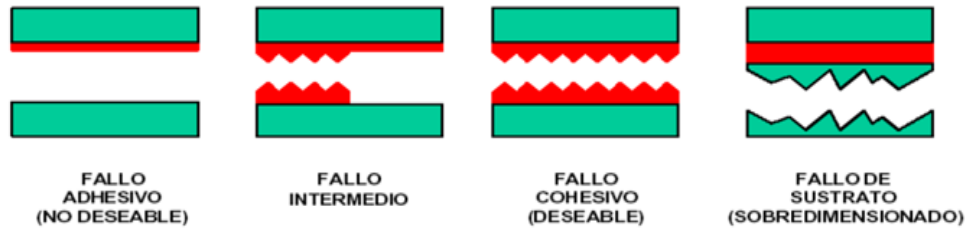


Figura 19 Tipos de fallos de una unión con adhesivo ^{[44] [46] [50] [52]}.

1. Fallo por cohesión: cuando se produce la ruptura del adhesivo.
2. Fallo por adhesión: cuando la separación se produce en la interface sustrato adhesivo.
3. Rotura del sustrato: cuando el propio sustrato rompe antes que la unión adhesiva o que la interface sustrato-adhesivo.

La rotura del sustrato se produce cuando se ha sobredimensionado la zona de unión, en función de las propiedades del metal base. Este fallo se considera un defecto de diseño, ya que se ha utilizado una cantidad de adhesivo superior a la mecánicamente necesaria, con el coste económico que eso supone ^[50].

2.4.5 Mecanismos de actuación del adhesivo.

Se han desarrollado diversas teorías que intentan explicar el fenómeno de la adhesión, aunque ninguna de ellas es capaz de explicar el proceso de adhesión en su conjunto, de hecho algunas uniones necesitan la combinación de más de una teoría para explicar el proceso que tiene lugar. Los modelos de adhesión más aceptados son los siguientes ^[50]:

1. **Modelo mecánico**: La adhesión se debe al anclaje del adhesivo en los poros y oquedades superficiales del sustrato, por lo que el aumento de rugosidad superficial y la presencia de oquedades mejoran la adhesión.
2. **Modelo de la difusión**: La adhesión la produce la migración de las cadenas poliméricas entre las dos superficies en contacto. Si el adhesivo y adherente son polímeros miscibles, esto mejorará la difusión y por tanto la adhesión.
3. **Modelo termodinámico**: La adhesión está causada por la formación de enlaces secundarios (fuerzas de Van der Waals, enlaces de hidrógeno) entre adhesivo y sustrato. La adhesión aumentará al mejorar la mojabilidad, ya que si se producen muchos enlaces secundarios la fuerza de enlace será mayor.

2.4.6 Adhesión estructural.

Es aquel que usado en combinación con un material estructural, trabaja de modo que la junta o línea de encolado no falle cuando el material trabaje a tensiones de hasta su límite elástico y permita que la estructura trabaje según requerimientos mecánicos y físicos ^[45].

La unión de materiales con adhesivos tiene ventajas importantes frente a los métodos mecánicos. Un adhesivo distribuye cargas y tensiones por toda la unión para conseguir una distribución más uniforme de las cargas estáticas y dinámicas, en lugar de concentrarlas en puntos de extrema tensión. Por tanto, la unión adhesiva es más resistente a la flexión y a la vibración que una unión remachada.

También es preciso considerar la preparación de las superficies, los métodos de aplicación y los sistemas de curado, así como el tiempo y el costo de estos aspectos de la unión ^[9].

2.4.7 Diseño de uniones adhesivas.

2.4.7.1 Ideas generales.

El diseño de la unión con adhesivos debe ser tal que aumente la capacidad del adhesivo de distribuir las cargas de la manera más uniforme posible por toda la superficie de unión, existen ciertas zonas que son focos de concentración de tensiones, tales como fallos y discontinuidades en la región de la unión, incluyendo los bordes. Las cargas que se dirigen fuera del plano de la unión tienden a ser concentradas en áreas muy pequeñas, de tal forma que las tensiones locales pueden ser varias veces superiores a las tensiones aplicadas ^[50].

La regla general en diseño de juntas es maximizar el área de afianzamiento y poner en la medida de lo posible la carga en cortadura, mientras se minimizan las fuerzas de pelado y compresión, una cuestión importante a la hora de diseñar una unión es pensar en cómo se va a realizar el programa de ensayos de la unión, inicialmente se deben hacer ensayos para elegir el adhesivo y los componentes adecuados, posteriormente se realizan ensayos para predecir la vida y las características de la unión.

Para que el resultado de los ensayos tenga valor en la predicción de la durabilidad de la unión, los modos de carga y las condiciones ambientales deben ser, lo más parecidas posible a las que se esperan en la vida real ^[9].

El diseño de la unión se considera el parámetro más importante para sacar el mejor provecho del adhesivo elegido. El diseño debe ajustarse a los límites de aplicación del adhesivo y optimizarse para evitar las cargas más severas sobre una unión (pelado, desgarro).

2.4.7.2 Cargas y tensiones resultantes.

Las cargas que actúan sobre una unión adhesiva producen varios tipos de tensiones (Figura 20), las tensiones se expresan normalmente en N/mm^2 . En el caso de las cargas de compresión (Figura 22), la distribución de tensiones sobre la línea de unión es muy uniforme. Así, todas las zonas de la línea de unión soportan la misma carga y, para calcular las tensiones, simplemente se calcula el cociente entre fuerzas incidentes y área de unión. En la práctica, las cargas de tracción y compresión puras son muy poco habituales y es más frecuente encontrar cargas de cizallamiento (Figura 21), desgarro (Figura 24) y pelado (Figura 23). La distribución de tensiones, es decir, la repartición de los esfuerzos en la línea de unión, es menos uniforme y su cálculo es más complicado ^[46]_[50].

Las tensiones de cizallamiento se distribuyen sobre la unión de manera que aparecen concentraciones, los extremos deben resistir tensiones mayores que el centro si se aplica una carga de desgarro o pelado a una unión, la mayor parte de la tensión se concentra en un extremo.

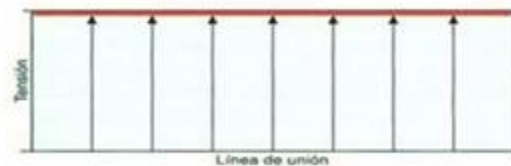
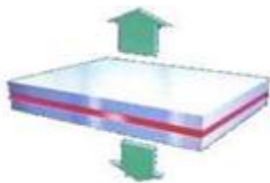


Figura 20 Tracción y su comportamiento ^[46] _[50] ^[51].

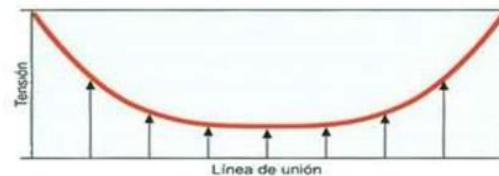
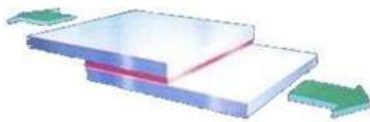


Figura 21 Cizallamiento y su comportamiento ^[46] _[50] ^[51].

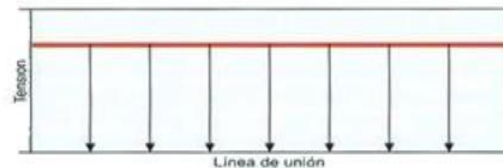
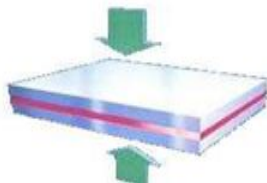


Figura 22 Compresión y su comportamiento ^[46] _[50] ^[51].



Figura 23 Pelado y su comportamiento ^{[46] [50] [51]}.

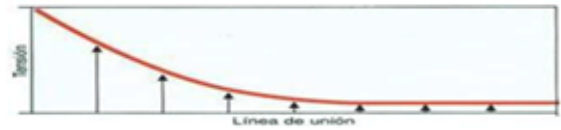
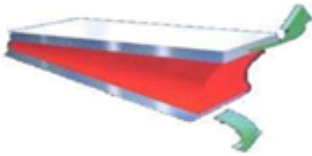


Figura 24 Desgarro y su comportamiento ^{[46] [50] [51]}.

2.4.7.3 Diseño de la unión adhesiva.

Al diseñar una junta adhesiva, lo que se pretende es conseguir que la distribución de las tensiones sea lo más uniforme posible. Por tanto, se debe comprender bien cómo se distribuyen las tensiones en una junta sometida a una fuerza. Hay varias directrices a considerar para diseñar una junta adhesiva, que son las siguientes ^[50]:

Minimizar la carga de pelado y de desgarro: Si se observan las curvas de distribución de tensiones de la figura adjunta, se puede ver que las fuerzas de pelado y de desgarro deben eliminarse en la medida de lo posible. Dependiendo de cómo actúen las fuerzas de pelado se puede diseñar un tipo de solución adecuado (Figura 25).

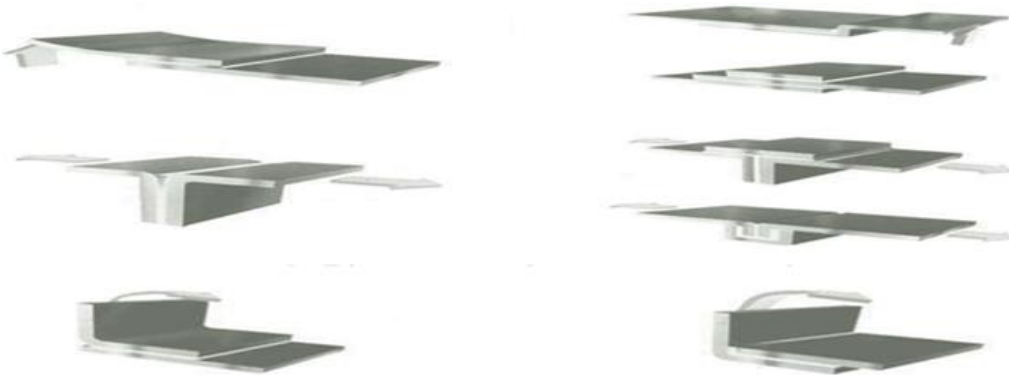


Figura 25 Diseños típicos de unión para minimizar las cargas de pelado y desgarro ^[50].

Maximizar el área de unión: Otra manera sencilla pero muy importante de mejorar una junta adhesiva o, simplemente, de realizar un diseño adecuado para la unión adhesiva es aumentar el área de unión (Figura 26). Si el área de unión es demasiado pequeña, suele inducirse una tensión de pelado o desgarro excesiva. La rigidez de los componentes y del adhesivo afecta a la carga de rotura de una unión. En general, cuanto más rígido sea el componente, menos afectará la geometría de la junta a la resistencia de la unión.

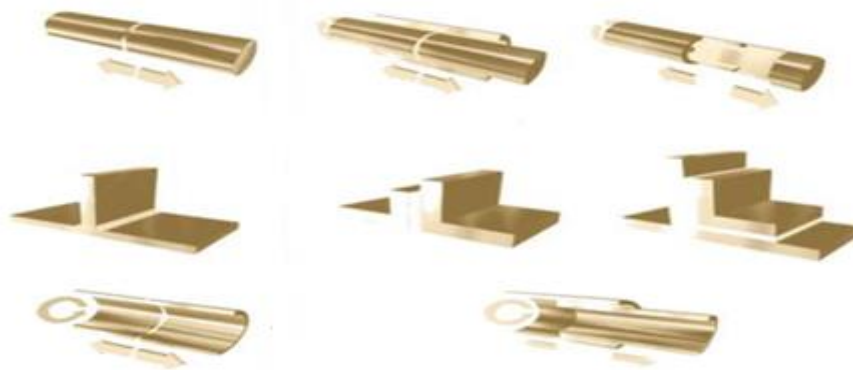


Figura 26 Diseños típicos de unión para maximizar el área de la unión

2.4.8.2 Cargas externas.

Las uniones realizadas con adhesivos se pueden cargar en cualquiera de los tres modos simples: tensión, compresión, o cortadura, todas las demás cargas son combinación de estos tres modos.

Debe tenerse en cuenta que por causa de que las uniones con adhesivos son estructuras compuestas de materiales que normalmente tienen diferentes propiedades mecánicas, y porque hay ciertas limitaciones en tales uniones, un modo de carga externa simple, produce normalmente tensiones complejas y no uniformes. Las excentricidades en uniones de delgado espesor, pueden producir modos de tensión que no existen en las cargas externas.

2.4.8.3 Uniones a solape.

Las uniones a solape, son las más usadas al unir mediante adhesivos y las que utilizaremos en este proyecto, pues son las uniones más sencillas de realizar y además permiten unir materiales de espesores pequeños ^[46]. Supóngase una unión a solape como la mostrada en la Figura 27, cuyas dimensiones son las que se muestran, y se va a someter a una fuerza F , según se indica.

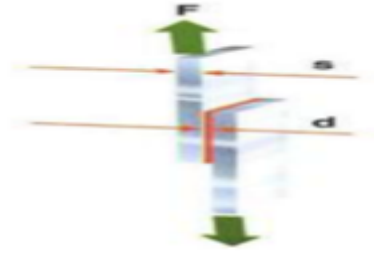


Figura 27 Uniones a solape. Dimensiones fundamentales ^[46].

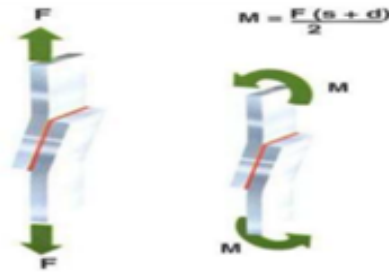


Figura 28 Uniones a solape. Tipos de tensiones generadas durante el proceso de carga ^[46].

Por el hecho de someter a la unión a la carga citada se producen dos tipos de tensiones (Figura 28), las generadas directamente por la aplicación de la carga F, y las generadas por el momento flector resultante por el hecho de que las cargas no actúan en la misma línea.

Las uniones solapadas son probablemente las que más comúnmente se usan para el ensayo de las uniones con adhesivos. Cuando se cargan bajo tensiones cortantes, desarrollan una curva de tensión no uniforme a lo largo del solape (Figura 29).

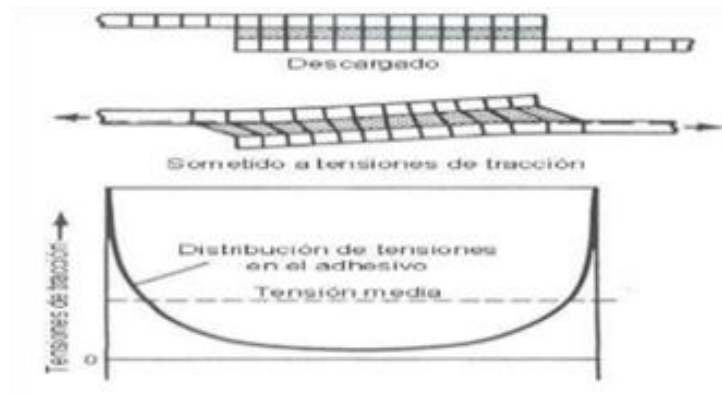


Figura 29 Unión a solape descargada y en tensión. Curva de tensiones cortantes en la unión a solape ^[9].

La máxima tensión, la cual puede ser varias veces la tensión de rotura media, tiene lugar al final del solape, a causa de dos factores, la tensión diferencial inducida entre el adhesivo y el adherente por la carga, y la flexión de la unión debido a una excentricidad de carga que resulta del espesor de la unión.

Las concentraciones de tensiones en el final de la solapa dan a estas uniones un comportamiento característico.

1. La tensión de rotura media disminuye con el aumento de la longitud de la solapa, pero es independiente del ancho de la misma.
2. La tensión de rotura media aumenta con la longitud del solape, pero alcanza un valor límite cuando la longitud se hace muy grande.
3. Las tensiones de las uniones de igual área construidas de materiales idénticos, no son necesariamente las mismas.
4. Las tensiones de las uniones solapadas simples son proporcionales al área de la unión sólo cuando la longitud de la solapa es constante, esto es, sólo si el área varía cuando hay cambio en el ancho de la solapa ^[9].

2.4.8.4 Modificaciones para mejorar la tensión de rotura de la unión.

A causa de que la tensión de rotura media de una unión a solape simple se determina por la máxima tensión en los extremos de la solapa, las modificaciones en la unión que producen una mejor distribución de tensiones conllevan el aumento de resistencia de la unión. Cuatro procedimientos prácticos son las siguientes ^[9]:

1. Reducir la flexión de la unión aumentando la resistencia de los adherentes.
2. Permitir que la unión flete más fácilmente por disminución de los espesores de los adherentes, igual que el primer método, provoca que el adhesivo sea menos tensionado en los extremos de la solapa.
3. Modificar la capa de adhesivo de forma que pueda resistir una mayor tensión.
4. Disminuir la longitud del solape.

2.4.8.5 Optimización de las uniones solapadas.

Para conseguir el mejor comportamiento de una unión solapada (Figura 30), frente a las cargas que actúan sobre ella, se pueden seguir los siguientes criterios:



Figura 30 Unión a solape simple. Diseño normal sin optimizar.

1) Evitar las fuerzas excéntricas (Figura 31): hay varias razones por las que una unión solapada simple puede no presentar una distribución uniforme de tensiones de cizallamiento.

Una razón es que las fuerzas excéntricas que actúan sobre la unión producen un momento de flexión, este momento de flexión induce tensiones de tracción adicionales, especialmente en los extremos de la unión. Hay varias posibilidades para minimizar la influencia negativa del momento de flexión provocado por las fuerzas excéntricas que actúan sobre la línea de unión. En las siguientes figuras se muestra de forma gráfica como solucionar mediante el diseño el problema de las fuerzas excéntricas:

- a) Mediante una placa de cubierta doble. (Solución muy buena).
- b) Mediante una unión en bisel, con ángulo de 30° . (Solución muy buena).
- c) Mediante una placa de cubierta simple. (Solución buena).
- d) Mediante una unión a solape doble. (Solución buena).



Figura 31 Diferentes diseños para minimizar el problema de las fuerzas excéntricas en las uniones solapadas. a) Cubierta doble, b) Unión en bisel, c) Con placa de cubierta simple, d) Unión a solape doble.

2) Optimizar el solape de la junta: esto no significa simplemente aumentar la longitud de la junta al máximo, porque la carga de rotura no aumenta proporcionalmente con la longitud de la junta o área de unión (Figura 32).

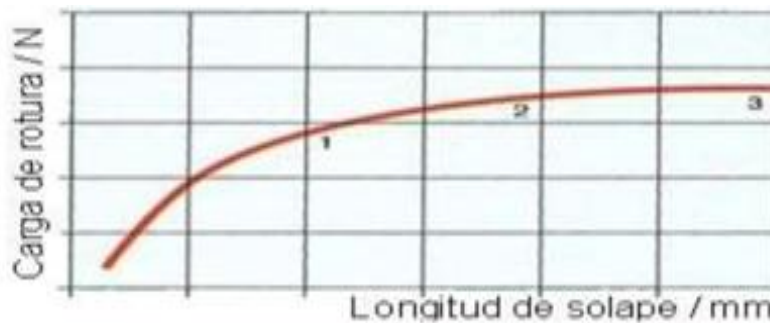


Figura 32 Carga máxima de rotura en función de la longitud de solape. Un aumento de la longitud de solape no produce un aumento proporcional en la carga máxima de rotura sino inferior

En la curva de distribución de tensiones de cizallamiento (Figura 33), se puede ver que los extremos de la unión están sometidos a más tensión que el centro de la misma, si se aumenta mucho la longitud de solape, puede que la carga de rotura apenas sufra cambio alguno. Esto conlleva a que la junta comienza a romperse por el extremo del solape sometido a la concentración de tensión, al superarse la fuerza adhesiva o cohesiva del adhesivo.

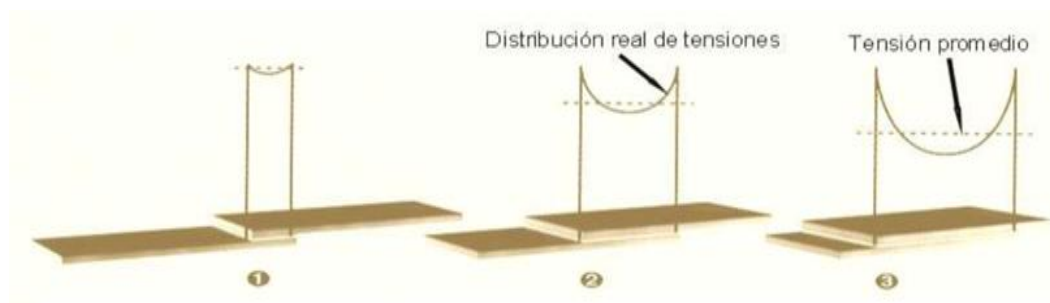


Figura 33 Distribución de tensiones en uniones con diferente longitud de solape. 1) Longitud de solape pequeña: tensión promedio alta, 2) longitud de solape mediana: tensión promedio con valor intermedio. 3) longitud de solape grande: tensión promedio baja ^[9].

En la Figura 33, se ve como el valor medio de la tensión de cizallamiento se reduce aumentando la longitud de solape, provocando esto un aumento no proporcional

de la carga de rotura; Por tanto si se necesita un área de unión más grande para soportar la carga, es mejor aumentar el ancho de la unión en lugar del solape.

3) Aumentar el espesor de la línea de unión: con una línea de unión de mayor espesor, la junta soporta mejor las tensiones de cizallamiento, el espesor adicional propaga la deformación de cizallamiento a través de un volumen mayor, lo que produce menos deformación unitaria en el adhesivo y menor concentración de tensiones.

2.4.9 Unión adhesiva de sustratos de plástico.

2.4.9.1 Ideas generales.

El término “plástico” comprende muchos materiales sintéticos. Hay muchas maneras de clasificar los plásticos. La más simple es una clasificación general en tres tipos básicos: Termoestables, termoplásticos y elastómeros

Esta sencilla clasificación es inadecuada para definir propiedades de montaje. Las diversas estructuras químicas de los distintos sustratos de plástico y las propiedades físicas resultantes son los factores decisivos en la ingeniería de los adhesivos. Igual que con todos los materiales que van a unirse por medios adhesivos, es preciso cumplir dos condiciones previas, que son las siguientes:

- 1) El adhesivo debe ser capaz de mojar el plástico, es decir, la energía superficial del plástico debe ser mayor o igual que la tensión superficial del adhesivo.
- 2) La superficie del plástico debe tener propiedades favorables a la adhesión, es decir, a la interacción química y física en la superficie de contacto entre el adhesivo y el sustrato.

Los plásticos que no cumplen una de estas condiciones suelen ser inadecuados para la unión adhesiva, el plástico no podrá unirse mediante adhesivos sin un tratamiento previo.

2.4.9.2 Agrietamiento por tensión de los termoplásticos.

Los sustratos termoplásticos amorfos sin carga tienden a agrietarse cuando entran en contacto con ciertos líquidos (disolventes), Esto suele llamarse “agrietamiento por tensión”, los plásticos más susceptibles son los policarbonatos (PC), los polimetilmetacrilatos (PMMA), los copolímeros de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el poliestireno (PS). Como su propio nombre indica, las grietas se forman por la interacción de dos factores, que son los siguientes:

1. Deben existir ciertas tensiones en el sustrato, están presentes en forma de tensiones residuales causadas por la transformación o se producen por efecto de fuerzas externas.
2. Sobre la pieza debe actuar un medio de peso molecular bajo.

2.4.9.3 Métodos para prevenir el agrietamiento.

El agrietamiento de los plásticos durante la unión adhesiva puede prevenirse en gran medida adoptando los siguientes métodos, o bien eligiendo otro material plástico.

- someter las piezas a un tratamiento térmico posterior, reduciendo así las tensiones internas.
- en el momento de unir las piezas, no se deben apretar ni deformar, ya que pueden inducirse tensiones.
- utilizar adhesivos de curado rápido, ya que minimizan la exposición al efecto disolvente del adhesivo líquido, minimizando así el agrietamiento por tensión.
- si se utilizan cianoacrilatos, no se debe aplicar demasiado adhesivo, de modo que no queden excesos sin curar, o debe utilizarse un activador para curar tales excesos.
- si se utilizan adhesivos que curan por luz ultravioleta, debe asegurarse de realizar el curado inmediatamente después de aplicar el adhesivo.
- los adhesivos anaeróbicos no son adecuados para materiales termoplásticos amorfos sin carga.

2.4.10 Durabilidad de las uniones adhesivas.

Una de las consideraciones más importantes es el ambiente al que se someterá la unión adhesiva, la fuerza que actúa sobre la unión adhesiva debe ser capaz de soportar la carga máxima esperada y de resistir la fatiga o las tensiones cíclicas, en especial las lentas, son mucho más perjudiciales para una unión adhesiva que una tensión continua.

El adhesivo elegido para una aplicación determinada debe ser capaz de resistir estas cargas y tensiones, no sólo al comienzo, sino también después de una exposición sostenida a los factores ambientales más severos que incidirán durante la vida de la unión adhesiva, el calor y la humedad suelen ser los factores ambientales más perjudiciales para la mayoría de las uniones adhesivas.

Las tensiones debidas a una dilatación térmica diferencial entre materiales distintos con muy diferentes coeficientes de dilatación, p.ej. en una unión adhesiva de plástico y metal, requieren adhesivos de módulo bajo (no frágiles) para que su comportamiento sea óptimo.

Otros factores que afectan a la durabilidad de la unión son los disolventes y la luz ultravioleta. Se debe elegir siempre un adhesivo que sea resistente a estos factores; no es válido revestir la unión adhesiva con alguna capa “protectora” que pueda agrietarse o volverse permeable a los disolventes o a la humedad.

Los factores que pueden afectar la unión adhesiva se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1. Temperatura
2. Humedad
3. Fluidos: Aceites, combustibles, disolventes orgánicos y clorados, agentes químicos agresivos, gases refrigerantes, etc.

Los efectos de la temperatura sobre la unión adhesiva son muy diversos, y dependen del modo en que la junta se somete a temperaturas extremas. Así, se puede diferenciar entre:

1. Efecto de baja temperatura
2. Resistencia al calor
3. Envejecimiento por temperatura

El comportamiento de las adhesiones a bajas temperaturas viene condicionado por las características mecánicas del adhesivo a tales temperaturas, tanto los termoplásticos como los termoestables se vuelven rígidos y frágiles a bajas temperaturas debido a que aumenta la rigidez de las cadenas que los constituyen, de forma que un esfuerzo débil puede provocar la rotura de la unión adhesiva.

Se entiende por resistencia al calor la resistencia que presenta el adhesivo frente a altas temperaturas puntuales, el efecto de tales temperaturas es la disminución de la viscosidad del material polimérico durante un cierto tiempo, a altas temperaturas presentan un porcentaje muy bajo de su poder adhesivo inicial, los materiales termoestables, por el contrario, presentan sólo ligeras modificaciones de su reología por encima de la temperatura de transición vítrea.

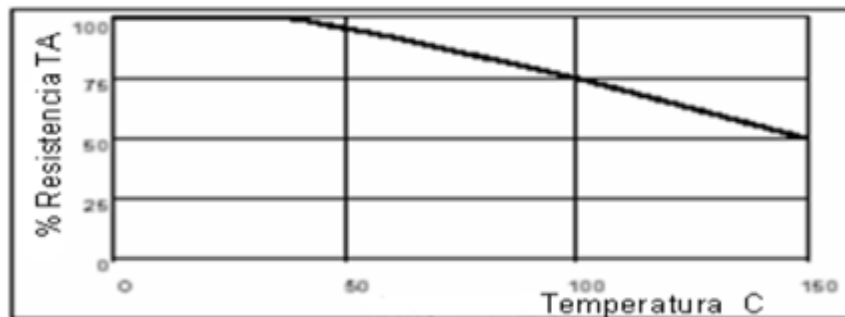


Figura 34 Resistencia al calor de un adhesivo anaeróbico

El envejecimiento a temperatura (Figura 34) es el efecto que se produce por la exposición de la junta adhesiva a una elevada temperatura de forma constante, el comportamiento de los adhesivos sometidos a alta temperatura durante períodos largos de tiempo

(Figura 35), es muy diferente al debido a su exposición a altas temperaturas puntuales, en general, los compuestos orgánicos sometidos a temperaturas altas por debajo de la temperatura de degradación sufren fenómenos de oxidación progresiva. Los esfuerzos mecánicos, la luz

ultravioleta y la presencia de agentes oxidantes aceleran estos procesos que pueden terminar por degradar completamente la junta adhesiva, incluso por debajo de la temperatura de descomposición del material.

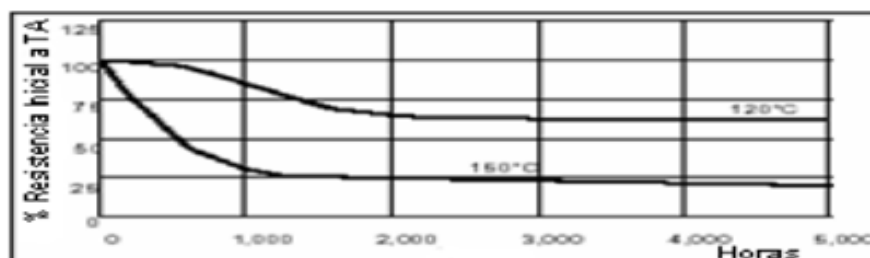


Figura 35 Envejecimiento por temperatura de un adhesivo anaeróbico

El efecto que tiene un agente externo sobre la junta adhesiva no siempre es consecuencia de su interacción con la masa de adhesivo, la resistencia de una unión adhesiva sometida a condiciones de humedad no depende del efecto que ésta tenga sobre el propio material polimérico, sino sobre la zona de adhesión.

El agua tiende a desplazar la resina curada allí donde existen enlaces secundarios produciendo tensiones sobre los menos numerosos enlaces químicos de la interface y dando lugar a fenómenos de adsorción.

Hay dos procesos involucrados en el deterioramiento de las juntas adhesivas por efecto de la humedad:

1. La absorción de agua por el adhesivo.
2. La adsorción de agua en la interface por desplazamiento del adhesivo.

En el caso de uniones metal-metal, la única posibilidad de acceso de la humedad es a través del adhesivo. Sin embargo, los metales son materiales de alta energía superficial y tienden a combinarse con el agua, desplazando la junta adhesiva. En los materiales compuestos la humedad puede ser absorbida por la resina superficial y ser difundida hacia la interface. La absorción de la humedad por parte del adhesivo no causa el deterioro de la junta adhesiva por pérdida de la resistencia del material polímero, sino porque es capaz de aportar a la interface una mayor concentración de agua.

Existen multitud de fluidos (gases y líquidos) que tienen también un efecto negativo sobre la junta adhesiva, la mayoría de ellos basan su influencia en la modificación de las propiedades del propio material adhesivo, como en el caso de otros agentes externos, el efecto de los fluidos sobre la durabilidad de una adhesión se mide en

relación con la resistencia máxima del adhesivo. Los ensayos se realizan también a lo largo del tiempo.

De un modo general se puede hablar de dos tipos de defectos:

1. Efectos físicos: debidos a modificaciones de las propiedades físicas del adhesivo, sin que se produzca ninguna variación en su composición química.
2. Efectos químicos: por ataque o degradación paulatina del material adhesivo.

2.4.11 Selección de adhesivos.

2.4.11.1 Primera aproximación a la elección del adhesivo.

La selección del adhesivo más adecuado puede requerir la experiencia de especialistas los cuadros de selección que a continuación se muestran (Tabla 2.1), están concebidos para que el diseñador tenga la posibilidad de escoger sistemáticamente opciones de adhesivos que puedan ser aceptables. Tienen por objeto servir de guía y no sustituyen los ensayos para verificar el comportamiento a largo plazo empleando procesos de producción simulados.

Breve descripción de las familias de adhesivos:

1. Cianoacrilatos: para uniones pequeñas, adhesión a multitud de sustratos.
2. Adhesivos estructurales: sistemas mono y bicomponentes, para uniones de piezas rígidas de alta resistencia.
3. Adhesivos de curado UV: para unir sustratos transparentes y/o transparentes a la luz UV.
4. Adhesivos flexibles: a base de poliuretano o silicona para soportar movimientos debidos a la dilatación térmica diferencial o a la vibración.

Tabla 2.1 Selección de adhesivos en función de los sustratos a unir

	Metal Cerámica	Vidrio	Plásticos	Caucho	Madera
Metal, Cerámica	1, 2, 4	3, 4	1, 2, 3, 4	1, 4	1, 2, 3, 4
Vidrio	3, 4	3, 4	3, 4	4	3, 4
Plásticos	1, 2, 3, 4	3, 4	1,3, 4	1, 4	1, 3, 4
Caucho	1, 4	4	1, 4	1, 4	1, 4
Madera	1, 2, 3, 4	3, 4	1, 3, 4	1, 4	1, 4

Los números indican las familias de adhesivos que sirven para los sustratos seleccionados.

2.4.11.2 Factores a tener en cuenta para elegir el adhesivo.

2.4.11.2.1 Uso.

Dependiendo de que la pieza que se ensambla sea un artículo de producción o un prototipo, o sea todavía una fase del desarrollo, puede influir considerablemente la selección del adhesivo, el costo del adhesivo puede en ocasiones ser motivo de rechazo en una situación de producción particular, por causa que la aplicación de calor y/o presión no es normalmente conveniente o incluso no disponible en campo, los adhesivos que se necesitan aplicar en campo, normalmente deben realizarse sin estos medios ^[9].

2.4.11.2.2 Aplicación.

Aunque la función más importante de los adhesivos es mecánica, es decir para unir fuertemente, algunas veces su función es para sellar y aislar.

También existen productos con formulaciones que son buenos conductores eléctricos y/o térmicos, además, los adhesivos previenen la corrosión electroquímica en las uniones entre metales distintos y resisten las vibraciones y la fatiga, a diferencia de los mecanismos de unión, los adhesivos no cambian normalmente el contorno de las piezas que unen ^[9].

2.4.11.2.3 Materiales a unir.

Los materiales a unir influyen en la elección del adhesivo con respecto a sus propiedades mecánicas y físicas, así como también se requiere la preparación previa de las superficies a unir.

2.4.11.2.4 Tipo de unión.

Existen una gran cantidad de adhesivos de diferentes naturalezas y origen. Eso hace que la clasificación de los mismos se haya realizado de muy diversas maneras ^[50].

Las uniones que proporcionan una mejor distribución uniforme de tensiones entre los adherentes son generalmente más fuertes y más seguras que aquellas que producen concentración de tensiones, las uniones son mejores cuando trabajan a cortadura y compresión que en tracción y pelado, los adhesivos duros responden mejor en materiales frágiles bajo altas concentraciones de tensiones. El tipo de unión es tan importante que en muchas ocasiones para cada adhesivo se diseña un tipo de unión específica ^[9].

2.4.11.2.5 Limitaciones del proceso.

Los requerimientos de golpes y sujeción de las piezas durante el acoplamiento de los adhesivos pueden indicar la elección del adhesivo, así como también la tolerancia de ajuste de las piezas. Por ejemplo, piezas con ajuste holgado pueden requerir un adhesivo de relleno de la holgura, considerando piezas de ajuste apretado puede requerirse un material de baja viscosidad, las limitaciones se pueden situar en la temperatura y/o presión que se puede usar por causa de elementos sensibles a la temperatura y/o a la presión durante el ensamblaje de la unión ^[9].

2.4.11.2.6 Requerimientos mecánicos.

El usuario debe determinar no solamente la naturaleza y la magnitud de las cargas a que estará sometida la unión, sino que también si el adhesivo trabajará temporalmente o permanentemente. Un adhesivo puede ser necesario sólo para sujetar piezas unidas durante el tiempo necesario antes de ser unidos por otros métodos de sujeción mecánicos en otras estructuras.

Los datos de cargas máximas que puede soportar el adhesivo se pueden obtener mediante el ensayo de probetas que se relacionen de alguna forma con el tipo de unión que se va a usar ^[9].

2.4.11.2.7 Condiciones de servicio.

La temperatura de servicio máxima y mínima influye en la sección del adhesivo porque éstos son materiales sensibles a la temperatura, sin embargo algunos adhesivos disponibles pueden resistir 370°C. Aunque la mayoría de los tipos de adhesivos sólo pueden soportar entre 65°C y 95°C, además las temperaturas de servicio muy bajas, dan lugar al agrietamiento de muchos adhesivos y originan tensiones internas en la mayoría de las uniones.

A la mayoría, y casi a todos los adhesivos orgánicos les afecta negativamente la humedad, especialmente cuando están en condiciones de tensión. Sin embargo, el comportamiento bajo condiciones de humedad varía considerablemente de unos adhesivos a otros ^[9].

2.4.12 Preparación de la superficie.

Para realizar una buena unión con adhesivos, en general se requiere realizar una preparación adecuada de las superficies de los sustratos a unir. Existen varios procesos de pretratamiento, que van desde la simple limpieza mecánica y el desengrase químico, hasta una preparación superficial compleja.

La preparación de la superficie es el paso más crítico en el proceso de la unión adhesiva. Si no se realiza una preparación satisfactoria de la superficie, la unión fallará por adhesión en la interface sustrato-adhesivo. Con una correcta preparación de la superficie pueden lograrse uniones en las que cualquier fallo sea de naturaleza cohesiva, alcanzándose, por tanto, la resistencia prevista del adhesivo. Éste es un factor clave, no sólo para la resistencia inicial de una

unión adhesiva sino, lo que es aún más importante, para su resistencia a las condiciones ambientales y para su resistencia a largo plazo.

Los métodos de preparación de superficies deben como mínimo, eliminar el aceite, la grasa o cualquier revestimiento cuya fuerza de unión al sustrato pueda ser menor que la de la unión adhesiva. Para muchos materiales metálicos y plásticos se utiliza simplemente la abrasión y/o el frotamiento con disolventes. Un esquema general para realizar tratamientos superficiales podría ser el mostrado en la Figura 36 ^[9].

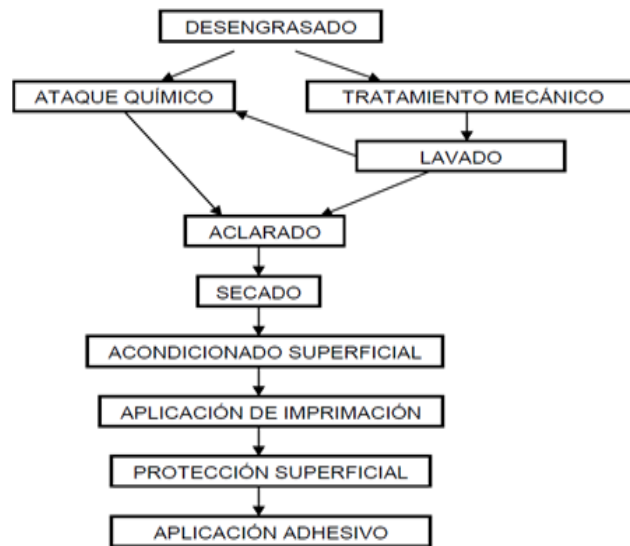


Figura 36 Esquema general para la realización de tratamientos superficiales

2.4.12.2 Tratamientos superficiales más comunes.

Algunos de los tratamientos superficiales más comunes son los siguientes:

1. Sin tratamiento (bajo costo, reproducibilidad pobre).
2. Enjuagado con disolvente.
3. Limpieza con vapor.
4. Abrasión mecánica.
5. Tratamiento con plasma.
6. Granallado o chorreado.
7. Conversión química del revestimiento.
8. Anodizado con ácido fosfórico (alto coste, buena reproducibilidad).

Los tratamientos superficiales no son ni buenos ni malos, pero es importante seleccionar aquel que sea el más apropiado y el de menor costo.

El método menos caro y el que menos control necesita consiste en aceptar la superficie actual y hacer lo posible para no cambiarla. Esto es adecuado en muchas construcciones.

El enjuagado con disolventes puede eliminar muchos contaminantes orgánicos, pero requiere ventilación y cambio del disolvente según sea necesario para evitar la redeposición de los contaminantes, la limpieza con vapor evita el problema de la redeposición pero está limitado a piezas pequeñas^[9].

La abrasión mecánica o granallado, tal como el lijado o el chorreado, es efectivo cuando el sustrato es suficientemente robusto, la abrasión normalmente deja residuos embebidos en la superficie, y la superficie reciente de muchos materiales puede ser bastante reactiva, cambiando rápidamente con la exposición al aire o al limpiarla con disolventes.

El granallado es una buena manera de limpiar grandes superficies, la rugosidad superficial que se obtiene con este método da unos resultados de unión muy buenos, siempre que la granalla utilizada no sea demasiado gruesa.

Lijando se obtiene una rugosidad superficial igualmente buena. En este caso, es importante usar un tamaño de grano apropiado (p.ej. 300 a 600 para aluminio, 100 para acero). Después del granallado, al igual que después del lijado o del cepillado, las piezas deberán desengrasarse a fin de eliminar todo rastro de suciedad residual.

La descarga eléctrica y de plasma o tratamientos similares se usan a menudo para mejorar la polaridad y las propiedades mecánicas de la región superficial y el endurecimiento de la superficies de baja energía, tal como el polietileno y el polipropileno.

La conversión química o ataque con ácido saca al exterior las capas de átomos y las cambia por una capa más controlada, pero igual que con la limpieza mediante disolvente, existe el peligro de redeposición o de una conversión pobre si los reactivos no están limpios y en la concentración adecuada.

Normalmente, una imprimación es una especie química reactiva dispersa en un disolvente. Esta solución se pulveriza o se aplica con brocha sobre la superficie del sustrato, después de evaporarse el disolvente portador, la especie activa permanece, en función del tipo de imprimación, la superficie puede quedar inmediatamente lista para la unión, como es el caso de las imprimaciones de poliolefinas para cianoacrilatos^[9].

2.4.12.3 Ensayo de mojabilidad.

Los preparados superficiales pueden evaluarse con el “ensayo de rotura de gotas de agua”. Se aplican varias gotas de agua pura a las superficies limpiadoras. En una superficie que no esté bien limpia, la gota conservará en gran medida su forma esférica y será preciso volver a limpiar la superficie. Si el agua corre sobre la superficie tratada, el mojado es satisfactorio y la cara de unión está suficientemente limpia^[9].

2.4.13 Aplicaciones de los adhesivos.

2.4.13.1 Sujeciones mecánicas.

La mejor función de los adhesivos es para las fijaciones mecánicas, a causa de que un adhesivo puede transmitir cargas desde un miembro de la junta a otro, se permite una mejor distribución de tensiones que la obtenida usando sujeciones mecánicas, los adhesivos permiten a menudo fabricar estructuras que son mecánicamente equivalentes o superiores a las de montaje convencional y, además, tienen costo y peso beneficiosos.

Los mecanismos de sujeción convencionales o los reconocidos de soldadura, producen estructuras cuya resistencia está limitada a la de las áreas de la sección delgada que está en contacto con el mecanismo de unión o la soldadura, los adhesivos pueden producir juntas con alta resistencia, rigidez, y precisión dimensional en los metales ligeros, tales como el aluminio y el magnesio, los cuales pueden ser debilitados o distorsionados con la soldadura^[9].

2.4.13.2 Sellado y aislamiento.

A causa de que los adhesivos en una junta preparada adecuadamente proporcionan un contacto total en las superficies acopladas^[53], se forma una barrera a los fluidos que no se ataca ni se ablanda, un adhesivo puede también funcionar como un aislante eléctrico y/o térmico en una junta. Su eficiencia al aislamiento térmico se puede aumentar si es necesario, mediante la pulverización de un adhesivo con la estructura celular adecuada.

Por otro lado, la conductividad eléctrica y térmica se puede aumentar apreciablemente mediante la adición de rellenos metálicos, óxidos de relleno, tales como la alúmina, solo incrementan la conductividad térmica^[9].

2.4.13.3 Resistencia a la Corrosión y a la Vibración.

Los adhesivos también pueden prevenir la corrosión electroquímica en juntas entre metales distintos, también pueden actuar como amortiguadores de vibraciones. Las características mecánicas de amortiguamiento de un adhesivo se pueden cambiar con la formulación química, al cambiar una propiedad en un adhesivo, generalmente produce cambios en otras propiedades de la unión, tales como la resistencia a tracción o cortadura, el alargamiento, o la resistencia al pelado o doblado^[9].

2.4.13.4 Resistencia a fatiga.

Una propiedad algo relacionada con la capacidad de amortiguar las vibraciones es la resistencia a la fatiga. Un adhesivo seleccionado apropiadamente puede generalmente resistir repetidas tensiones inducidas por ciclos de carga sin propagación de fallos que produzcan la rotura^[9].

2.4.13.5 Suavización de contornos.

Los adhesivos normalmente no cambian el contorno de las partes que unen, a diferencia de los tornillos, remaches, o cerramientos, los adhesivos dan una pequeña o no visible evidencia externa de su presencia, se usan para unir las láminas de los aviones, y permiten la fabricación de alas delgadas, fuselajes, estabilizadores, y mayor control de superficies que las estructuras similares unidas convencionalmente y que consecuentemente tienen mejor eficiencia aerodinámica.

Estas estructuras también tienen mayor capacidad de soportar carga y mayor resistencia a fatiga que las estructuras unidas convencionalmente ^[9].

2.4.13.6 Aviación y naves espaciales.

En la industria de la aviación/aeroespacial, los adhesivos han jugado un papel significativo, desde los primeros globos de aire caliente a los aviones nacionales hasta las aplicaciones a las naves espaciales (NASA) tales como transbordadores espaciales.

Las uniones con adhesivos estructurales se han desarrollado primeramente para aplicaciones en defensa. En 1975, el gobierno de U. S. patrocinó un programa conocido como Tecnología de Unión de Estructuras Primarias con Adhesivos (PABST) para extender el uso de las uniones mediante adhesivos para la industria aeroespacial y para optimizar la fabricación. Durante la década de los 80, las uniones estructurales con adhesivos, se han usado en los F-16, F-18, y AV-8B para los militares, en varios helicópteros y aviones de transporte comercial, y en aviones para muchos negocios, así como también en líneas regulares ^[9].

2.4.14 Limitaciones de los adhesivos.

Las estructuras unidas con adhesivos se deben diseñar cuidadosamente y se deben usar bajo condiciones que no excedan las limitaciones operativas del adhesivo, estas limitaciones incluyen ciertos tipos y magnitudes de tensiones; si las tensiones son estáticas o dinámicas y factores ambientales tales como la temperatura, humedad, y exposición a otros vapores o líquidos.

A las uniones realizadas con adhesivos orgánicos les afecta negativamente la aplicación simultánea de humedad y tensión mecánica, especialmente aquellos que contienen componentes sensibles a la humedad, dan bajas prestaciones en estas condiciones. Las uniones realizadas con tales materiales puede que no sean capaces de soportar cargas constantes que superen más del 10% de la tensión última de fallo durante cortos periodos de tiempo, las uniones hechas con otros adhesivos pueden soportar el 50% de la tensión de fallo durante largos periodos de tiempo ^[9].

2.4.15 Ventajas y desventajas de los adhesivos.

2.4.15.1 Ventajas con respecto a otros medios de unión.

- Proporciona mejor distribución uniforme de tensiones y mayor área de tensión cortante que los mecanismos de unión convencional, la distribución de tensiones en las juntas puede conducir a una elevada concentración de las mismas en función del método de unión utilizado, así como las dimensiones de los substratos. La concentración de tensiones alcanza su grado máximo en el caso de fijaciones mecánicas, como por ejemplo en remaches o tornillos, en las uniones soldadas o pegadas con adhesivos rígidos, la concentración de tensiones es ligeramente menor que en el caso anterior, y se elimina por completo cuando se utilizan adhesivos elásticos.
- Dan mayor rigidez a las estructuras (Figura 37), de modo que trabajan mejor a pandeo.

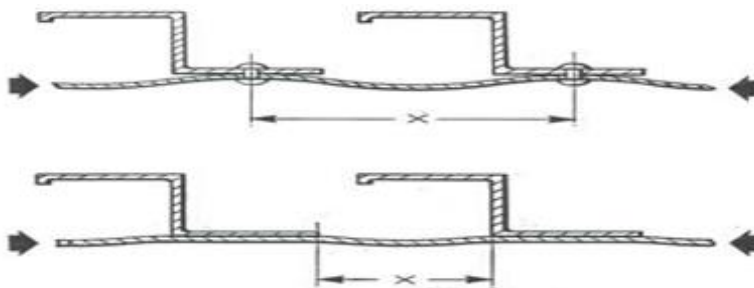


Figura 37 Ventajas de la unión con adhesivos frente a la unión con remaches. La unión con adhesivo proporciona mayor rigidez a la estructura.

- Unen materiales gruesos y delgados de la misma manera.
- Unen lo mismo materiales similares que distintos.
- Minimizan o previenen la corrosión electroquímica entre metales diferentes.
- Resisten la fatiga y las cargas cíclicas.
- Proporciona contornos suaves.
- Sella las uniones, aísla y amortigua las vibraciones.
- Frecuentemente el montaje es más rápido y menos caro que los mecanismos de unión convencionales.
- El calor que se requiere para curar el adhesivo es normalmente demasiado pequeño para afectar al estado tensional de las piezas de metal.
- La limpieza de las partes después de unir no es difícil.

2.4.15.2 Desventajas con respecto a otros medios de unión.

- Unión permanente: Hay que romper la unión para separar las piezas unidas. Las uniones no permanentes son la mayoría de uniones mecánicas (excepto remaches). Las soldaduras y adhesivos son permanentes.
- Requiere preparación superficial: Hay que preparar superficialmente las piezas a unir, lo que añade una etapa al proceso de unión.
- Adhesivos son perecederos: Tienen una vida útil.
- Durabilidad de la unión limitada: Los adhesivos pueden absorber humedad, se desgastan, etc.^[55].

2.4.16.- Procedimientos de unión con adhesivos.

2.4.16.1 Métodos de aplicación.

Los métodos comunes de aplicación de adhesivos líquidos son con cepillo, espátula, paleta, por sumergimiento, pulverización, enrollado, cortina, chorro continuo, chorro puntual. Los últimos cinco métodos son particularmente útiles para la aplicación uniforme de adhesivos sobre piezas grandes, y piezas planas, en situaciones de velocidades de producción elevadas.

Por revestimiento sumergido y pulverización se pueden usar en piezas planas, pero son especialmente apropiados para piezas contorneadas, un método muy usado para aplicación de líquidos y adhesivos de delgado espesor es el cepillado, el equipamiento es simple, el desperdicio es mínimo, y las áreas limitadas por las formas contorneadas se pueden revestir sin enmascarar, usando este método, es difícil lograr espesores de adhesivo uniformes así como altas velocidades de producción.

Si se van a aplicar varias capas de un adhesivo con base disolvente, se obtienen los espesores más uniformes por aplicación en cada capa perpendicular a la anterior, para evitar el hundimiento, el abultamiento, o el levantamiento de las capas, se deben realizar secados apropiados entre la aplicación de capas.

Las películas de adhesivos son relativamente fáciles de aplicar. Se cortan al tamaño adecuado, se sitúan en la zona de la unión, y se golpean en el lugar de las áreas seleccionadas y se ablandan con un disparo de calor o soldando planchas antes del montaje, otro método de montaje es unión por contacto, tales uniones se forman instantáneamente y se terminan con una aplicación breve de presión para asegurar un buen contacto entre las capas de adhesivo.

Las uniones realizadas con un adhesivo líquido de termo secado o con un adhesivo pastoso se hacen con una técnica de montaje húmedo, normalmente las piezas se deben retener en posición para mezclar o sujetar hasta que el adhesivo líquido ha curado. La misma técnica se usa para los adhesivos termoplásticos de polimerización.

Los adhesivos dispersados en disolventes se colocarán encima de la humedad sólo si es posible que se libere el disolvente ^[9].

2.4.16.2 Fijaciones inmediatamente después de la unión.

El adhesivo en particular y la configuración del montaje determinan si es necesaria la fijación y su grado de complejidad, pero un equipo de una cabina compleja o un avión, para ser construido con tolerancias dimensionales muy estrechas, con un adhesivo de curado a temperatura elevada, puede requerir muchas fijaciones relativamente complejas, un diseño cuidadoso del producto puede reducir de forma importante la complejidad de las fijaciones y simplificar el método para conseguir las tolerancias dimensionales requeridas.

Durante el curado, la mayoría de los adhesivos necesitan que se mantenga una presión mínima. Para lo cual se pueden usar sujeciones de amarre, o pesos implemente sobrepuestos, o a base de presión con gases ^[9].

2.4.16.3 Curado.

Los parámetros más importantes en relación con el curado de un adhesivo son el tiempo y la temperatura, el tipo de los aparatos de calentamiento también determina el tiempo de procesamiento. Si las piezas de un montaje son del mismo material y espesores, todas las uniones se calentarán a velocidades equivalentes, sin embargo si se unen piezas delgadas y gruesas, o si las piezas difieren en gran medida en su capacidad calorífica o en su conductividad, no todas las uniones realizadas alcanzarán la temperatura de curado simultáneamente. El tiempo de procesamiento para cada montaje se debe ajustar de forma que la masa de adhesivo dentro de la unión de calentamiento más lento logre un curado apropiado.

Otro factor a tener en cuenta son las diferencias entre el coeficiente de expansión térmica de los distintos componentes de la unión, debido a las tensiones que esto puede crear durante la aplicación de calor. Estos problemas se solucionan aumentando las temperaturas de curado para asegurar que todas las piezas alcancen el equilibrio térmico y por lo mismo las piezas se enfrían lentamente en condiciones ambientales ^[9].

Capítulo 3 INTRODUCCIÓN A LOS ADHESIVOS

3.1 Introducción

Los adhesivos se conocen desde tiempos inmemoriales y han sido empleados extensamente a lo largo de la historia hasta la actualidad. Existen ejemplos naturales de adhesión, como es el caso de las telas de araña, de los panales de abejas o de los nidos de pájaros. Se han hallado vestigios del uso de la sangre animal como adhesivo durante la Prehistoria. Los babilonios empleaban cementos bituminosos hacia el 4000 A.C, mientras

que los egipcios preparaban adhesivos mediante la cocción de huesos de animales para la adhesión de láminas de madera hacia el 1800 A.C. ^[10].

El sector de los adhesivos está en pleno crecimiento y su desarrollo será muy importante en los próximos años, dado que ofrece rendimientos similares y en ocasiones superiores a los de otras soluciones para el ensamblaje y el sellado con ventajas en cuanto a ahorro de costes.

Como sistema de unión y/o sellado de materiales, los adhesivos ocupan un lugar que en ocasiones comparten con otros sistemas de unión. No obstante, los adhesivos requieren conocimientos básicos para un adecuado uso y sólo a través de un diseño adecuado de la unión se logran resultados satisfactorios Figura 38 ^[10].



Figura 38 Posicionamiento de los adhesivos ^[10]

Se puede definir adhesivo como aquella sustancia que aplicada entre las superficies de dos materiales permite una unión resistente a la separación. Denominamos sustratos o adherentes a los materiales que pretendemos unir por mediación del adhesivo. El conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interface adhesivo/adherente recibe el nombre de adhesión Figura 39 ^[10].

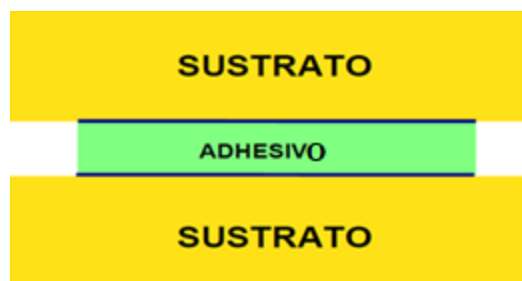


Figura 39 Esquema básico de una unión adhesiva ^[10] [53]

3.2 Ventajas e inconvenientes de las uniones adhesivas

Las uniones por adhesivo están utilizándose cada vez con mayor profusión dado que la calidad de los adhesivos y el conocimiento técnico que se posee sobre su comportamiento van en

aumento en los últimos años. Vemos una tabla de ventajas y desventajas de este tipo de unión Tabla 3.1 ^[11]:

Tabla 3.1 Ventaja y desventaja de uniones por adhesivo

Ventajas	Desventajas
• La concentración de tensiones puede minimizarse • La eficiencia de la unión es alta, obteniéndose ahorro de peso respecto a la unión mecánica	• No es posible desmontar la unión sin dañar los componentes • La unión puede debilitarse de forma severa por efectos ambientales • Requiere preparación de la superficies • La integridad de la unión es difícilmente observable por inspección

Es interesante remarcar que la preparación de las superficies. Aspecto muy conflictivo en uniones por adhesivos, cada vez es menos importante, ya que se están desarrollando nuevos materiales que no requieren alta calidad de la superficie para adherir Figura 40. Por otra parte, la resistencia para altas temperaturas es otro de los parámetros que está en continuo desarrollo Figura 41 ^[11].

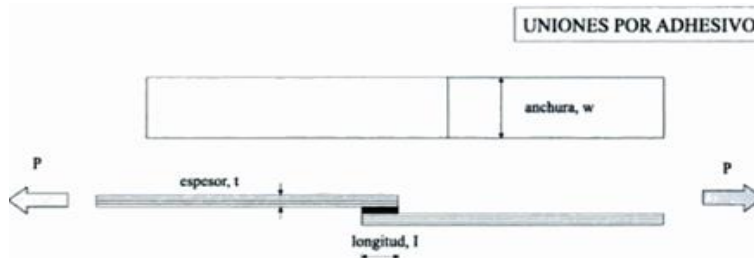


Figura 40 Se expresa la definición de variables en una unión por solape simple.

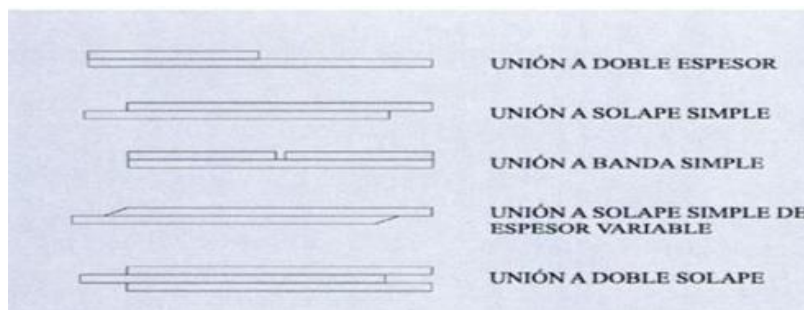


Figura 41 Tipos de unión para cargas medias – bajas

En la Figura 42, se aprecian las uniones tipificadas para cargas medias-altas. Es difícil ver este tipo de uniones en materiales compuestos de fibra de vidrio ya que la mayoría se utilizan para aplicaciones aeronáuticas con materiales como fibra de carbono y aleaciones metálicas.

Alguna vez, se pueden ver uniones doble banda en materiales compuestos de fibra de vidrio, si bien la unión a doble solape es más usual ^[11].

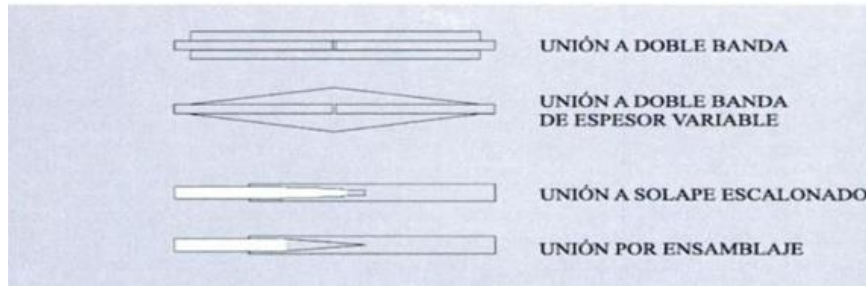


Figura 42 Tipos de unión para cargas medias – altas

En la Figura 43, se observa una gráfica donde se pueden ver clasificadas las uniones descritas anteriormente en función de la resistencia y espesor de la unión ^[11].

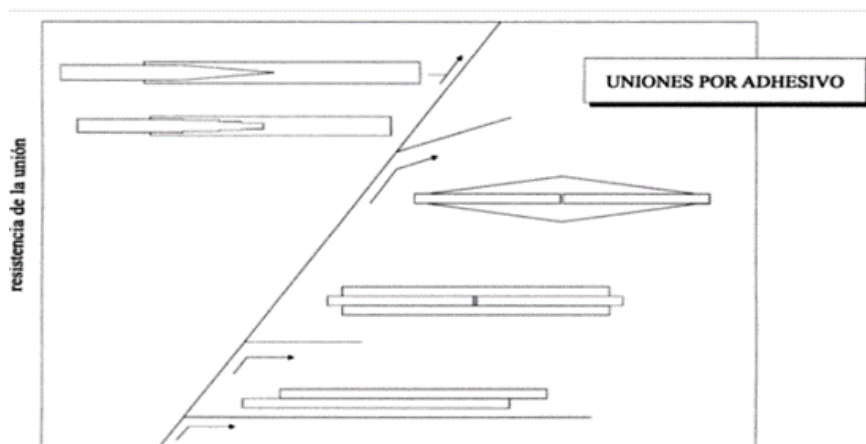


Figura 43 Diagrama resistencia / espesor

3.3 Adhesión

Adhesivo es un material que se aplica a las superficies de los artículos para unirse permanentemente por un proceso de adhesión. Un adhesivo es una sustancia capaz de formar enlaces a cada una de las dos partes cuando el objeto final consta de dos secciones que son

encontrados. La siguiente definición ha sido propuesta por Wu.^[13] "Adherencia se refiere al enlazadas juntos.^[12] unas características de los adhesivos es las cantidades relativamente pequeñas que se requieren en comparación con el peso de los objetos finales o piezas finales.

La adhesión es por tanto, la suma de las fuerzas físicas y mecánicas de atracción y adsorción. La máxima adhesión se consigue cuando adhesivo está en contacto íntimo con las zonas a unir. Este es el motivo por el que el adhesivo debe penetrar totalmente en la rugosidad superficial y mojar toda la superficie^[50].

Adhesión estructural es adhesivo para aplicaciones en que el fluido (los objetos que están en condiciones de servidumbre) puede experimentar tensiones grandes hasta su punto de producción. Los adhesivos estructurales deben ser capaz de transmitir el esfuerzo sin pérdida de la integridad dentro de los límites de diseño.^[14] también deben ser durables a lo largo de la vida útil de una parte, que puede ser años. Un vínculo estructural ha sido definido como teniendo una fuerza de esquileo más de 7 MPa además significativa resistencia al envejecimiento.

Adhesivos no estructurales no tienen que soportar cargas sustanciales pero simplemente Mantenga materiales ligeros en su lugar. Este tipo de adhesivo es a veces llamado un "adhesivo de explotación". Cintas sensibles a presión y pegamentos para embalajes, son clasificados como adhesivos estructurales a pesar de que tienen escasa resistencia a la humedad y calor.

3.3.1 Modos de fallo

Un vínculo de adhesión hipotética se muestra en la figura 44. Asumir que el vínculo es probado en el modo de tracción en el que el dos fluido se tira en una dirección perpendicular a la Unión. Hay diversas posibilidades para la ocurrencia de la falta. Las superficies de falla de enlace son llama el lugar geométrico de la falta.

Si la falta de enlace se produce entre la capa de adhesivo y el fluido, se llama fallo adhesivo (Figura 44a). Un fallo en que se produce la separación de tal manera que ambas superficies adherente siendo cubierto con el pegamento se llama fracaso cohesionado en la capa de adhesivo

(Figura 44b). A veces la adherencia es tan fuerte que el fallo ocurre en uno del fluido de la fianza. Esto se llama un fracaso cohesionado en el adherente (Figura 44c). Fallas de adhesión a menudo implican más que un fallo y se atribuyen como un porcentaje a cohesivo o fallo adhesivo. Este porcentaje se calcula en base a la fracción de la zona de la superficie de contacto que no coherente o adhesivo.

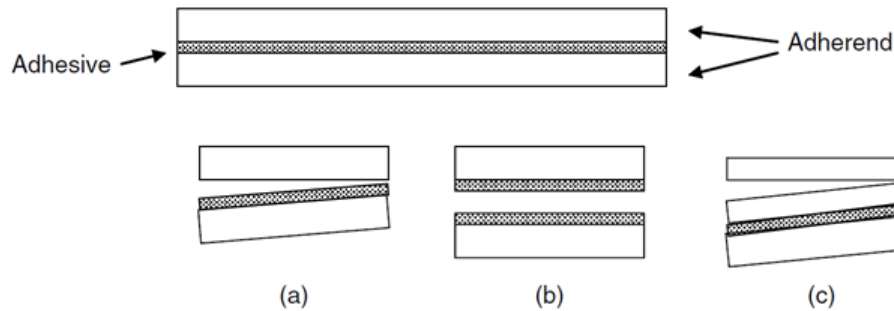


Figura 44 Esquema de adhesivo bond modos de falla: a) Fallo de adhesivo, b) Fracaso de cohesión en la capa de adhesivo, c) Falta de cohesión en el adherente ^[44].

Es importante determinar el modo exacto de falla del enlace cuando ocurre un problema. Determinación del modo de falla permite actuar a corregir la verdadera causa y ahorrar tiempo y dinero.

3.3.2 Formación de la unión adhesiva

Las uniones para el pegado deben diseñarse especialmente para el uso de adhesivos. El hábito de comenzar con un diseño utilizado para otro método de la fijación y modificándolo levemente para la unión adhesiva es pobre, a menudo conduce a resultados desastrosos. El objetivo del diseño conjunto es obtener máxima para un área dada de un enlace ^[16].

Para las uniones adhesivas, las características básicas de los adhesivos deben al diseño de las uniones. Los enlaces adhesivos actúan sobre áreas y no a un punto. Por esta razón, la unión debe diseñarse con el objetivo de minimizando la concentración de esfuerzos.

La selección del diseño de las uniones están influenciadas por las limitaciones en la producción instalaciones, costos de producción y la apariencia final deseada de la pieza. La resistencia de una unión adhesiva se determina principalmente por las propiedades mecánicas del adhesivo y del adherente, el residuo de las tensiones internas, el grado de contacto interfacial verdadero, y la geometría de la unión. Cada uno de estos factores tiene una fuerte influencia en el desempeño conjunto.

El ingeniero de diseño debe preocuparse por la eliminación de las concentraciones de esfuerzos, que reducen la resistencia y la vida útil de la unión. Las tensiones localizadas no siempre son evidentes y pueden ocurrir como resultado de dilatación térmica diferencial del adhesivo y adherente. Otra causa es la contracción del adhesivo durante el curado, cuando se desprenden volátiles ^[16].

Estos volátiles pueden quedar atrapados. Las tensiones internas disminuyen como adhesivo el espesor disminuye, aire puede también quedan atrapados en la interface si el adhesivo tiene una viscosidad demasiado alta, no fluye fácilmente a medida que se somete a curado, o si no humedece el sustrato.

3.4 Solicitaciones de la unión adhesiva

La función principal de los adhesivos es unir las partes. Adhesivos logran este objetivo por tensiones que transmiten de un miembro a otro de una forma que distribuye las tensiones mucho más uniformemente que con sujetadores mecánicos. A menudo la vinculación adhesiva proporciona estructuras que son mecánicamente equivalente o más fuerte que el convencional, ensamblados a menor costo y peso. En la fijación mecánica, la fuerza de la estructura está limitada a que de las zonas de los miembros en contacto con los sujetadores. ^[15] no es inusual obtener adhesivos que son más fuertes que los de la fuerza del fluido.

Las superficies lisas son una ventaja inherente de unida a las estructuras y productos. Las superficies expuestas no son borradas y contornos no son perturbados, como sucede con sistemas de fijación mecánica. Esta característica es importante en la función y apariencia. Estructuras aeroespaciales, incluyendo láminas de rotor de helicóptero, requieren exteriores suaves para minimizar el arrastre y mantener temperaturas tan bajas como sea posible.

Un peso más ligero materiales a menudo se utilizan con adhesión que con sujeción convencional porque la distribución uniforme de la tensión en la articulación permite la utilización de la fuerza y la rigidez del fluido. ^[15] vinculación adhesiva proporciona muchas áreas más grandes para la transferencia de la tensión a lo largo de la parte, disminuyendo la concentración del esfuerzo en pequeñas áreas.

Diferentes materiales, incluyendo plásticos, se ensamblan fácilmente con muchos adhesivos, siempre que se utilicen tratamientos superficiales adecuados. Adhesivos pueden ser utilizados para unir metales, plásticos, cerámica, corcho, goma y combinaciones de materiales. Adhesivos también pueden ser formulados para ser conductores.

3.5 Adhesivos acrílicos

Los adhesivos acrílicos modificados estructurales constituyen la más reciente y, tal vez, versátil de las familias de adhesivos empleadas en el ensamblaje de piezas en la industria.

Una característica diferenciadora de los adhesivos acrílicos es que no necesitan que la mezcla entre resina y activador sea completamente homogénea, ya que una vez generados los "centros activos", la propagación del polímero se produce en el seno del adhesivo. No se recomienda el uso de calor para acelerar el curado.

Los acrílicos se presentan comercialmente según dos sistemas principales de mezcla:

1. Sistemas adhesivo más activador

2. Sistemas bicomponentes

Los diversos ensayos realizados sobre adhesivos acrílicos muestran su excelente durabilidad (resistencia a la fatiga, a agentes medioambientales, propagación de la rotura, efecto de la holgura de adhesión, diseño de la junta, etc.) comparado con los adhesivos estructurales más conocidos. Presentan además tiempos de manipulación muy cortos ^[10].

3.5.1 Generalidades

Una serie de resinas acrílicas se utilizan para la unión de tela, plásticos, cuero, y en algunos casos, láminas metálicas. Los monómeros acrílicos más comúnmente utilizados en adhesivos son acrilato de etilo, acrilato de metilo, ácido metacrílico, ácido acrílico, acrilamida y acrilonitrilo. Los polímeros o copolímeros son solubles en disolventes orgánicos comunes y pueden suministrarse de la misma manera que otros sistemas basados en disolventes. Además, los polímeros son soluble en los monómeros. Cuando se añade un catalizador, los monómeros polimerizan, proporcionando así una buena adherencia al vidrio ya superficies de plástico de composición (por ejemplo, metacrilato de polimetilo) ^[16].

Se preparan una variedad de copolímeros acrílicos por polimerización en emulsión. Una serie de adhesivos acrílicos que se denominan "adhesivos reactivos", "modificados acrílicos", "acrílicos de segunda generación" o "adhesivos de fluidos reactivos" han estado disponibles a lo largo de los años estas formulaciones polimerizan en la línea de cola y se convierten en una parte integral de un conjunto adhesivo.

Los "adhesivos acrílicos de primera generación" cubren adhesivos que utilizan soluciones de polímeros, usualmente caucho, en monómeros de metacrilato, e implicaba polimerización de estos monómeros en presencia de una resina de refuerzo.

Los nuevos compuestos se basan en una combinación de diferentes polímeros modificadores para acrílicos y un activador de superficie. Un polímero modificante refuerza y endurece el enlace y proporciona un sitio químico reactivo, que actúa como catalizador en la presencia de activadores especiales.

3.5.2 Mecanismo de curado de los adhesivos acrílicos

La adhesión tiene lugar cuando los monómeros y activadores polimerizan por injerto en la modificación del polímero en la línea de pegamento. En forma comercial, estos sistemas adhesivos acrílicos constan de dos componentes, cada uno de los cuales es una composición de sólidos al 100% en forma fluida, reaccionando a formar una película adhesiva. El curado tiene lugar mediante un esquema de reacción de radicales libres ^[16]. Típicamente, una capa delgada (0,0025 mm de espesor) del activador se aplica a uno de los adherentes y se coloca una capa del adhesivo (0,026 - 0,26 mm) sobre el otro adhesivo.

A continuación, los dos sustratos se presionan juntos y se aseguran hasta que la fuerza de manejo se desarrolla. La mayoría de los adhesivos acrílicos curan hasta este punto en 2 - 20 minutos, pero algunos cura en tan sólo 10 segundos. En todos los casos, curar se completa en 24

horas. Estos adhesivos proporcionan un excelente cizallamiento, pelado y resistencia al impacto a temperaturas comprendidas entre - 107 °C y + 121 °C. Estos adhesivos pueden soportar exposiciones cortas hasta 177 °C. Los enlaces hechos con acrílicos típicamente resisten la inmersión en el isooctano, el aceite de motor, líquido hidráulico para aviones, solución de cloruro sódico al 10%, agua destilada, alcohol etílico y ácido mineral y alcalino diluido. Sin embargo, no son resistente a ácidos concentrados y soluciones alcalinas o acetona.

Desgaste resistencia, incluyendo ambientes de sal, también es excelente. Los adhesivos acrílicos se pueden usar para reemplazar la soldadura se requiere la manipulación de las piezas metálicas unidas. Otra amplia área de aplicación es para unir sustratos disímiles, incluyendo metales y otros ^[16].

3.5.3 Composición de los acrílicos

Los adhesivos acrílicos modificados estructurales constituyen la más reciente y, tal vez, versátil de las familias de adhesivos empleadas en el ensamblaje de piezas en la industria ^[10]. Una característica diferenciadora de los adhesivos acrílicos es que no necesitan que la mezcla entre resina y activador sea completamente homogénea, ya que una vez generados los "centros activos", la propagación del polímero se produce en el seno del adhesivo. No se recomienda el uso de calor para acelerar el curado.

Los acrílicos se presentan comercialmente según dos sistemas principales de mezcla:

1. Sistemas adhesivo más activador
2. Sistemas bicomponentes

Los diversos ensayos realizados sobre adhesivos acrílicos muestran su excelente durabilidad (resistencia a la fatiga, a agentes medioambientales, propagación de la rotura, efecto de la holgura de adhesión, diseño de la junta, etc.) comparado con los adhesivos estructurales más conocidos. Presentan además tiempos de manipulación muy cortos ^[10].

3.5.4 Ventajas e inconvenientes

Las uniones por adhesivo están usándose cada vez con mayor aplicación, dado que la calidad de los adhesivos y el conocimiento técnico que se posee sobre su comportamiento van en aumento en los últimos años ^[10].

Algunas de ellas son las que siguen:

- Versatilidad.
- Insuperable resistencia hidrolítica y permanencia en diversos medios agresivos.
- Dosificación versátil.
- Excelente relación precio-rendimiento.

- Preparación superficial mínima o innecesaria para metales y plásticos.
- Propiedades físicas estructurales o de resistencia frente a cargas.
- Cierta capacidad de relleno de holgura (hasta 3 mm).

Entre las desventajas podemos incluir las siguientes:

- Pobre adhesión sobre la mayoría de los elastómeros.
- Olor característico.
- En ocasiones, sistemas de mezclado en proporciones diferentes a 1:1.
- Puntos de inflamación bajos.

Aplicaciones

- Las aplicaciones de los acrílicos son muy diversas gracias a su alto rendimiento frente a cargas dinámicas y a temperaturas moderadamente altas ^[10]:
- Adhesión de ferritas a carcasas de motores eléctricos
- Adhesión de zapatas de frenos a coronas
- Paneles de calefacción solar
- Equipamiento deportivo sometido a tensiones como las raquetas de tenis
- Adhesión estructural en aviones y embarcaciones
- Adhesión entre madera y vidrio (carpintería)
- Uniones metal-metal, metal-vidrio y metal-plástico

Capítulo 4 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN UNIONES ADHESIVAS

4.1 Introducción y objetivos

El principal problema asociado al uso de estos materiales es que son sustratos con baja energía superficial y precisan un tratamiento superficial para aumentar la mojabilidad de sus superficies y obtener buenas uniones adhesivas, un pintado eficiente y la aplicación de recubrimientos duraderos ^[18]. Las superficies de estos materiales deben modificarse de forma adecuada para dotarlos de prestaciones específicas. El proceso de preparación de superficies constituye en estos casos una etapa crítica. Cada vez se aplican tratamientos más específicos y sofisticados para mejorar las propiedades de unión de los polímeros.

En el caso de la adhesión, el objetivo de los tratamientos superficiales es el incremento de la afinidad entre la superficie de los adherentes y la superficie de los adhesivos.

4.2 Descripción de tratamientos

La preparación superficial es el paso previo a la aplicación del adhesivo. Es básico y de gran importancia, ya que afecta a la resistencia de la unión, a su estabilidad y durabilidad ^[55].

Los tratamientos superficiales suelen escogerse de forma que modifiquen la superficie exterior de un material, mejorando la adhesión, pero sin alterar las propiedades del seno del material. En caso de penetrar demasiado, el tratamiento superficial podría deteriorar las propiedades mecánicas del material y disminuir la posterior vida de la unión ^[19].

En muchos casos, además de mejorar las interacciones adhesivo-adherentes, se busca eliminar o prevenir la formación de capas de contaminantes o de componentes de la formulación de los materiales que tienden a migrar a la superficie y forman una capa de rotura preferencial ^[19].

El tipo de tratamiento superficial debe escogerse en función de las propiedades del adherente, fundamentalmente de su energía superficial. Entre los tratamientos superficiales más frecuentes para polímeros se encuentran: la limpieza con disolventes, los tratamientos mecánicos (abrasión, lijado), químicos (halogenación, tratamiento con ácido sulfúrico-ciclación), y tratamientos físicos mediante radicales (plasma de baja presión, descarga corona).

Los metales, adherentes de alta energía superficial, presentan una adhesión inicial adecuada, pero al generar óxidos metálicos en su superficie, las uniones se debilitan con el transcurso del tiempo. En metales son comunes los tratamientos que incorporan precursores de la adhesión (primers) en la superficie, para evitar los efectos degenerativos del tiempo y de la humedad ^[19].

4.2.1 Limpieza superficial

La limpieza superficial consiste en la eliminación de la suciedad o contaminación superficial de un sustrato, sin provocar alteraciones físicas o químicas del mismo. Existen tres procedimientos de limpieza con disolventes ^[17]:

- Desengrasado en fase vapor.
- Tratamiento en baño de ultrasonidos.
- Frotado, inmersión o spray.

Sin embargo, la necesidad de modificación química, en materiales con baja energía superficial para su posterior adhesión (vía incremento de la energía superficial), convierte a la limpieza superficial en un paso previo más a realizar dentro de otro tipo de tratamiento ^[56].

4.2.1.1 El desengrasado en fase vapor

Mediante el desengrasado en fase vapor la superficie del sustrato se pone en contacto con vapor caliente de un disolvente capaz de solubilizar aceites, grasa, parafinas sólidas, etc. Se produce una acumulación de vapor caliente en la superficie fría de la pieza, hasta que el peso de la gota provoca su retorno al baño de disolvente Figura 45 ^[17].

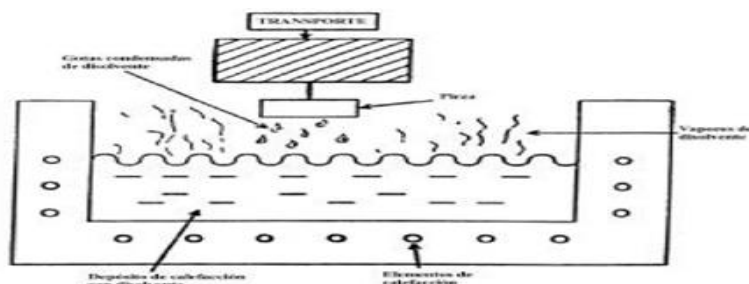


Figura 45 Desengrasado con disolvente orgánico en fase vapor^[17].

4.2.1.2 El tratamiento en baño de ultrasonidos

Mediante el tratamiento en baño de ultrasonidos se obtienen limpiezas superficiales de alta calidad mediante irradiación de ondas ultrasónicas a través de un disolvente o mezcla de disolventes adecuada. Esto provoca una rápida agitación y cavitación que eliminan las partículas más inaccesibles, Figura 46. Las frecuencias de los ultrasonidos se hallan en el rango de los 20000 a 50000 Hz^[17].

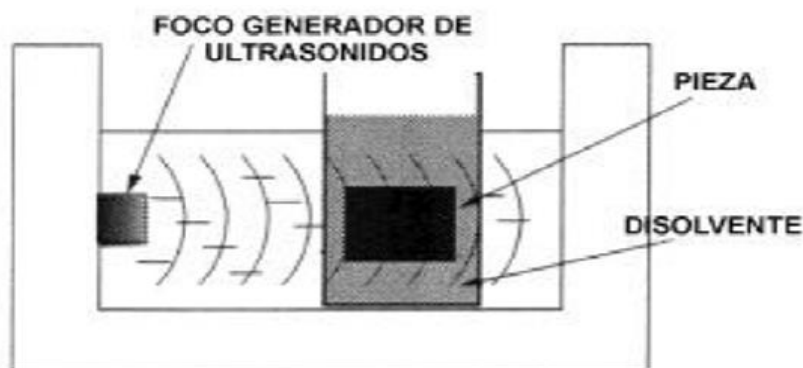


Figura 46 Sistema de limpieza en baño de ultrasonidos

4.2.1.3 El frotado, la inmersión y el spray

El Frotado, la inmersión y el spray son los métodos más simples y versátiles, pero a su vez, son más difíciles de controlar. El frotado consiste en el paso con intensidad de un paño, brocha o papel de celulosa empapado en el disolvente. La operación se debe repetir varias veces, hasta que no exista evidencia de contaminación en la superficie a limpiar, Figura 47^[17].



Figura 47 Limpieza de superficies mediante frotado

La inmersión en baños de disolvente es útil para la limpieza de piezas pequeñas. En ocasiones precisa de la ayuda de brochas, frotado, etc.

El método por spray asegura que todo el disolvente que llegue a la superficie de la pieza sea limpio. Sin embargo, es un método más costoso que los anteriores.

4.3 Tratamientos abrasivos

Los tratamientos abrasivos son fundamentalmente lijados, cardados, chorro de arena (Figura 48), chorro de granalla, etc. El método de abrasión elegido y las variables experimentales dependerán del sustrato y del proceso de unión. Los efectos que producen sobre los sustratos son ^[17]:

- Eliminación de los contaminantes superficiales.
- Creación de una superficie activa.
- Aumento del área de contacto con el adhesivo.
- Se retarda la fractura mecánica de la unión adhesiva.

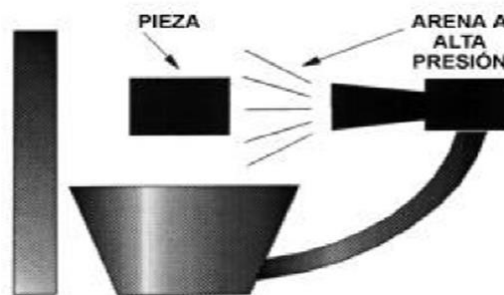


Figura 48 Tratamiento abrasivo mediante chorro de arena

Tras realizar un tratamiento abrasivo se debe proceder a una limpieza de los sustratos tratados para eliminar restos de polvo, contaminantes, etc. y llevar a cabo la adhesión antes de que aparezca la corrosión o la contaminación.

Existen tratamientos abrasivos químicos que eliminan la capa más externa de material. Los agentes químicos empleados se denominan “decapantes”. Para una buena selección del material abrasivo que se utilizara es indispensable conocer su dureza.

Dureza, Marca la resistencia de un mineral a ser penetrado por otro material. Se suele medir en la escala de Mohs de 1 a 10 donde el valor más elevado corresponde al diamante. Los minerales que se usan en reparación suelen estar en 9,5.

Es tal vez la propiedad de mayor importancia, el abrasivo debe poseer una dureza elevada, superior a los materiales que debe mecanizar. Esto con el fin de remover el sobre-metal sin sufrir desgastes excesivos en su estructura. Como puede verse en la Tabla 4.1 los materiales usados como abrasivos presentan durezas superiores a las de materiales convencionales ^[20].

Tabla 4.1 Dureza de materiales usados como abrasivos

Dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos			
Vidrio común	300 – 500	Carburo de titanio	1800 - 3200
Aceros endurecidos	700 - 1300	Carburo de silicio ^a	2100 - 3000
Carburo de tungsteno	1800 – 2400	Carburo de boro	2800
Óxido de aluminio ^a	2000 – 3000	Nitruro de boro cúbico ^a	4000 - 5000
Nitruro de titanio	2000	Diamante ^a	7000 - 8000

^a Utilizados comúnmente como abrasivos

4.4 Imprimación

Las imprimaciones son sustancias que se emplean como intermedio entre el adhesivo y el sustrato. Tienen muy diversas funciones. Así, en superficies de alta energía superficial por ejemplo se emplean para incrementar la resistencia de las uniones adhesivas a la fatiga, la temperatura y la humedad. En algunas ocasiones protegen la superficie del sustrato frente a agentes físicos o químicos, aunque con ello también se dota a tales sustratos de propiedades antiadherentes ^[17]. Pueden producir los siguientes efectos:

1. Protección de la superficie del sustrato.
2. Mejora de la interacción entre el adhesivo y el sustrato.
 - a. Incrementando la mojabilidad de los adhesivos muy viscosos.
 - b. Permitiendo la adhesión de sustratos difíciles de unir.

- c. Creando una capa de mayor energía superficial.
- d. Aumentando la vida de servicio de la unión adhesiva.
- e. Mejorando la adhesión de los adhesivos.
3. Mejora de las propiedades cohesivas de sustratos inconsistentes.
4. Flexibilización del tratamiento superficial.
5. Generación de características particulares:
 - a. Reduciendo la penetración de la humedad.
 - b. Eliminando rugosidad superficial.
6. Absorción e inclusión de la suciedad superficial inherente a ciertos sustratos.
7. Protección de la interface adhesiva frente a la radiación UV.

Existen ciertas imprimaciones que se pueden emplear para activar la superficie de polímeros difíciles de adherir. Todos los polímeros tienen en común una marcada polaridad que dificulta el mojado del adhesivo y, como consecuencia, sólo son capaces de generar enlaces intermoleculares de baja energía. Estas imprimaciones se recomiendan para adherir poliolefinas, politetra fluoroetileno y siliconas, entre otros. Se diseñan para su uso con cianoacrilatos debido al mecanismo de curado y a la elevada polaridad de estos adhesivos ^[17].

4.5 Tratamientos mediante plasma

El tratamiento mediante plasma de baja presión se comenzó a utilizar con profusión desde 1960. El plasma puede ser generado en el aire (descarga corona) o a presión reducida (“glow discharge”). En lugar de un gas (aire, amoníaco, argón, nitrógeno, oxígeno, tetrafluorometano, etc.) se puede emplear un polímero, produciendo un efecto que se conoce con el nombre de “grafting”. Mediante este método se pueden lograr grosores controlados y reproducibles que actúan como primers, Figura 49 ^[17] ^[44].

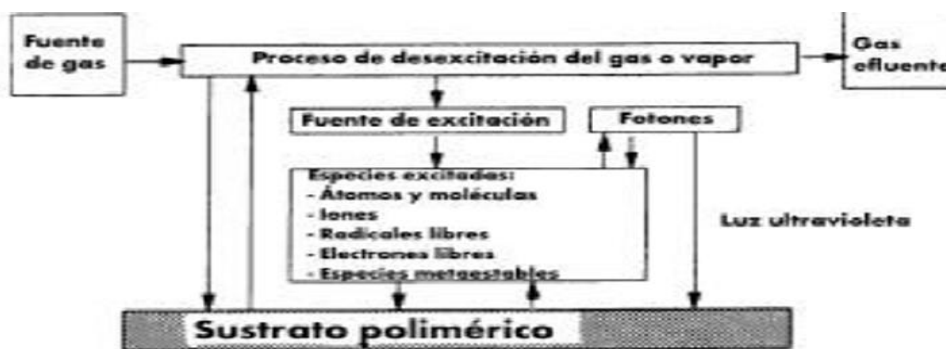


Figura 49 Tratamiento mediante plasma de baja presión ^[17].

Fundamentalmente los efectos que produce el tratamiento con plasma sobre los sustratos son los siguientes ^[17]:

- Limpieza superficial.
- Degradación de las zonas superficiales.
- Reticulación de los polímeros en la superficie.
- Oxidación superficial.
- Polimerización y “grafting” en la superficie del sustrato.
- Implantación iónica.

Los plasmas fríos se denominan también de no equilibrio local, dado por la distribución de Boltzmann de especies, de modo que la temperatura de partículas pesadas es menor que la de electrones (Figura 2.14), no alcanzando temperaturas superiores a los 150 °C y, por tanto, evitando el daño térmico de las muestras tratadas ^[56].

Capítulo 5 EXPERIMENTACIÓN

En esta investigación se analizaron las características que se puedan obtener mediante uniones adhesivas, con una unión a traslape simple se utiliza esta unión ya que las pruebas que se le realizaran son a cortante y esta es la que presenta un mejor funcionamiento.

Esto es para poder desarrollar un método preciso y confiable para poder realizar uniones adhesivas en lugar de uniones mecánicas todo esto para poder mejorar el desempeño de la estructura de la embarcación para la que está contemplada y para futuras aplicaciones.

El siguiente diagrama de flujo muestra cómo se desarrolló la experimentación en esta investigación Figura 50.

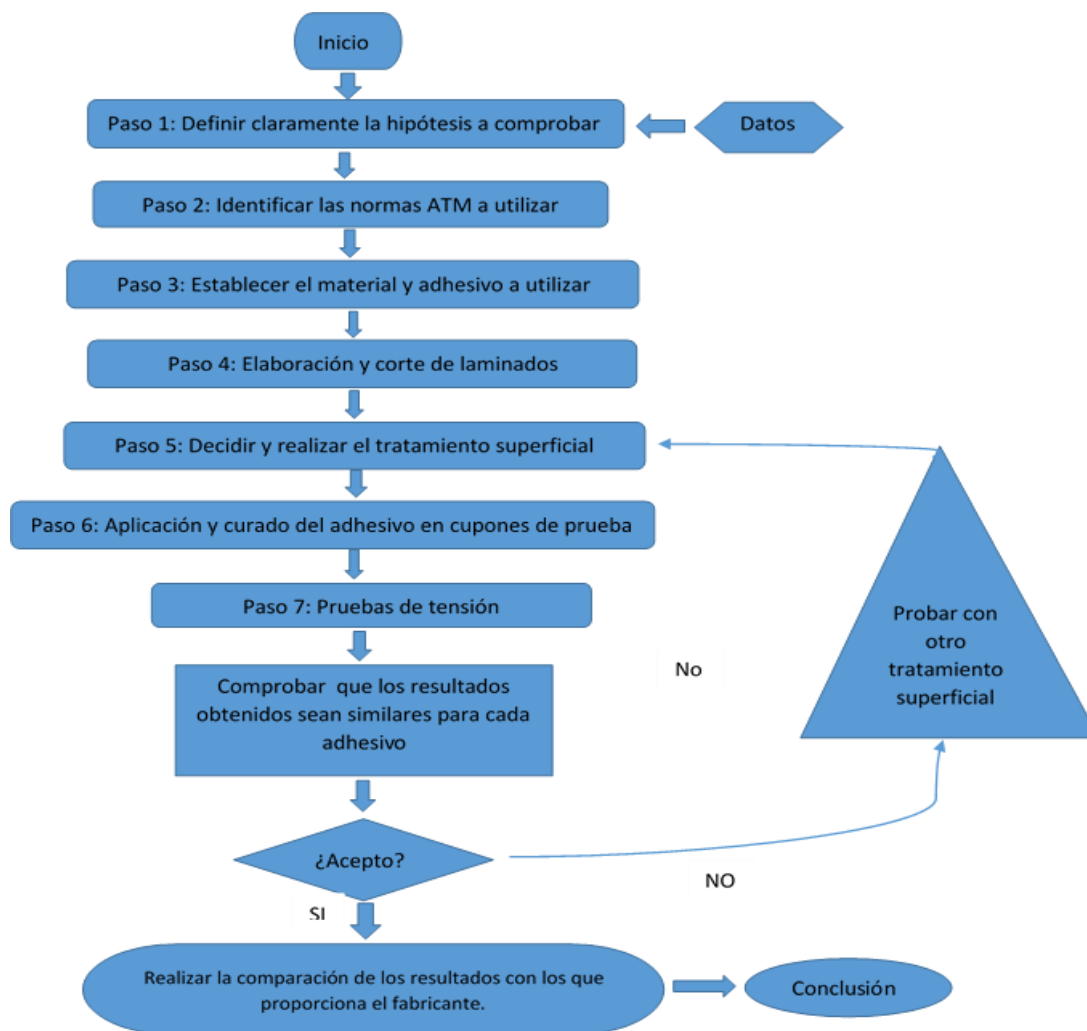


Figura 50 Diagrama esquemático de metodología

5.1 Materiales de trabajo

Primero se analizó el procedimiento que se iba a llevar a cabo a lo largo de toda la investigación, tomando en cuenta los requerimientos que se necesitaban tanto los que solicitan las normas todo esto bajo las instrucciones que esta menciona (ASTM D 1002) que más adelante se explica de una manera afondo en la que se basaría la investigación y los materiales fueron los que tenemos al alcance.

5.2 Selección de materiales

Se procedió a seleccionar el material requerido para llevar a cabo la realización de los laminados los cuales fueron los que se ajustaron más al requerimiento:

5.2.1 Fibra de vidrio

Las telas tejidas son refuerzos fuertes porque las fibras se envuelven en hilos orientados en sólo dos direcciones. Los hilos de urdimbre y de relleno funcionan a 0 y 90°. Respectivamente. Así, los tejidos son anisotrópicos, o fuerte en sólo dos direcciones. Las telas necesitan estar orientadas de manera que los hilos de fibra funcionen paralelos a las cargas esperadas Figura 51. Si se necesita fuerza extra en una dirección diferente, se debe añadir otra capa en un ángulo a la primera. Los ángulos más comunes son +/- 45 grados^[21].

Specific Product Properties		
Style	64TC	
Finish	627	
Weave Pattern	Plain	
Yarn Description	Warp: ECG 75 1/3	
	Fill: ECG 50 1/0	
Count: Ends x Picks (in)	18 x 17	
Weight	7.80 oz/yd ² – 9.60 oz/yd ²	

Figura 51 Propiedades y presentaciones de la fibra^[21]

5.2.2 Resina epóxica

La química de las resinas epoxi está basada en la capacidad del radical epoxi para reaccionar con otros radicales orgánicos y realizar enlaces cruzados sin la aparición de un producto condensado. Las resinas son disfuncionales o polifuncionales, en términos del grupo epoxi, y suelen tener un esqueleto aromático. La mayoría de las resinas utilizadas para procesos de laminación son aromáticas y en ocasiones mezcladas con material alifático^[36].

La resina epóxica sistema 2000 es una resina de laminado ámbar ligero de viscosidad media que está diseñada para ofrecer la resistencia máxima más alta para un epóxido de temperatura ambiente. Se utiliza para fabricar piezas de alta resistencia y otras aplicaciones estructurales exigentes. Utilice este sistema para maximizar las propiedades físicas de la fibra de carbono, kevlar y laminados de vidrio. Los resultados de las pruebas han demostrado su superioridad sobre otros epóxidos a temperatura ambiente^[21].

5.2.3 Adhesivo epóxico

Adhesivo epóxico es un color grisáceo claro que fue desarrollado específicamente para problemas de vinculación difíciles que implican problemas similares o materiales.

Adhesivo de pegado de pasta epóxica proporciona excelente adhesión a una amplia variedad de materiales tales como aluminio, acero, latón, hormigón, ladrillo, vidrio, piedra,

cerámica, baldosas y madera. Adhesivo de pasta epoxi tiene muy buenas características de manejo. La relación de mezcla de 1 a 1 en peso o volumen permite una medición fácil. Es muy fácil de mezclar; y tiene buena tixotropía para aplicación a contornos o verticales superficies sin hundimiento o escurrimiento. Adhesivo epóxico cura relativamente rápido, el material curado tiene una resistencia excelente, así como, buena resistencia a ácidos débiles, humedad y clima ^[21].

5.2.4 Film de adhesivo

De Fm 99 es una película modificada a base de epóxica adhesiva diseñada para revestir estructuras compuestas Figura 52. Esto provee un fin de alta calidad, listo a pintura superficial. Su 250°F/350°F (121°C/177°C) la capacidad de cura dual hace de 99 película para revestir una amplia variedad de compuesto pre impregnados y materiales. De 99 películas que es suministrado como una película delgada con un portador de estera arbitrario. También puede ser utilizado cobre, aluminio y otras pantallas metálicas y hojas de metal ^[22].

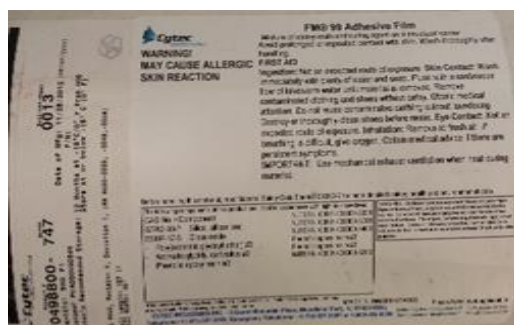


Figura 52 Film adhesivo FM 99

El equipo que se utilizó para la elaboración de los laminados, los cupones de prueba y para finalizar con la realización de las probetas se dividieron en dos partes.

a) Para la elaboración de los laminados se utilizaron los siguientes

Comenzamos con la selección del método para manufacturar los laminados de fibra de vidrio este método de bolsa de vacío el material utilizado para esto fue bolsa de vacío, tape doble, conectores para líneas de vacío, bomba de vacío y materiales para poder realizar la mezcla y aplicación de la resina Figura 53.



Figura 53 Materiales para proceso de bolsa de vacío

- b) Para poder extraer los cupones de prueba de los laminados se utilizó una cierra de banco, equipo de seguridad que se explica más adelante.

5.2.5 Fibra de vidrio molida en 1/16

Se utilizó como material de refuerzo para ver que propiedades le podría agregar al momento de hacer la mezcla con la resina las especificaciones del fabricante son las siguientes: Estas fibras cortas ofrecen resultados de alta resistencia que se Mezcla con cualquier relleno o fundición material para aumentar la resistencia y reducir la contracción. La mezcla con resina crea una unión resistente que soporta la corrosión o utilizada para realizar reparaciones de alta resistencia Figura 54 ^[34].

Propiedades	
Material	Filamento de vidrio E
Diámetro del filamento	16 micras
Longitud	1/16 pulg
Apariencia	Blanco, floccular
Densidad aparente	.53 +/- .08g/cc

Figura 54 Fibra de vidrio molida a 1/16

5.2.5.1 Características y Beneficios:

- Filamentos de vidrio con un tamaño específico para mejorar la resina.
- A diferencia de los filamentos cortados, que se cortan en un hilo específico longitud, las fibras molidas se muelen a una densidad aparente promedio.
- Diseñado para uso en termoplástico y termoestable compuestos para aplicaciones en la industria automotriz, eléctrica, mercado de consumo, construcción y aeroespacial.
- Buena fluidez con alta densidad
- Mejor rendimiento para una mayor productividad y menor costo de fabricación

- La fibra de vidrio E proporciona estabilidad dimensional, control de contracción, excelente módulo y resistencia a los ácidos

5.2.5.2 Instrucciones de mezcla

Siguiendo las instrucciones del fabricante se agregó el 5% fibras de vidrio molido en peso a la resina para aumentar la resistencia a la tracción de los materiales sin efectos negativos. No debe usarse como un suplemento de refuerzo en aplicaciones estructurales Figura 55.



Figura 55 Mezcla de resina con fibra molida

5.3 Normatividad

El método que se utilizó para las pruebas de esfuerzo cortante es la prueba de articulación de traslape simple ASTM D-1002 determina la resistencia al cizallamiento de los adhesivos para unir metales cuando se prueba en una muestra a una vuelta con las articulaciones ^[38]. La prueba es aplicable para determinar la resistencia adhesiva, parámetros de preparación de la superficie, y la durabilidad del medio ambiente adhesivo ^[23] (Figura 55):

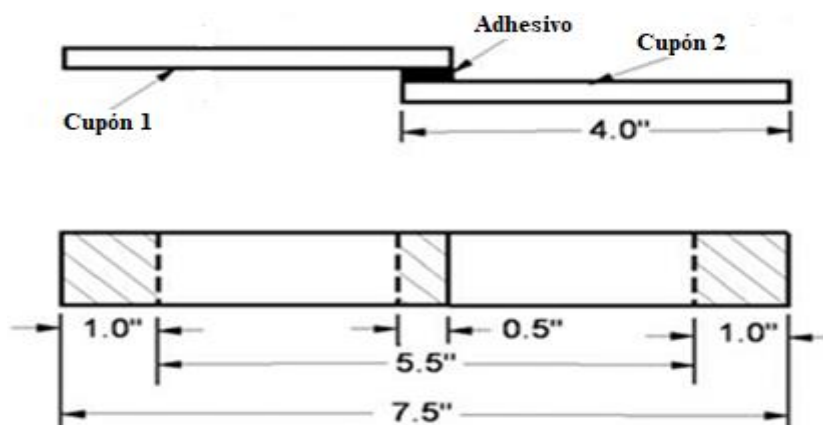


Figura 56 Diagrama para probetas corma ASTM D-1002^[38].

Se tomó como base las especificaciones que maneja esta norma para desarrollar las probetas y posterior mente hacer las uniones para después realizar las pruebas a tensión de estas muestras. Las pruebas consistieron en elaboración de cupones de prueba para después unirlos con la unión

5.4. Elaboración de laminados

Como primer paso se procedió a realizar los laminados de fibra de vidrio los cuales se hicieron de la siguiente manera:

Primero se colocó una base plana en este caso se utilizó madera y esta fue recubierta con primer para que evitar el contacto de la resina con la madera y poder desmoldar fácil mente y la superficie de contacto tuviera buen acabo.

Segundo se prepararon todos los materiales como cortar los tramos de tela que utilizamos para obtener los 8 capas de tela para obtener el espesor deseado del laminado así como el material para realizar el proceso de bolsa de vacío.

Se colocaron dos capas de desmoldante sobre el molde después de secar se procedió a poner la primer capa de fibra, se cubrió con resina epóxica impregnada manual mente, con la mezcla de resina epóxica, se utilizó una proporción de 750 ml de resina y 150 mil de catalizador. Así sucesivamente hasta colocar las ocho capas de fibra para obtener el espesor deseado teniendo esto se colocó el molde dentro de la bolsa de vacío se procedió a sellan bien y se dejó curando a temperatura ambiente con vacío por un periodo de 24 horas.

Pasado el tiempo, se procedió a realizar el desmolde del laminado este procedimiento se realizó dos veces más ya que se hicieron tres laminados para tener un poco más de piezas de las requeridas Figura 57.



Figura 57 Proceso de elaboración de laminado

Después de desmoldar los laminados se procede a revisar el acabado de estos y se revisaron para ver si tenían alguna imperfección.

Posteriormente se elaboraron cuatro nuevos tipos de laminados, con las mismas especificaciones de los anteriores, pero en estos casos la variación fue la en la unión, En los cuatro casos al momento se dejaron curando los laminados, dos se realizó la unión después de curado Figura 56 y los otros dos la unión se realizó al momento de hacer los laminados, dejándose curar ya con la unión, en dos tipos la unión se realizó con resina, los otros dos tipos se realizó con resina la cual se mezcló con fibras cortas de vidrio Figura 58.



Figura 58 Laminados curados al mismo tiempo

A los laminados que se utilizó resina mezclada con fibra de vidrio, la mezcla de resina se utilizó la misma proporción de resina y catalizador, se le agregó fibra de vidrio molida de 1/16 en una cantidad de 5% del peso de la resina en este caso se utilizaron 45 gr de fibras Figura 59, una vez agregadas las fibras procedió a realizar la mezcla de estas para después realizar el impregnado de las fibras para los laminados

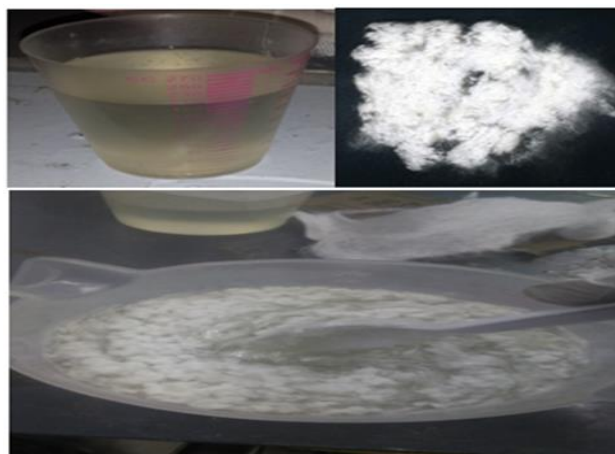


Figura 59 Mezcla de resina epóxica con fibra molida de vidrio 1/16

5.5 Corte de laminados material compuesto

Obtenidos los laminados se procedió a realizar el corte de estos a acorde con lo que marca la norma ASTM D 1002 a la extracción de cupones con los cuales se puede Figura 60 y 61.

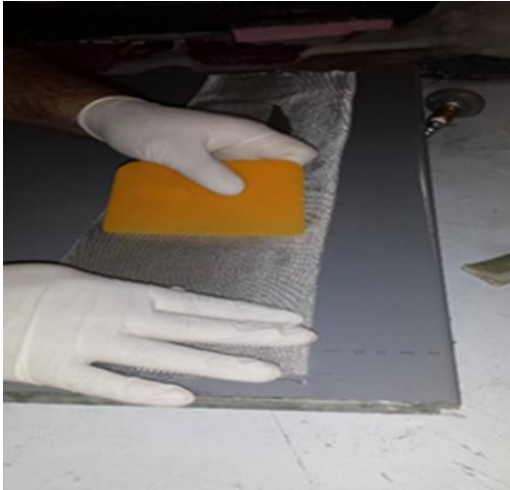


Figura 60 Impregnación de fibras con resina epóxica



Figura 61 Laminado Terminado.

Se seleccionó el equipo con el cual poder cortar los laminados:

Primera opción se utilizó un dremel (marca: Chicago electric power tools, tiene una velocidad máxima: 35000 RPM y una mínima: 8000 RPM)^[24], con un disco de corte abrasivo (Marca: Warrior, velocidad máxima: 20000 rpm)^[25], con recubrimiento de diamante para trabajar con materiales duros, se hicieron algunas pruebas con este pero se determinó que no era muy efectivo ya que el disco perdía el filo muy rápido y empezaba a generar recalentamiento y de laminaciones en los laminados.

Segunda opción se utilizó un banco de corte de loseta (motor: 559 W)^[26] con un disco de corte de loseta con recubrimiento de diamante (Medidas 7" x 0.102" x 7/8")^[27] se hicieron unos cortes de muestra y se determinó que si fue aceptable el rendimiento del equipo así como el acabado de los cortes que se hicieron, el inconveniente que se encontró fue que el motor del equipo se sobre calienta cuando se realizaron más cortes y comenzó a presentar sobre calentamiento y de laminaciones en los cortes, Figura 62.



Figura 62 Segunda opción banco de corte para loseta, madera y disco con recubrimiento de diamante.

Tercera opción fue un segundo banco utilizado para cortes de loseta (Velocidad: 3500 rpm) con un disco para cortar loseta con recubrimiento de diamante al contrario del anterior este es un poco más delgado (diámetro: 0.178 m), se hicieron los cortes de prueba y los resultados fueron aceptables en los acabados y no presento calentamiento al contrario del otro equipo esta opción, Figura 63.

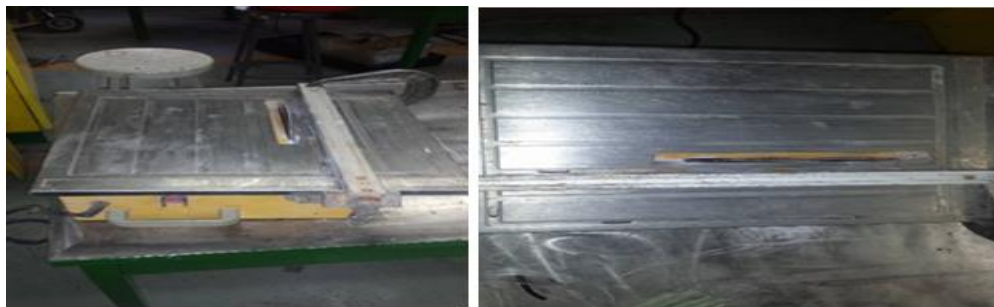


Figura 63 Tercera opción banco de corte de loseta con disco con recubrimiento de diamante

Teniendo en cuenta todos los resultados de los tres equipos que se probaron para poder realizar los cortes se seleccionó la tercera opción ya que fue la que presento mejores resultados, teniendo el equipo seleccionado se procedió primera mente escuadrar los laminados Figura 64.



Figura 64 Laminado de fibra de vidrio, las orillas algunas partes están desfasadas las capas

Después se procedió a cortar media pulgada de cada lado ya que es lo más recomendable porque es en esas zonas donde puede que los extremos de los laminados no estén alineados completamente y con eso se tiene la certeza de que están todas las capas Figura 65.



Figura 65 La minado de fibra de vidrio en proceso de esquadralo.

Se procedió a marcar los laminados embace a las medidas que recomienda la norma antes mencionada, además de las marcaciones y de preparar el quipo para realizar el corte se dejaron un poco sobradas de cada lado para posterior mente darles el acabado o dejarlas a la medida exacta esto se realizó lijando los extremos para emparejar y quitar cualquier imperfección que haya quedado después del corte Figura 66.



Figura 66 Cupones de prueba e instrumentos de medición utilizados

Para los laminados que se realizó la unión en el curado se realizó el mismo procedimiento la única variación se utilizó una cortadora de banda y se obtuvieron las probetas completas Figura 67.

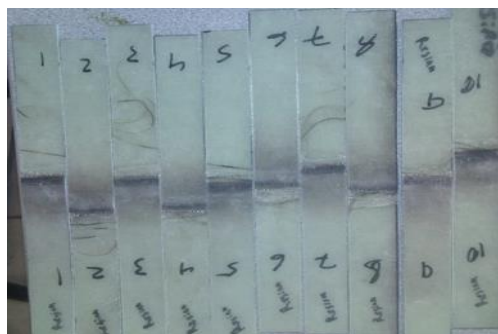


Figura 67 Fotos de las probetas marcadas cortadas y con medidas

5.6 Tratamientos superficiales

A los cupones obtenidos de los laminados se les realizan diferentes tratamientos en la superficie de contacto donde se va a realizar la unión, esto sirve para que el adhesivo tenga una mejor penetración o sujeción en el cupón por ende se obtiene una mejor unión del adhesivo con el material en este caso con los cupones de fibra de vidrio.

5.6.1 Limpiado con acetona y lijado

Primero y en base a lo que menciona la norma en si diagrama para formar la unión marca como media pulgada de largo por una de ancho teniendo esta área delimitada se procedió a lijarla con lija numero 100 este proceso se realizó igual para todas las probetas solo para quitar la capa superficial de resina todo esto para tener una mejor adherencia Figura 68 y Figura 69.



Figura 68 Cupón de prueba antes del tratamiento de lijado.



Figura 69 Cupón de prueba después del tratamiento superficial de lijado y uno sin tratamiento

Después de tener todos los cupones lijados se procedió a limpiar toda la superficie lijada con acetona y se dejó secar para luego realizar la unión de los dos cupones para poder obtener las probetas Figura 70.



Figura 70 Cupones de prueba dejando secar después de limpiarlos con acetona el área del tratamiento

Todo esto se dio ya que antes se hicieron unas pruebas piloto de las probetas sin ningún tratamiento superficial en las probetas y el resultado fue una unión muy frágil que a la menor aplicación de fuerza se rompía la unión ya que el adhesivo no tenía penetración en el sustrato de fibra de vidrio.

5.6.2 Uniones de las probetas

Ya con los cupones con su tratamiento superficial listo se procede a hacer la unión de los dos cupones mediante los adhesivos unos con el adhesivo epóxico y otros con el adhesivo FM99.

5.6.2.1 Para el adhesivo epóxico

Primero se procede a hacer la mezcla de los dos componentes del adhesivo Figura 71, luego para tener un control de cuanto adhesivo se coloca en cada una de las probetas se hizo la siguiente dinámica.

Primero se hizo la mezcla de las dos partes del adhesivo con el apoyo de una balanza ya que la relación de mezcla fue 1 a 1 según el fabricante Figura 72.



Figura 71 Adhesivo epóxico parte A y B, mezcla de las dos partes.



Figura 72 Mezcla 1 a 1 de las dos partes del adhesivo.

De ahí se procede a hacer el reparto de adhesivo que se usara por probeta la cual se colocó un recipiente en la balanza y esta se agregó el peso de este y de ahí se tomó como si fuera el cero se agregó 1 gramo de adhesivo a cada uno, de ahí se colocó la mezcla en la probeta, después se volvió a pesar el recipiente para saber cuánto del adhesivo se quedó impregnado en este y saber la cantidad exacta de mezcla aplicada a cada probeta y esto se repitió en cada una de las probetas realizadas Figura 73.



Figura 73 Se pesa y vierte el adhesivo en los cupones de prueba

Estos se dejaron curar al ambiente normal por un periodo de 24 horas para evitar problemas con el control de la temperatura, Después se retiraron las abrazaderas (clamps) Figura 74, (especializados que juntos aplican una presión de 8 psi aproximadamente) y se procedió a lijar los excesos de adhesivo que salieron por los lados de la probeta para proceder a realizar las pruebas de tensión Figura 75.



Figura 74 Abrazadera (clamps) utilizados para realizar la unión de los dos cupones.



Figura 75 Probetas listas para realizar las pruebas de tensión.

5.6.2.2 Adhesivo FM 99

Para este adhesivo se preparó diferente ya que como es un film preimpregnado y se conserva a bajas temperaturas el fabricante sugiere que por lo menos 24hrs antes de utilizar se saque y se deje a temperatura ambiente, todo esto para que vaya reaccionando el material. Habiendo echo esto se procede a cortar el film del tamaño del área sobre la cual se le hizo el tratamiento a los cupones de prueba en este caso se usaron dos films por probeta y con el apoyo de los abrazadera (clamps) se dejaron curando en el horno. Con esto se introdujo al horno y se dejó curar por un periodo de 1 hora a 250 grados Fahrenheit Figura 76 (como lo marca el fabricante para el curado del adhesivo).



Figura 76 Probetas curándose en el horno

5.6.2.3 Unión con resina

En esta unión tuvimos dos casos de prueba unas probetas se elaboraron los laminados por separado para posterior mente hacer la unión de estos Figura 77. En el otro caso los laminados se elaboraron y se dejaron curar ya con la unión Figura 78, en los dos casos se utilizó resina epóxica como agente adhesivo.



Figura 77 Laminados separados unidos con resina

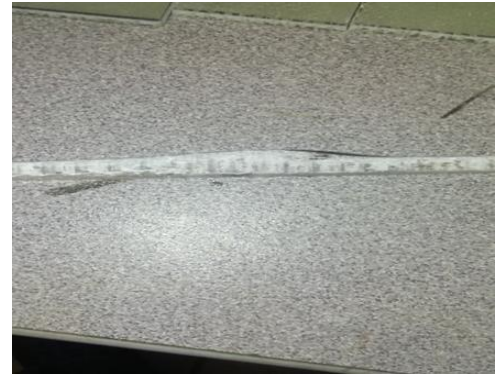


Figura 78 Laminados curados ya con la unión.

5.6.2.4 Unión con resina mezclada con fibra de vidrio molida

En esta unión tuvimos dos casos de prueba unas probetas se elaboraron los laminados por separado para posterior mente hacer la unión de estos Figura 79. En el otro caso los laminados se elaboraron y se dejaron curar ya con la unión Figura 80, en los dos casos se utilizó resina epóxica mezclada con fibra de vidrio molida como agente adhesivo.

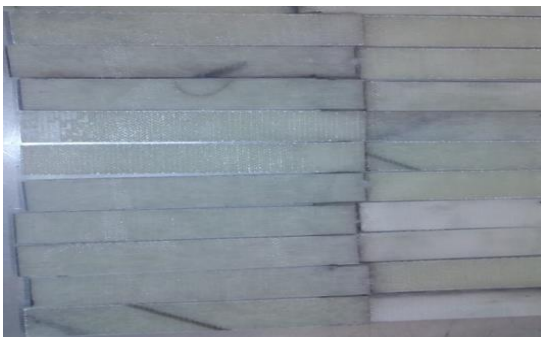


Figura 79 Probetas por separado unidos con resina mezclada con fibra de vidrio molida



Figura 80 Probetas unidas con resina mezclada con fibra de vidrio molida

5.7. Pruebas de Tensión.

Para las pruebas de tensión se realizaron en la máquina de tensión del laboratorio de Aero espacial de tensión Galdabini Quasar 100 (Figura 81) en la cual antes de llevar a cabo las pruebas finales se procedió a hacer unas de prueba para ver el comportamiento de la máquina, gracias a que resultados estuvieron acorde a los esperado se procedió a realizar las pruebas de las probetas que se realizaron ya sea para adhesivo epóxico o al adhesivo FM99 independiente mente.



Figura 81 Máquina de tensión utilizada.

Se programó la maquina con las especificaciones que marca la norma ASTM utilizada, que marca una velocidad a la cual se deben de llevar a cabo las pruebas, la cual fue de 1.3 mm/min (0.5 pulg/min).

5.7.1 Pruebas con adhesivo epóxico

Obtenidas las probetas con adhesivo epóxico las cuales se probaron en la máquina de tensión se generaron los siguientes resultados para las dos corridas que se hicieron. Figura 82.



Figura 82 Prueba de tensión, probetas adhesivo epóxico.

Se realizaron seis probetas para este adhesivo y los resultados fueron los siguientes tomando como datos la carga y deformación para cada una de las probetas. Tabla 5.1. Se anexo el cálculo del esfuerzo cortante para cada probeta obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.1 Resultados de pruebas de tensión, probetas con adhesivo epóxico.

Número de probetas	Carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo cortante			
1	5570	2211	17267034.53	N/m^2	17.2670345	Mpa
2	4357	1861	13506727.01	N/m^2	13.506727	Mpa
3	5086	2403	15766631.53	N/m^2	15.7666315	Mpa
4	5432.5	3161	16840783.68	N/m^2	16.8407837	Mpa
5	2179	894	6754913.51	N/m^2	6.75491351	Mpa
6	5661	2602	17549135.1	N/m^2	17.5491351	Mpa

5.7.2 Pruebas con adhesivo FM 99

Con estas probetas al igual que con las anteriores se siguió el mismo procedimiento para realizar las pruebas de tensión en la máquina Figura 83.



Figura 83 Pruebas de tensión probetas con adhesivo FM 99

Al igual que con el adhesivo anterior con este también se realizaron seis corridas con las probetas que se realizaron con este adhesivo Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados de pruebas, probetas con adhesivo FM 99.

Número de probetas	carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo cortante			
1	3959	2093	12272924.5	N/m ²	12.2729245	Mpa
2	3219	1369	9978919.96	N/m ²	9.97891996	Mpa
3	3757	2026	11646723.3	N/m ²	11.6467233	Mpa
4	2899	1176	8986917.97	N/m ²	8.98691797	Mpa
5	4488	2460	13912827.8	N/m ²	13.9128278	Mpa
6	3983	1819	12347324.7	N/m ²	12.3473247	Mpa

5.7.3 Pruebas utilizando resina como adhesivo; curado por separado y juntas

Para estos dos casos se siguió el mismo procedimiento antes mencionado pero aquí se utilizó la resina como agente adhesivo. La unión fue la distinta ya que en un caso las probetas estaban separadas y se unieron posteriormente con resina, los resultados obtenidos aparecen en la tabla 5.3, el otro caso la unión se dio al mismo tiempo de estar elaborando los laminados, los resultados obtenidos aparecen en la tabla 5.4.

Tabla 5.3 resultados de pruebas, con probetas unidas por separado con resina

Número de probetas	Carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo cortante			
1	4121.5	2309	12776675.55	N/m ²	12.7766756	Mpa
2	3859	2479	11962923.93	N/m ²	11.9629239	Mpa
3	3703	2387	11479322.96	N/m ²	11.4793230	Mpa
4	4238	2496	13137826.28	N/m ²	13.1378263	Mpa
5	3662.5	2219	11353772.71	N/m ²	11.3537727	Mpa
6	3844	1714	11916423.83	N/m ²	11.9164238	Mpa
7	3294.5	2273	10212970.43	N/m ²	10.2129704	Mpa
8	3406.5	1994	10560171.12	N/m ²	10.5601711	Mpa
9	4094.5	2986	12692975.39	N/m ²	12.6929754	Mpa
10	2755.5	2736	8542067.084	N/m ²	8.5420671	Mpa
11	4183.5	2581	12968875.94	N/m ²	12.9688759	Mpa

Tabla 5.4 resultados de pruebas, probetas unidas al mismo tiempo del curado con resina

Número de probetas	Carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo			
1	2316.5	1151	7181164.362	N/m2	7.181164362	Mpa
2	2226	892	6900613.801	N/m2	6.900613801	Mpa
3	2981	1254	9241118.482	N/m2	9.241118482	Mpa
4	2613.5	1067	8101866.204	N/m2	8.101866204	Mpa
5	2643.5	1596	8194866.39	N/m2	8.19486639	Mpa
6	2557.5	1263	7928265.857	N/m2	7.928265857	Mpa
7	2538.5	1160	7869365.739	N/m2	7.869365739	Mpa
8	4242.5	2928	13151776.3	N/m2	13.1517763	Mpa
9	2705.5	1374	8387066.774	N/m2	8.387066774	Mpa
10	2681.5	1076	8312666.625	N/m2	8.312666625	Mpa
11	2634	1221	8165416.331	N/m2	8.165416331	Mpa

5.7.4 Pruebas utilizando resina mezclada con fibra de vidrio molida como adhesivo; curado por separado y juntas

En estos casos como en el anterior seguimos el mismo procedimiento lo único que varió fue el agente adhesivo que utilizamos para hacer los dos tipos de unión, en este caso fue resina mezclada con fibra de vidrio molida.

Los resultados obtenidos para las probetas separadas unidas con la mezcla se muestran en la tabla 5.5 y para las probetas unidas al mismo tiempo que el curado se muestra en la tabla 5.6

Tabla 5.5 Resultados obtenidos de las probetas separadas unidas por la mezcla de resina con fibra.

Número de probetas	Carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo			
1	3660.5	3539	11347572.7	N/m2	11.3475727	Mpa
2	4324.5	3008	13405976.81	N/m2	13.4059768	Mpa
3	4100.5	3207	12711575.42	N/m2	12.7115754	Mpa
4	2827	2759	8763717.527	N/m2	8.7637175	Mpa
5	3831.5	2533	11877673.76	N/m2	11.8776738	Mpa
6	2567.5	1261	7959265.919	N/m2	7.9592659	Mpa
7	3011.5	2046	9335668.671	N/m2	9.3356687	Mpa
8	3306.5	2424	10250170.5	N/m2	10.2501705	Mpa
9	1930.5	646	5984561.969	N/m2	5.9845620	Mpa
10	3722.5	2826	11539773.08	N/m2	11.5397731	Mpa
11	3060	1992	9486018.972	N/m2	9.4860190	Mpa

Tabla 5.5 Resultados obtenidos de las probetas unidas al mismo tiempo que el curado.

Número de probetas	Carga (N)	Deformación (μm)	Esfuerzo			
1	3441.5	1626	10668671.34	N/m2	10.6686713	Mpa
2	4309	1877	13357926.72	N/m2	13.3579267	Mpa
3	4098	2323	12703825.41	N/m2	12.7038254	Mpa
4	2831.5	1349	8777667.56	N/m2	8.7776676	Mpa
5	111.5	41	345650.69	N/m2	.3456507	Mpa
6	2294	461	7111414.22	N/m2	7.1114142	Mpa
7	2891	1667	8962117.92	N/m2	8.9621179	Mpa
8	4270	1698	13237026.47	N/m2	13.2370265	Mpa
9	3471	1548	10760121.52	N/m2	10.7601215	Mpa
10	3113	993	9650319.30	N/m2	9.6503193	Mpa
11	2998	1038	9293818.59	N/m2	9.2938186	Mpa

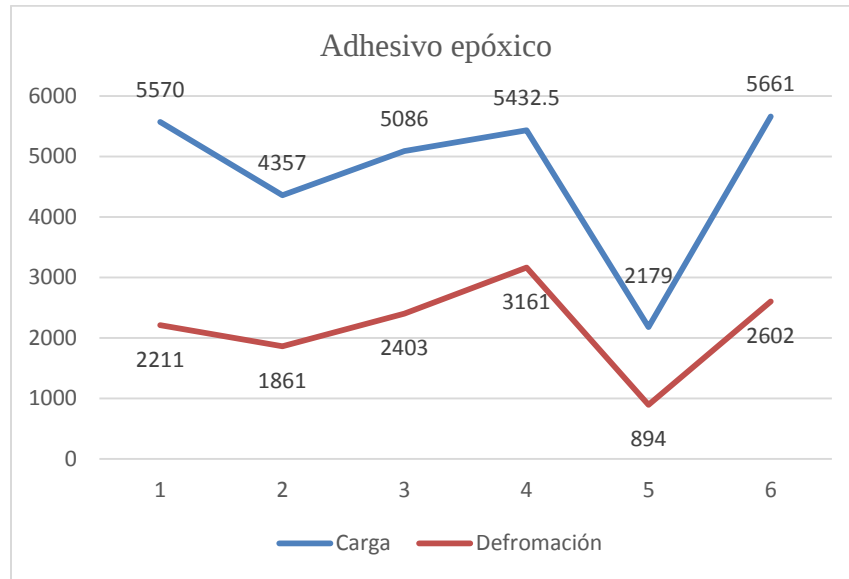
Capítulo 6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se llevó a cabo el análisis de los resultados de las diferentes pruebas que se realizaron ya que esto sirvió para ver que adhesivos tuvieron un mejor comportamiento con los tratamientos superficiales que se realizaron en los cupones de prueba.

6.1 Análisis de Resultados Obtenidos en pruebas de tensión.

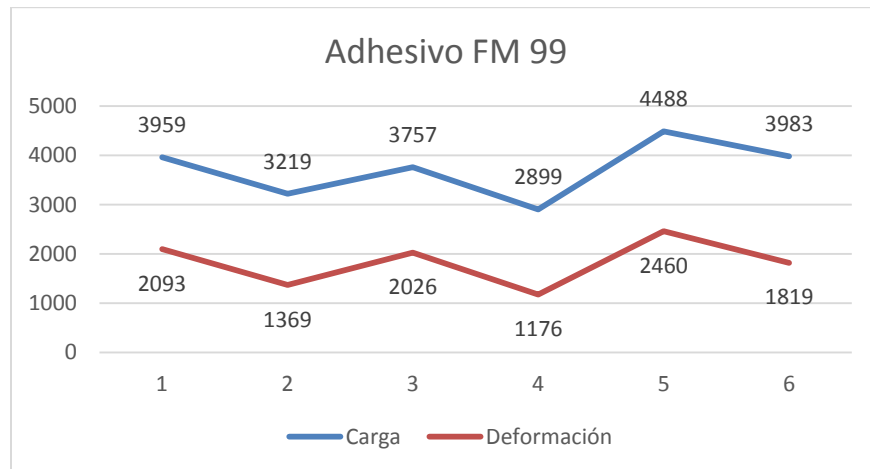
Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas del adhesivo epóxico, los FM 99, así como de lo que se utilizó, la resina y la mezcla de resina con fibra de vidrio, fueron comparados entre ellos, con los cuales se pudo observar cuál es el que tuvo un mejor desempeño de los resultados los parámetros que se tomaron, fueron carga y deformación, las siguientes gráficas 6.1 y 6.2, muestran estos resultados para cada uno de los adhesivos, las gráficas 6.3 y 6.4 para resina unidas juntas y por separado y las gráficas 6.5 y 6.6 para la mezcla de resina con fibra para probetas unidas juntas y por separado, muestran el comportamiento que tuvieron en las pruebas.

Para epóxico son:



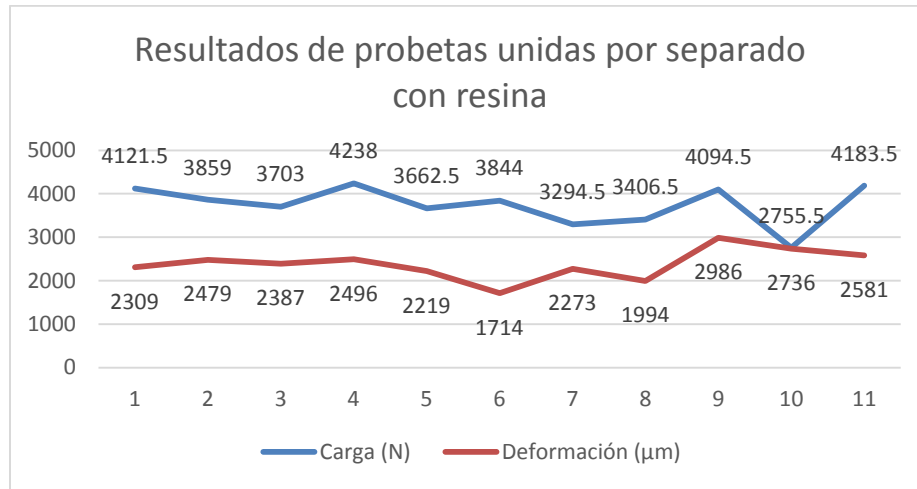
Gráfica 6.1 Resultados obtenido del adhesivo epóxico (carga y deformación)

Para el adhesivo FM 99:

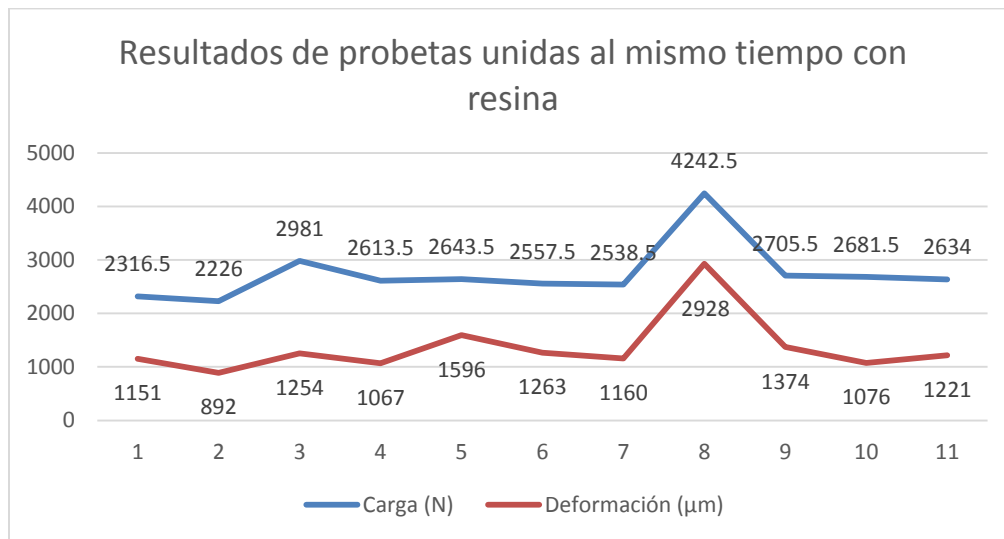


Gráfica 6.2 Resultados obtenidos del adhesivo FM 99 (carga y deformación)

Para las probetas unidas con resina:

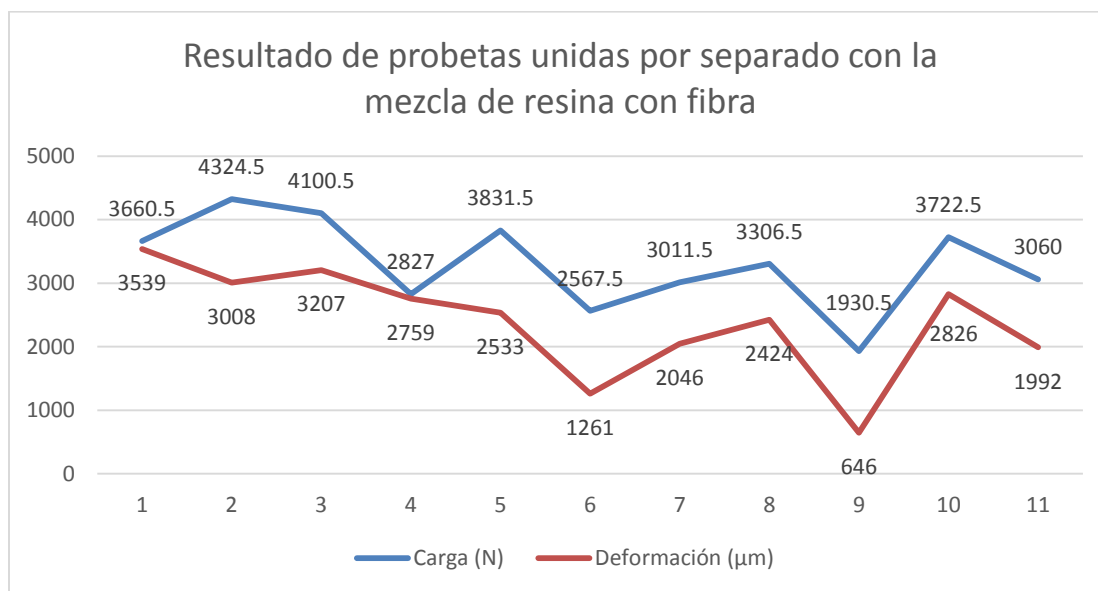


Gráfica 6.3 Resultados obtenido de la unión por separado con resina

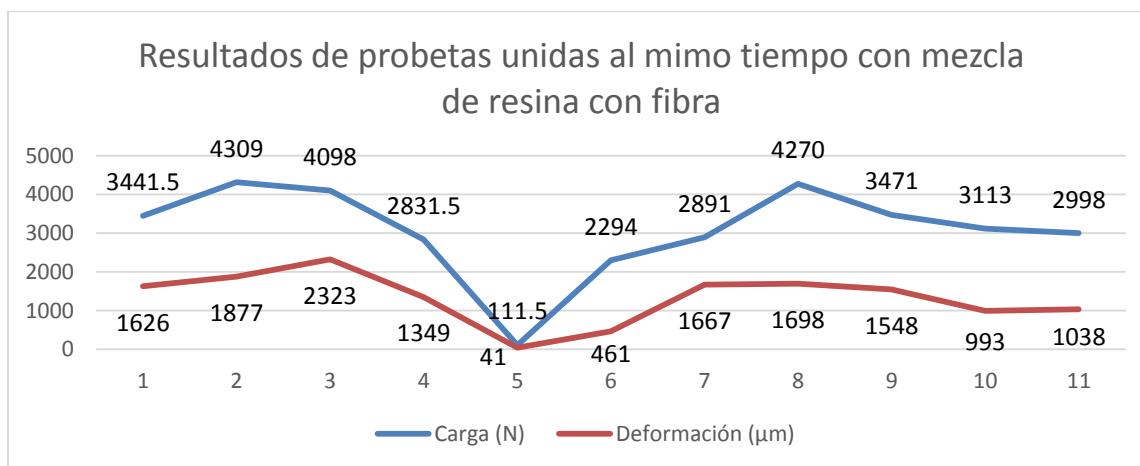


Gráfica 6.4 Resultados obtenidos de probetas unidas al mismo tiempo con resinas

Para las probetas unidas con la mezcla de resina con fibra de vidrio:



Gráfica 6.5 Resultados obtenidos de probetas unidas por separado con mezcla de resina y fibra de vidrio molida



Gráfica 6.6 Resultados obtenidos de probetas unidas al mismo tiempo con mezcla de resina con fibra

6.2 Los datos de los fabricantes para los dos adhesivos

Los datos que ofrecen los fabricantes en este caso no fueron muy generales porque estos adhesivos tienen distintas aplicaciones, a continuación se agrega información de los dos adhesivos utilizados para desarrollar las pruebas.

6.2.1 Adhesivo epóxico

Los datos que presenta el fabricante en este caso son las propiedades mecánicas típicas, además de especificar las normas con que se realizaron las pruebas para poder obtener estos resultados. A continuación se agrega dicha información en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Tabla del fabricante Fiber Glast Developments Corporation ^[21]

Propiedades mecánicas típicas	A/B	Método de prueba
Viscosidad mixta, @ 77 ° F, centipoise	Pasta lisa	ASTM D2393
Tiempo de gel, 4 onzas líquidas, @ 77 ° F	25 - 30 minutos	ASTM D2471
Tiempo de curado	a 77° F: 6 a 8 horas a 140° F: 45 a 60 Minutos	PTM&W
Resistencia a la manipulación	3 a 4 horas	PTM&W
Dureza curado, Shore D	90 Shore D	ASTM D2240
Temperatura de funcionamiento	menos 50° F a 150° F	PTM&W
Gravedad específica, gms./cc	1.51	D1475
Resistencia a la tracción, barra de colada, psi	7,200 psi	ASTM D638
Elongación a la rotura, %	6%	ASTM D639
Resistencia a la compresión, psi	14,300 psi	ASTM D695
Absorción de agua	< 0.2 %	ASTM D570
Tensión a cortante de aluminio con aluminio	a 77°F: 3,480 psi a 140° F: 2,000 psi	ASTM D1002

6.2.2 Adhesivo FM 99

Para este caso el fabricante proporciona menos información que el anterior ya que este nada más proporciona características físicas del film, así como también la fuerza que soporta al corte dicho adhesivo, a continuación se agregan dos Tablas 6.2 y 6.3, las cuales contienen dicha información del fabricante.

Tabla 6.2 Manejo de propiedades Cytec engineered materials ^[22]

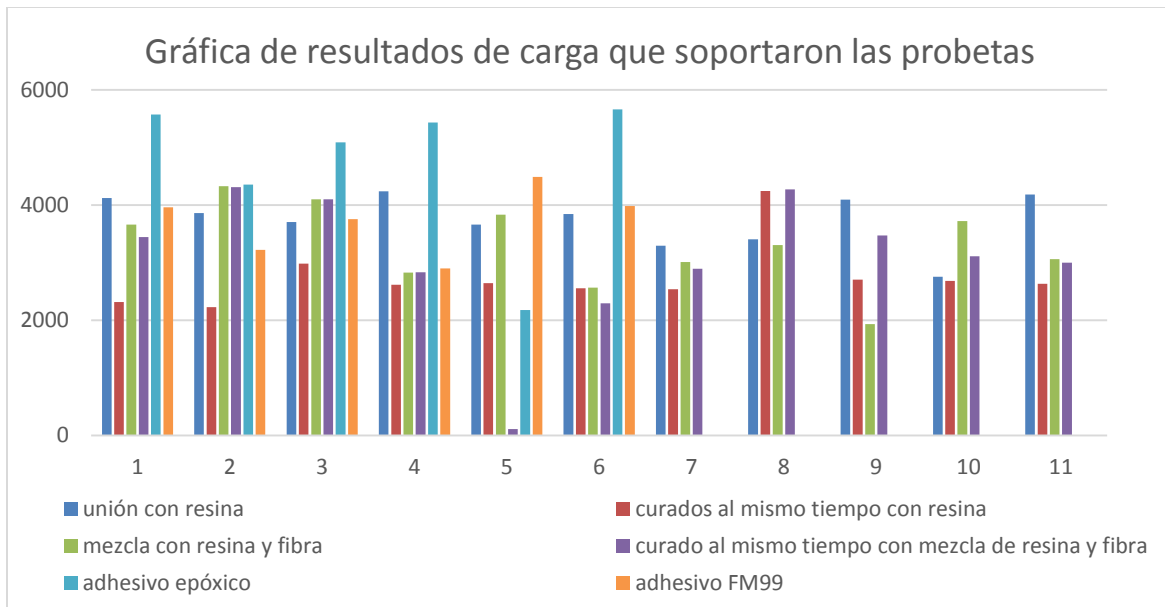
Manejo de Propiedades	
Peso	0.035 ± 0.0025 psf (175 ± 12.5 g/m ²)
Color	Marrón oscuro
Mensajero	Estera de poliéster aleatoria
Espesor nominal	0.005 inch (0.13 mm)
Período de conservación	12 meses a 0 ° F (-18 ° C)
Vida de la tienda	6 meses a 24 ° C o por debajo de 75 ° F

Tabla 6.3 Propiedades del adhesivo Cytec engineered materials ^[22]

Propiedades		
Propiedad	Ciclo de curado	
	60 min. A 250 ° F (121 ° C)	60 min. A 350 ° F (177 ° C)
Temperatura ambiente. Resistencia a la cizalladura en pastilla, psi (MPa)	2700 (18.62)	3300 (22.75)

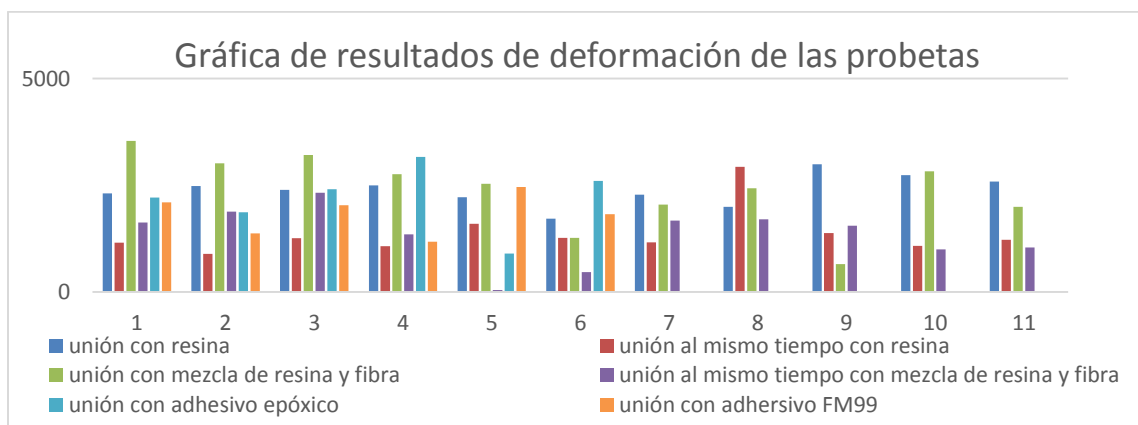
6.3 Comparación de los resultados obtenidos de los adhesivos utilizados.

En esta parte se recopiló toda la información de los resultados obtenidos en los cuales se muestra una tendencia a que el comportamiento de las probetas de adhesivo epóxico son los que presentan un mejor comportamiento, en lo respecta a que soportan más carga lo podemos ver en la Gráfica 6.7.



Gráfica 6.7 Resultados obtenidos de carga, de las probetas con los diferentes tipos de materiales adhesivos

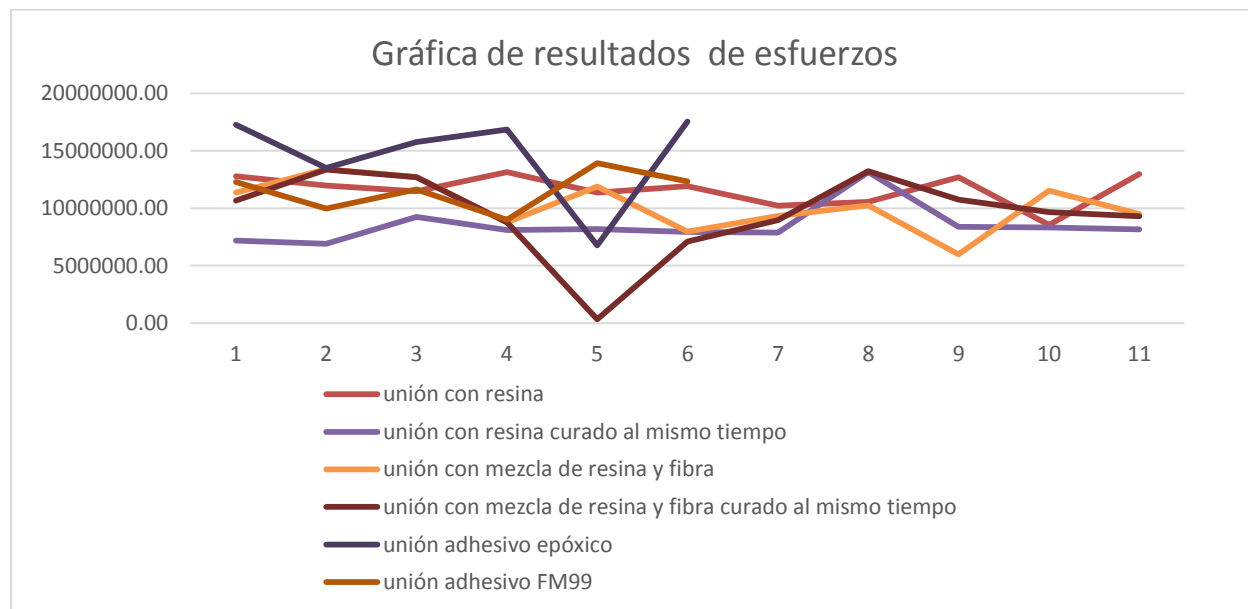
En lo que respecta a los datos de la probeta que soportó más deformación fueron las probetas de unión con mezcla de resina y fibra de vidrio molida y tuvo un comportamiento un poco similar a las probetas unidas con el adhesivo epóxico como podemos ver en la Gráfica 6.8.



Gráfica 6.8 Resultados obtenidos de deformación de las probetas con los diferentes tipos de materiales adhesivos

Capítulo 7 CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas durante esta investigación pude comprobar mi hipótesis y determinar qué proceso de fabricación es el más apropiado para los fines que se buscaban, como muestra la gráfica, el método de unión más adecuada para la realización de los laminados. Habiendo con concluido y analizado los datos obtenidos de esta investigación determinamos lo siguiente con las gráficas obtenidas vemos el comportamiento que tuvieron en las pruebas los 6 tipos de probetas Gráfica 7.1



Gráfica 7.1 Tabla que muestra los resultados de esfuerzos obtenidos de la pruebas

Se observó el comportamiento de las probetas curadas al mismo tiempo con la unión, tienen un comportamiento similar con una ligera diferencia, la de mezcla con resina y fibra con la de solo resina, a su vez las otras dos variantes de la unión fueron por separado, tienen una variación más marcada, solo resina y mezcla resina con fibra.

Además de las probetas que se realizó la unión con el adhesivo epóxico y el FM99, fueron pocas por la falta de materia, pero si es visible la tendencia que sigue la gráfica.

En base a esto y tomando en cuenta el comportamiento de la gráfica, se puede ver que las probetas que presentaron mejor rendimiento, fueron en las que se utilizó el adhesivo epóxico y con esto se validó la hipótesis ya que dichas uniones son capaces de conseguir soportar grandes esfuerzos, sobresaliendo en esta investigación las probetas unidas con adhesivo epóxico.

Capítulo 8 RECOMENDACIÓN PARA TRABAJOS FUTUROS

En base a esta investigación, también se pudiera desarrollar más investigaciones en cuanto a ciertos comportamientos o considerar más variables. Después de analizar los resultados y la experiencia obtenida con la investigación que se realizó se proponen las siguientes áreas de oportunidad.

- Realizar un análisis de elemento finito para ver el comportamiento a diferentes cargas y con diferentes arreglos.
- Realizar un análisis del tiempo de vida de la unión y el comportamiento del material compuesto en un ambiente salino.
- Realizar una comparación de entre las uniones adhesivas y las uniones mecánicas, para ver cuales tienen un mejor comportamiento.
- Realizar un análisis con diferentes orientaciones para ver el comportamiento de estas probetas y saber que arreglo tiene un mejor desempeño.

Capítulo 9 BIBLIOGRAFÍA

1. Universidad Nacional Del Santa E.Ap. Ingeniería Civil Facultad De Ingeniería Tecnología de los Materiales DAICS 2013-II.
2. Los materiales compuestos, A. Besednjak
3. Materiales compuestos (Tomos I y II), Editorial Revente, S. A., 2007
4. Materiales compuestos capítulo 10, Franco Stupenengo, 2011.
5. Materiales compuestos procesos de fabricación de embarcaciones, Alejandro Besednjak Dietrich, Edición UPC, 2005
6. Tratamiento numérico de los materiales compuestos, E. Car, S. Oller, E. Oñate, monografía CIMNE N057, Julio 2000.
7. Manufactura, ingeniería y tecnología 5ta, S. Kalpakjian- S.R. Schmid, 2008
8. <http://www.tiposde.com/ciencia/carbono/tipos-fibra-carbono.html>
9. Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales, Ricardo García Ledesma, Departamento de ingeniería y ciencia de materiales escuela técnica superior de ingenieros industriales de Madrid, Año 2013.
10. Tecnología de la adhesión, Mario Madrid, departamento técnico de loctite España.
11. Materiales compuestos 1, Antonio Miravete, editorial reverté
12. De Lollis, N.J., Adhesives, Adherends, Adhesion, Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, NY, 1985.
13. Smith, D.F. and C.V. Cagle, A quality-control system for adhesive bonding utilizing ultrasonic testing. Applied Polymer Symposia No. 3 (M.J. Bodnar, ed.), pp. 411 – 434, 1966.
14. Society of Manufacturing Engineers, Adhesives in Modern Manufacturing (E.J. Bruno, ed.), 1970.
15. Bandaruk, W., Process control considerations for adhesive bonding in production, Journal of Applied Polymer Science, 6(20): 217 – 220, March/April 1962.
16. Adhesives Technology Handbook 2nd edition, edited by Sina Ebnesajjad, William Andrew, 2008
17. Uniones adhesivas estructurales, José Miguel Martín Martínez, Universidad de Alicante, 2000
18. W.C. Wake, Adhesion des Elastomeres, Asoc. Francaise Ing. Du Caout. Plastiques, París (1970).
19. Mejora de la adhesión de poliolefinas mediante tratamiento superficial con radiación ultra violeta, Ma Dolores Landete Ruiz, universidad de alicate, 2004.
20. http://www.dirind.com/dim/monografia.php?cla_id=5
21. <http://cdn.fibreglast.com/downloads/00056-B.pdf>
22. http://www.cyttec.com/sites/default/files/datasheets/FM_99_022012.pdf
23. <http://www.intertek.com/shear-testing/d1002/>

24. <http://www.harborfreight.com/heavy-duty-variable-speed-rotary-tool-kit-31-pc-68696.html>
25. <http://www.harborfreight.com/diamond-rotary-cutting-discs-5-pc-69657.html>
26. <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/cortadora-ceramica-de-180-mm>
27. <https://www.ferrepat.com/sku/329/disco-de-diamante-austrodiam-2501-easy-cut>
28. <https://www.ecured.cu/Carburo>
29. <http://www.dupont.mx/productos-y-servicios/telas-fibras-notejidos/fibras/marcas/kevlar.html>
30. <http://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>
31. <http://www.gazechim.es/productos/resinas/resinas-vinilester.html>
32. <http://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/polietierimida-pei/>
33. Análisis de estructuras offshore sometidas a la acción del oleaje mediante ansys, Francisco Javier Cañamero Torres, Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
34. <https://s3.amazonaws.com/cdn.fibreglast.com/downloads/04142-A.pdf>
35. Materiales de última generación y materiales eficientes: Materiales compuestos – composites, Alberto Moral Borque, Marar Nogueira López, Máster oficial en proyecto de arquitectura y ciudad. ETSAG. UAH, Junio 2007.
36. Materiales compuestos, Antecedentes e ingeniería de superficies, universidad de Alcalá, París en octubre 2004.
37. Los materiales tipo y propiedades, Tecnología industrial 1, Departamento de tecnología, M^a Jesús Saiz.
38. ASTM D1002, The american society for testing and materials, 2004.
39. Fibras y materiales de refuerzo: los polímeros reforzados aplicados a la realización de piezas en 3D, Sergio García Díez, Revista iberoamericana de polímeros, Volumen, septiembre 2011.
40. Apuntes de materiales en medios marinos, Escuela superior politécnica del litoral. Facultad de ingeniería marina y ciencias del mar, Ing. Wilmo Jara Calderón, enero 2006.
41. Fabricación capítulo 11, Materiales compuestos, Escuela superior de ingenieros, Junio 2005.
42. Materiales compuestos tema 7, ciencias de materiales 4 curso, 2004/2005.
43. Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nanofibras de carbono para aplicaciones tecnológicas, Germán Morales Angüedad, Universidad Complutense de Madrid, 2008.
44. Fatiga térmica en uniones adhesivas disimilares, departamento de ciencia e ingeniería de materiales e ingeniería química, Juan Alberto Meza Manzaneque, septiembre 2015.
45. Materiales compuestos 1, Antonio Miravete, 1era edición.
46. Estudio del fallo en uniones adhesivas con materiales compuestos, Mayo 2013.
47. Medios de unión de estructuras metálicas, Alvaro Picazo Iranzo, Departamento de tecnología de la edificación, Escuela universitaria de arquitectura técnica, Abril 2007.
48. Uniones mecánicas y soldaduras en estado sólido, Julio 2013.

49. Uniones y elementos estructurales capítulo XIV, Rafael Astudillo Pastor, Junio 2011.
50. Adhesivos El reto de unir todo con todo, Javier Onoro, Dpto. ingeniería y ciencia de los materiales, Mayo 2005.
51. Experimentos y predicciones de fallas en uniones adhesivas, Luis Ernesto Mendoza Navarro, Marzo 2013.
52. Propiedades superficiales y evaluaciones de adherencia mecánica – química de laminados metal – polímero, Universidad Austral de Chile, Escuela de ingeniería mecánica, David Jonathan Pardo Cano, 2006.
53. Materiales compuestos poliméricos, ciencia y tecnología de la edificación, Ana M. Marín Palma, Abril 2018.
54. Manual técnico pegado, Plastiglas de México, noviembre 2001.
55. Introducción a las tecnologías de unión uniones adhesivas, Tecnología de fabricación, Fernando Juan Jarque, Mayo 2015.
56. Tratamientos superficiales sobre materiales de alta energía superficial, Universidad Carlos III de Madrid, Carlos Rodríguez Villanueva, Mayo 2004.
57. Influencia de las fibras de carbono y fibras de vidrio en materiales compuestos como modelo en la implementación de pisos industriales, Ingeniería mecatrónica universidad militas nueva granada, Willian Aperador, Arnoldo Delgado, Bogotá Colombia, Diciembre 2010