



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores  
CUAUTITLAN



ADHESIVOS METAL - METAL, FUNCIONAMIENTO,  
APLICACIONES Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO.

TESIS CON  
FALLA DE OXIGEN

Expediente de  
Exámenes Profesionales

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO QUIMICO  
p r e s e n t a

FLORES GAONA CLAUDIO HUGO

Director de Tesis: Q. JAIME MONDRAGON AGUILAR



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## INDICE.

### -Introducción

- Cap I      Sistemas químicos de sujeción
- Cap II     Requisitos y factores a controlar para unión adhesiva óptima
- Cap III    Durabilidad de uniones adhesivas metal-metal
- Cap IV    La resistencia de la unión
- Cap V     Investigación y desarrollo en adhesivos metal-metal
- Cap VI    Aplicaciones
- Cap VII   Conclusiones

### -Apéndice

### -Bibliografía

## CAP I. SISTEMAS QUÍMICOS DE SUJECIÓN.

### 1.1 Polímeros.

Un polímero o macromolécula es una molécula grande, construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples. En algunos casos la repetición es lineal, en otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas para formar redes tridimensionales. La unidad repetida en el polímero es a menudo equivalente, o casi equivalente, al monómero o material inicial del cual el polímero es formado.

Estas macromoléculas están compuestas por cientos o miles de átomos unidos entre sí, por lo cual presentan pesos moleculares bastante grandes. Los polímeros útiles para plásticos, hules, fibras y adhesivos tienen pesos moleculares que varían entre  $10^3$  y  $10^6$ .

Los tipos más simples de polímeros son los formados por una sola clase de monómeros y son llamados homopolímeros. Las macromoléculas pueden existir como copolímeros, los cuales consisten en una cadena hecha de dos o más unidades químicamente diferentes unidas en una secuencia más o menos regular. (1)

La formación de un polímero a partir de monómeros es tradicionalmente dividida en dos amplias clases de reacciones:

- a) polimerizaciones en cadena (adición)
- b) polimerizaciones por pasos (condensación)

La distinción entre estos dos procesos es que exhiben cinéticas de reacción bastante disímiles, lo cual conduce a diferentes distribuciones de especies como una función de la extensión de la reacción y dependiendo del mecanismo detallado, a diferentes distribuciones de peso molecular del polímero formado.

a) polimerización en cadena.

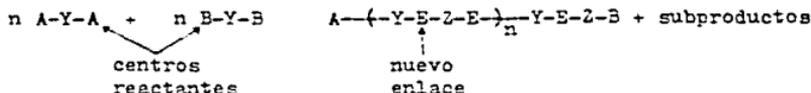
Las polimerizaciones por adición se realizan vía una reacción en cadena, la cual es una reacción molecular autosustentante, mantenida por el hecho de que el producto de una etapa inicia un paso de reacción posterior, el cual otra vez regenera más producto capaz de causar reacciones posteriores. La polimerización involucra un gran número de eventos idénticos y sucesivos iniciados por algún mecanismo impulsor el cual conduce a la producción de moléculas encadenadas. Una reacción de polimerización por adición tiene tres etapas de reacción claramente definidas:

- 1) iniciación de la reacción.
- 2) propagación y crecimiento de la cadena.
- 3) terminación del crecimiento de la cadena.

La reacción clásica de crecimiento por cadena procede vía combinaciones monómero-macromolécula. Algunos de los monómeros que se unen siguiendo este mecanismo de polimerización incluyen, isobuteno, cloruro de vinilo, estireno, tetrafluoroetileno etc. y en general entidades que presentan dobles enlaces en su estructura.

b) polimerización por pasos.

Las polimerizaciones de crecimiento por pasos proceden vía una sucesión "paso a paso" de reacciones elementales entre sitios reactivos, los cuales son usualmente grupos funcionales, pero pueden ser también iones complejos o aún radicales libres. Cada paso independiente causa la desaparición de dos centros reactantes y crea un nuevo enlace entre un par de moléculas, para obtener un alto polímero, los reactantes deben ser al menos difuncionales.



El proceso de polimerización tiene a través de su curso las características de una combinación estadística de fragmentos. La formación de dímeros será predominante en las primeras etapas del proceso, trímeros, tetrazeros etc. serán preferentemente producidos en etapas subsecuentes. La distribución de peso molecular seguirá este esquema aleatorio, a menos que sufra cambios marcados la reactividad de los monómeros, dímeros, trímeros etc.

La polimerización por pasos puede proceder reversiblemente (poliesterificación de glicoles diácidos, poliamidación de diácidos y diaminas) o irreversiblemente (poliesterificación de cloruros de diácido y dioles). Las polimerizaciones por pasos son invariablemente disminuidas por viscosidades más altas que las del medio de reacción, lo cual limita el movimiento libre de los centros activos; arriba de ciertos valores críticos, las cinéticas

generales son gobernadas y descritas por parámetros reológicos. Esto es siempre el caso para polimerización por pasos realizada en masa o en soluciones concentradas, como sucede en los sistemas adhesivos para metal-metal, en donde casi siempre la polimerización se efectúa en ausencia de solventes.

La polimerización por pasos basada en monómeros o en mezclas de monómeros con funcionalidad mayor a dos, comúnmente conducen a ramificación, gelación o aún entrecruzamiento completo; cuando estas polimerizaciones multifuncionales son controladas, se pueden sintetizar muchas resinas (urea, melamina, fenol-formaldehído, epoxi) o polímeros (poliuretanos, ureas, siloxanos) los cuales son totalmente entrecruzados vía reacciones posteriores durante el moldeo por inyección, vaciado, revestido o plan de cura como para los sistemas adhesivos.

Finalmente, la preparación de redes poliméricas de alto peso molecular puede realizarse por una combinación de los dos mecanismos anteriores, como sucede en las redes poliméricas complejas constituidas por dos o hasta tres monómeros. (5)

#### 1.1.1 Técnicas de polimerización.

Los polímeros pueden ser producidos por medio de diferentes técnicas de polimerización. La técnica de polimerización más importante es la polimerización en emulsión, pero la polimerización en masa y suspensión son también técnicas ampliamente usadas para la producción de polímeros. Que técnica de polimerización debe ser usada depende principalmente del propósito deseado del polímero que está siendo producido. Las principales ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de polimerización son resumidas en el siguiente cuadro.

polimerización en:	Ventajas	Desventajas	Polímeros técnicos
<p><u>Masa</u></p> <p>(polimerización en ausencia de cualquier solvente inerte o medio de dispersión)</p>	<p>Alto funcionamiento del reactor; bajos costos de separación; alta pureza del producto; no hay reacciones de transferencia hacia solventes o aditivos</p>	<p>Alta viscosidad con problemas de eliminación de calor y mezclado; problema de bombeo; ensuciamiento de la pared del reactor por formación de película</p>	<p>LDPE, LLDPE, PVC, PS, HIPS, PMMA, PA, polyester</p>
<p><u>Suspensión</u></p> <p>(polimerización de gotitas de monómero dispersas en una fase inerte con un iniciador del monómero soluble o precipitación del polímero a partir de una solución de monómero polimerizando)</p>	<p>Baja viscosidad de la dispersión; buena transferencia de calor; bajos costos de separación comparados con los de emulsión.</p>	<p>Capacidad del reactor más pequeña que para masa; solamente operación discontinua; problemas con el agua de desecho; ensuciamiento de la pared del reactor por formación de película</p>	<p>Tipo-espuma: PS, PMMA, SAN, Tipo-no espumable: PVC, PTFE, PAN, HIPS. Proceso-suspensión: HDPE, PP</p>
<p><u>Emulsión</u></p> <p>(formación de pequeñas partículas de polímero vía nucleación micelar u homogénea en un sistema disperso de gotitas de monómero en una fase inerte con iniciador disuelto)</p>	<p>Baja viscosidad de la dispersión comparada con la de masa; buena transferencia de calor; alta velocidad de polimerización y altos pesos moleculares; aplicación directa del latex</p>	<p>Altos costos de separación en caso de aislamiento del polímero; problemas con el agua de desecho; ensuciamiento del muro del reactor por formación de película; emulsificador como impureza del producto polimérico</p>	<p>PVC, ABS, PVA, PMMA, SAN, PTFE, SBR, CR, NBR</p>
<p><u>Solución</u></p> <p>(polimerización de monómeros disueltos en un solvente inerte)</p>	<p>Viscosidad más baja que en masa con mejor transferencia de calor y mezclado; aplicación directa de la solución; menor ensuciamiento de la pared del reactor que en masa</p>	<p>Capacidad del reactor más pequeña que para masa; altos costos de separación en caso de aislamiento del polímero, a menudo solventes tóxicos e inflamables; reacciones de transferencia a el solvente y bajos pesos moleculares</p>	<p>SBR, PVA, PAN, PS, PVAL, BR, IR, EPDM</p>

Abreviaciones

LDPE=polietileno baja densidad  
 LLDPE=polietileno de baja densidad lineal  
 PVC=policloruro de vinilo  
 PS=poliestireno

PA=poliamida  
 PP=polipropileno  
 PMMA=polimetil-metacrilato  
 CR=policloropreno

HIPS=poliestireno alto impacto  
 SAN=estireno-acrilonitrilo  
 PAN=poliacrilonitrilo  
 PTFE=politetrafluoroetileno  
 ABS=acrilonitrilo-butadieno-estireno

SBR=hule estireno-butadieno  
 NBR=hule nitrilo-butadieno  
 IR=poliisopreno  
 EPDM=monómero etileno-propileno  
 PVAL=polivinil-alcohol

## 1.2 Generalidades sobre adhesivos.

Cuando es necesario considerar un método de sujeción para unir dos piezas de metal es común, en nueve de diez casos, pensar primeramente en términos de algún sistema mecánico de sujeción.

Aunque por muchos años se han usado los sistemas químicos de sujeción y están incrementando su uso a través de toda la industria en situaciones de sujeción como, retención de tubos y bridas a escala, uniones estructurales de partes metálicas concéntricas etc, muchos ingenieros aún están renuentes a darles su debida consideración. (6)

Un adhesivo es definido como una substancia capaz de mantener juntas dos superficies por medio de vínculo o unión superficial, esto es, una substancia que interpuesta entre dos superficies de la misma o distinta naturaleza las une estrechamente de tal manera que la unión resulta igual o a veces superior a la obtenida por soldadura o por remaches.

Se trata de un material polimérico el cual, al menos inicialmente, debe ser un líquido o semi-sólido pegagoso y puede ser usado en una capa delgada que es capaz de transmitir esfuerzos entre dos substratos. (5)

Los adhesivos usan una fuerza básica en la naturaleza para mantener dos superficies unidas, la fuerza de atracción entre moléculas. Esta fuerza variará dependiendo de la estructura, el tipo de molécula individual y la distancia entre ellas. Se pueden seleccionar ciertas características de configuración atómica y electrónica dentro de la molécula adhesiva para dar máxima fuerza atractiva y por tanto una liga más resistente con las moléculas de la superficie a unir. (6)

Ya que el principio fundamental detrás del fenómeno de la adhesión es el hecho de que los átomos y las moléculas se atraen unos a los otros si son llevados lo suficientemente cerca, la humectación de la superficie del sustrato por el adhesivo es un requisito para este contacto estrecho. El adhesivo debe comportarse como un fluido antes de que fije y llegue a convertirse en un sólido duro. Este requerimiento puede ser satisfecho en varias formas:

- a) el adhesivo sólido es formado de su solución o dispersión por evaporación del solvente, latex o cemento.
- b) el adhesivo pasa a través de una transición líquido-sólido (adhesivos fusibles en caliente)
- c) el adhesivo es producido a partir de un líquido precursor reactivo "in situ" (sistemas reactivos termofijos).<sup>(5)</sup>

Los componentes de un sistema adhesivo son determinados por la necesidad de satisfacer ciertas propiedades de fabricación del adhesivo o propiedades requeridas en la junta final. El componente básico es la sustancia ligante, la cual suministra la fuerza adhesiva y cohesiva de la junta, puede ser una resina orgánica o un hule, un compuesto inorgánico o un producto natural.

### 1.3 Resinas sintéticas para unión metal-metal.

Los sistemas adhesivos para la unión metal-metal están basados en su gran mayoría en una resina termofija sola o combinada con otros monómeros sintéticos (termoplásticos, hules etc.). Estas composiciones, las cuales son usadas predominantemente como adhesivos estructurales, fijan por la formación de una unión química ya sea a temperatura ambiente o elevada.

Los adhesivos termofijos también conocidos como adhesivos reactivos son suministrados en forma de sistemas de un componente o de dos componentes y están generalmente disponibles como líquidos sin solvente, pastas o películas. Los sistemas simples comúnmente contienen un catalizador latente y fijan por la aplicación de calor, presión, radiación o en casos especiales por contacto con la humedad. Los adhesivos curables por radiación han ganado mucha atención. Los sistemas simples generalmente tienen una vida útil limitada. (5)

Los sistemas de dos componentes tienen una vida útil más larga, pero los materiales reactivos deben ser medidos y mezclados en equipos apropiados inmediatamente antes de la aplicación. Una vez mezclados los adhesivos tienen un tiempo de manejo limitado.

Los sistemas adhesivos híbridos (combinación de resinas), fueron desarrollados para satisfacer procesamiento especial y criterios de funcionamiento. Hay innumerables adhesivos en los cuales hules y resinas son mezclados para obtener combinaciones de las propiedades deseadas de ambos tipos de material. (3)

Existen una gran cantidad de materiales iniciales reactivos de diferente estructura química disponibles para formulaciones en cualquiera de las clases generales de adhesivos termofijos.

#### 1.4 Ventajas y desventajas de las uniones adhesivas.

Asumiendo que podemos convencer al ingeniero escéptico que las uniones adhesivas pueden trabajar bastante bien para ser confiables, ¿que ofrecen ellas sobre otros métodos de unión tales como remachado, soldadura etc.?

##### Ventajas.

-Los adhesivos permiten que los esfuerzos sean distribuidos sobre áreas más amplias, haciendo posibles ensamblés más ligeros que los que pueden ser logrados con sujeciones mecánicas. La concentración local de esfuerzos presente en soldadura por puntos, remachado o juntas atornilladas (pernos), es evitada en materiales unidos con adhesivos y las fracturas por fatiga son propagadas más lentamente.

-Las juntas pueden ser diseñadas para sacar ventaja del efecto endurecedor de la unión. El remachado y la soldadura por puntos retienen las superficies juntas solo en puntos localizados, mientras que los adhesivos forman una unión continua a lo largo de toda la superficie. Las estructuras unidas son, por lo tanto, más firmes y la carga puede ser incrementada entre un 30 y un 100% antes de que el pandeo ocurra.

-La necesidad de perforaciones (hoyos) fijas, como en el remachado no aparece cuando los adhesivos son usados. Estos hoyos pueden conducir al debilitamiento de la sección transversal del material. (2)

-La unión es a menudo más rápida y más barata que la soldadura y el atornillado, puede ser realizada a temperatura ambiente o a relativamente bajas temperaturas, lo cual evita el efecto del calor (altas temperaturas) sobre las estructuras que van a ser ensambladas.

-Los adhesivos suministran juntas herméticas, a prueba de aire, impermeables a la humedad, altamente resistentes a la corrosión y al ataque químico y una buena resistencia eléctrica. Se pueden hacer eléctricamente conductoras. (2)

-En el caso de la unión de metales disímiles, ya que tienen la desventaja de corrosión electrolítica y dificultad de soldadura, la corrosión es reducida previniendo el contacto directo metal-metal. (10)

-Se pueden adoptar a menudo diseños simplificados y técnicas de construcción. Habilidad para unir una gran variedad de materiales de diferente módulo y espesor. Por ejemplo hojas metálicas delgadas pueden ser unidas sin causar deformaciones como en otros métodos de unión.

-Fabricación de formas complejas donde otros métodos de unión no son factibles.

-Apariencia del producto terminada mejorada por contornos y superficies externas de unión uniformes (lisas); eliminando huecos y sujetadores protuberantes como ramaches, tornillos etc.

-La versatilidad de formas adhesivas y métodos de aplicación permite su adaptación a muchos procesos de producción; ensambles económicos y rápidos con la posibilidad de reemplazar varias sujeciones mecánicas por una unión simple.

-En muchas aplicaciones se pueden obtener ahorros substanciales debido a un costo de procesamiento más bajo. Sin embargo, la comparación de costos de uniones adhesivas con otros métodos de sujeción, está basada en muchos factores interrelacionados, incluyendo el costo del adhesivo, costo de equipo de proceso, costo de mano de obra y otros factores que hacen imposible generalizar el costo relativo actual de los diferentes métodos. (1)

### Desventajas.

Hay por supuesto, limitaciones para el uso de las uniones adhesivas metal-metal.

-Las superficies que van a ser unidas deben ser cuidadosamente preparadas.

-El adhesivo debe ser manejado con cuidado, mezclado exactamente y normalmente aplicado antes de que el material compuesto haya gelado (se endurezca).

-La cura de los adhesivos puede llevar un largo tiempo u ocurrir a un máximo de temperatura permisible, y la junta resultante puede ser sensitiva a temperaturas altas de servicio. (2)

-No todos los adhesivos, pero sí algunos, necesitan ser presionados con guías, para garantizar un íntimo contacto de los adherentes al tiempo que el adhesivo solidifica.

-Generalmente, las resistencias relativas en uniones adhesivas son poco más direccionales que con sujeción mecánica. Algunos adhesivos presentan buena resistencia al corte y a la tensión, pero una baja resistencia a la división y al desprendimiento. (1)

-La óptima resistencia de la unión, en general, no se obtiene instantáneamente, como con la soldadura.

-A menudo resulta difícil realizar una adecuada inspección de la unión adhesiva.

-Dificultad en el desmantelamiento de estructuras para reparación.

-Peligros en el ensamble como fuego y toxicidad, característica de muchos adhesivos basados en solventes.

-Se requiere un diseño cuidadoso de la junta para minimizar los esfuerzos al desprendimiento, a la división y aquellos debidos a la expansión térmica diferencial. (3)

Algunos ensambles son unidos por métodos convencionales más económicamente, especialmente cuando se dispone del equipo de proceso. (4)

En la figura 1 se muestran los tipos de adhesivos recomendados para la unión de diversos materiales. (1)

En la figura 2 se muestran los resultados de ensayos a diversos adhesivos estructurales. (20)

SELECCION DE ADHESIVOS PARA USO CON VARIOS SUSTRATOS

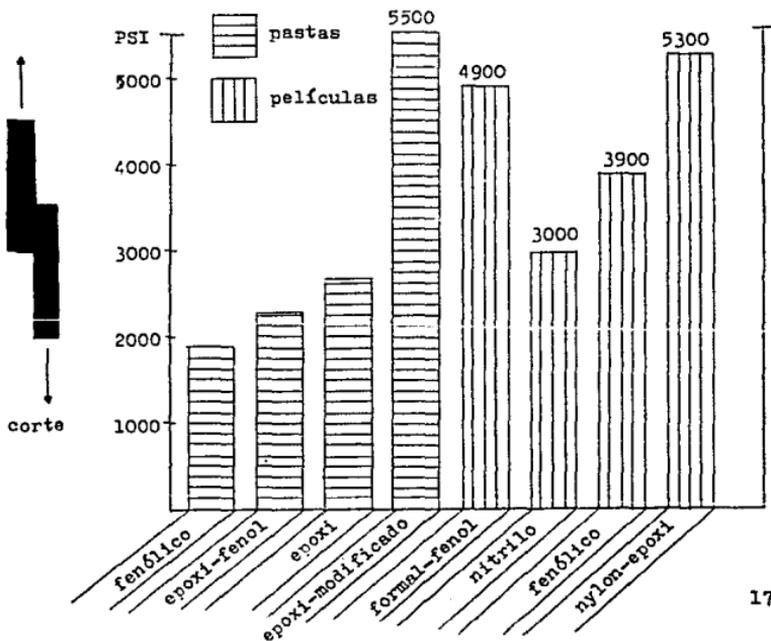
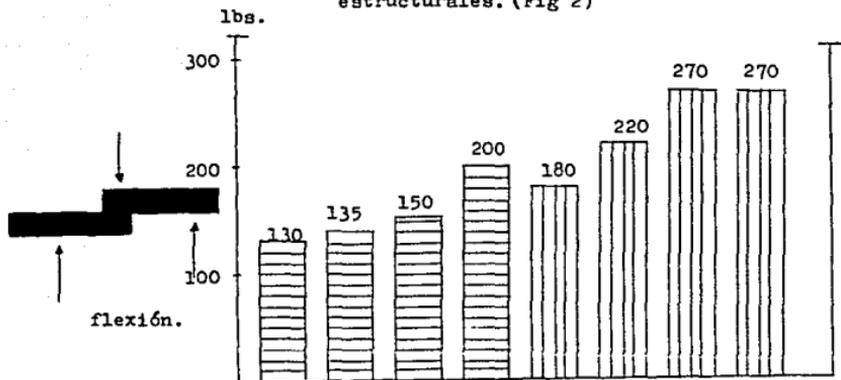
	piel	papel	madera	fieltro	tela	plásticos vinílicos	plásticos fenólicos	hule	teja-esquelejo	vidrio	metales
metales	1, 4, 21, 24, 25	1, 21, 22	1, 4, 11, 13, 21, 31 32, 33, 34 36	1, 5, 22 21, 27	1, 21, 27, 24	25, 36	1, 13, 21, 31 32, 33, 35, 36	13, 21, 32, 33 35, 36	5, 6, 13, 22, 35, 36	13, 22, 33 34, 35	11, 13, 31 32, 33, 36
vidrio, cerámica	1, 4, 13, 24	1, 21, 22	1, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	1, 5, 6, 21, 27	1, 21, 27, 24	25, 36	1, 13, 21, 31, 35, 36	21, 22, 31, 35 36	4, 22	4, 13, 32, 35, 36	
teja-org lejo	1, 4, 21, 24	1, 21, 22	1, 5, 6, 21 22	5, 6, 21 22	5, 6, 21 27, 24	25, 36	1, 13, 36	21, 22, 31, 35 36	4, 5, 6, 22		
hule	21, 24	21, 22	21, 22, 33 35, 36	21, 22	21, 22, 23	25, 36	21, 22, 36	21, 22, 31, 35, 36			
plásticos fenólicos	21, 24 25	21, 22	11, 13, 21, 24, 22, 33 35	21, 22, 25, 36	21, 22, 24, 25	36	13, 32, 33 36				
plásticos vinílicos	21	21	21	21	21	25, 36					
tela	21, 22, 23, 24	21, 22, 23	21, 22, 33 23	5, 21, 22 23	1, 21, 27 23						
fieltro	21, 22, 23, 24	21, 22, 25	21, 22, 23	5, 22							
madera	21, 22, 23, 24	2, 21, 22	1, 11, 13, 14, 15, 36								
papel	21, 22, 23, 24	2, 4, 21									
piel	1, 4, 21, 22, 23, 24										

NUMERO CODIGO DEL ADHESIVO

termoplástico	termofijo	elastomérico	combinación de resinas
1. polivinil acetato	11. fenol-formaldehído	21. hule natural	31. fenol-vinil
2. polivinil alcohol	12. resorcinol, fenol-resor cinol-formaldehído	22. hule reprocesado	32. fenol-polivinilnatural
3. poliacril. acrílicos	13. resinas epoxi	23. hule butadieno-estireno	33. fenol-polivinilformal
4. extracto de celulosa	14. urea-formaldehído	24. neopreno	34. fenol-nylon
5. asfalto	15. urea-formaldehído	25. hule nitrílico	35. fenol-neopreno
6. oleoresina	16. urea-formaldehído	26. salicida	36. fenol-butadieno-acral nitrilo
	16. resina alquídica		

Figura 1

Resultado de ensayos a diversos adhesivos estructurales. (Fig 2)



## CAP. II REQUISITOS Y FACTORES A CONTROLAR PARA UNIÓN ADHESIVA ÓPTIMA.

A continuación explicaremos cuales son los requerimientos para obtener una unión adhesiva resistente y durable. La observancia y cumplimiento de estas necesidades es importante para que las uniones adhesivas trabajen en forma satisfactoria.

Para realizar una unión adhesiva eficiente es necesario considerar los requerimientos siguientes:

- 1) selección adecuada del adhesivo
- 2) el tratamiento superficial
- 3) el diseño y geometría de la junta
- 4) control de las variables de procesamiento.

Cada una de estas demandas son interdependientes. El uso de un tratamiento superficial óptimo es de poco valor si se utiliza un adhesivo no adecuado, si la unión no es correctamente procesada o si la geometría de la unión involucra esfuerzos al desprendimiento o a la división. <sup>(4)</sup>

### 2.1 Selección adecuada del adhesivo.

Muchos factores necesitan ser considerados en la elección de un adhesivo para una aplicación particular y condiciones de servicio específicas. Ya que el adhesivo universal no existe, a menudo es necesario hacer un compromiso teniendo en mente las propiedades deseadas del adhesivo, decidir cuales son los requerimientos más importantes y cuales los menos en cada aplicación. Los principales factores evaluados son: los materiales que van a ser unidos, la resistencia y permanencia deseada, las necesidades de ensamble y las consideraciones de costo. <sup>(3)</sup>

El funcionamiento del adhesivo es siempre dependiente del ambiente (condiciones de servicio) y esto influye grandemente en la selección del adhesivo (ver tabla de recomendaciones).

#### 1) Requerimientos del ensamble unido.

El tipo de ensamble bajo consideración para la unión es frecuentemente un factor determinante en la selección del adhesivo. Los ensambles pueden ser productos desarrollados, prototipos o unidades de producción en masa.

Los artículos de producción en serie requieren que el adhesivo sea de una forma particular el cual, pueda ser manejado por equipo de procesamiento diseñado para ensamble rápido (por ejem. el equipo de laminado es usado junto con revestidores de adhesivos líquidos o adhesivos sólidos en películas). Las unidades ensambladas a mano tales como juguetes, cámaras e instrumentos muchas veces emplean adhesivos en formas físicas no adecuadas para la producción en masa. El ensamble de partes pequeñas y delicadas es dependiente de la habilidad humana y la producción relativamente baja hace posible considerar un amplio rango de adhesivos.

Los adhesivos pueden ser requeridos para actuar como sellos contra gases, humedad y solventes o como aislantes térmicos y eléctricos. La resistencia contra la corrosión de juntas metálicas, vibración y fatiga son necesidades adicionales que pueden ser requeridas en el ensamble adhesivo. (3)

#### 2) Materiales a ser unidos.

Las propiedades físicas y mecánicas de los adherentes y el grado de preparación de la superficie, requerido antes de la unión, son factores importantes a considerar en la selección del adhesivo.

El espesor y resistencia de los adherentes son importantes, particularmente cuando las constantes elásticas del adhesivo son relevantes para el diseño. Materiales flexibles como hules, metales delgados y laminillas de plástico (los cuales están sujetos a flexión en el servicio) no deben ser unidos con un adhesivo rígido quebradizo; una unión rígida puede fracturarse y causar una reducción en la resistencia de la unión.

La forma de los componentes a menudo favorece el uso de una forma particular de adhesivo para una unión efectiva. La unión de estructuras panel (alveolares) de Al a hojas de metal planas es realizada mejor con una película adhesiva termofija (soportada con interlíneas de fibra de vidrio) y "primers" adhesivos líquidos. Por otro lado, es más conveniente usar un adhesivo en forma de pasta para la construcción de intercambiadores de calor formados a partir de tubos de Al y aletas espirales de Cu. (3)

### 3) Compatibilidad de adherentes y adhesivos.

La selección de un adhesivo puede conducir a deterioración del ensamble cuando el adherente y el adhesivo, o uno de sus componentes, son incompatibles; por ejemplo:

- La corrosión de partes metálicas por adhesivos ácidos.
- La migración de plastificantes desde un material plástico flexible hacia el adhesivo con la consecuente pérdida de adhesión en la interfase.

La corrosión potencial de algunos adhesivos es muchas veces aumentada por el mal control del proceso de mezclado y de las condiciones de cura. Los componentes electrónicos y los circuitos impresos requieren adhesivos que no corroan conductores de Cu y otras partes en el almacenado y bajo condiciones de servicio. (3)

#### 4) Esfuerzos en la unión.

Las propiedades de resistencia cohesiva en adhesivos varían ampliamente, desde materiales blandos pegajosos, hasta sustancias fuertes rígidas con resistencias que exceden a millones de Newtons por metro cuadrado. El diseño de la junta determina el tipo y el grado de esfuerzos a los cuales el adhesivo estará sujeto. La mayoría de los adhesivos muestran propiedades de resistencia óptima en compresión o tensión. Otros tienen bajas resistencias al desprendimiento pero alta resistencia al corte o viceversa. Incrementando el área de unión suficientemente, es posible lograr la resistencia de la unión requerida, aún con adhesivos de baja resistencia; cuando no es posible diseñar grandes áreas de unión es necesario el uso de adhesivos de alta resistencia.

Las condiciones bajo las cuales los esfuerzos serán aplicados deben ser especificadas. Las cargas en la unión pueden ser sostenidas, intermitentes o vibratorias y no todos los adhesivos funcionan igualmente bien para todas estas circunstancias. Los adhesivos que forman uniones rígidas y frágiles pueden fallar bajo condiciones vibratorias; otros tipos están sujetos a deslizamiento y son inadecuados para cargas continuas, no obstante que pueden soportar cargas intermitentes.

#### 5) Requerimientos de procesamiento.

Las condiciones bajo las cuales el adhesivo va a ser unido, son también un criterio importante para la selección del adhesivo correcto. Ciertas situaciones de ensamble pueden restringir la elección para un producto que será unido en la línea de producción. A menudo puede ser que las propiedades de trabajo del adhesivo sean los factores de mayor interés para el usuario. (3)

Los factores típicos que están involucrados en el ensamble incluyen: forma del adhesivo, método de preparación y uso, vida de trabajo, método o maquinaria necesaria para la unión y variables de procesamiento; estas últimas incluyen el tiempo permitido entre la aplicación y la unión, temperatura requerida para la aplicación y cura, presión de unión y tiempo de aplicación y propiedades tales como el olor, inflamabilidad y toxicidad del adhesivo.

Para algunos ensambles, la temperatura de cura influye en la selección del adhesivo. Muchos adhesivos termofijos requieren calor y presión para formar la unión de modo que si estas condiciones de procesamiento no pueden ser satisfechas deberá emplearse un adhesivo que fije en frío.

#### 6) Condiciones de servicio.

El adhesivo seleccionado para un ensamble particular debe sostener las partes componentes unidas durante la vida esperada de servicio y mantener su resistencia bajo las condiciones de servicio encontradas. Un factor importante a ser considerado es el rango de temperatura en el cual el adhesivo será usado. Arriba de 70°C se pueden emplear varios tipos de adhesivos termofijos y termoplásticos, pero a 120°C solo poco termoplásticos (hules de silicón) soportarán exposiciones intermitentes a bajos esfuerzos, mientras que la mayoría de los adhesivos termofijos funcionarán satisfactoriamente bajo exposición continua. Arriba de 120°C solo los adhesivos termofijos más resistentes como los fenol-nitrilo y los epoxi-fenol funcionarán adecuadamente. Las bajas temperaturas causan fragilidad y esfuerzos internos en muchos adhesivos, así que la falla prematura cohesiva no es común debajo de 50°C. (3)

Aparte de la temperatura, otras condiciones pueden afectar la resistencia y durabilidad de un adhesivo. Agentes químicos, fluidos hidráulicos, atmósferas químicas etc.

Las tabulaciones de propiedades están sujetas a limitaciones y cuando diseños particulares son importantes no es deseable seleccionar los adhesivos únicamente sobre la base de aplicaciones anteriores similares. Se debe apreciar, que dentro de una clase química dada hay amplias variaciones de propiedades; los adhesivos son constantemente reformulados, modificados y desarrollados nuevos sistemas. Por tanto, cuando sea posible, la selección del adhesivo debe ser hecha con la ayuda de fabricantes o especialistas quienes son expertos en la tecnología de adhesivos. (3)

#### LISTA DE FACTORES PARA LA SELECCIÓN DEL ADHESIVO.

##### 1) Requerimientos de ensamble.

Unión, sellado, relleno, encapsulación y refuerzo de la junta relacionado al trabajo por desarrollar, producción en masa, reparación y mantenimiento.

##### 2) Superficies.

Detalles de materiales a ser unidos, nombre comercial o especificación, acabados y materiales base, formas físicas, aleaciones etc.

##### 3) Forma del adhesivo.

Solvente base a base de agua o solventes orgánicos. Masillas, líquidos 100% reactivos, película, polvo o pasta, en 1 o 2 partes.

##### 4) Método de aplicación.

Manual o automático; con cepillo, paletas, extrusores, rocío, revestimiento por rolado, inmersión etc.

5) Requerimientos de procesamiento.

Viscosidad, tiempo de pegado, tiempo y temperatura de cura, tiempos de manejo, presión de unión, pretratamiento de los substratos, condiciones preferidas y limitaciones del equipo de procesamiento y procesos después del ensamble (limpieza, pintado etc.)

6) Características de diseño.

Tipo de junta (a traslape, a tope etc.), área de unión y número de ensambles.

7) Requerimientos mecánicos.

Resistencia de la unión; temporánea, moderada, baja o estructural.

8) Carga en la unión.

Sostenida, intermitente, cargas cíclicas, dirección de la carga, desprendimiento (N/mm), corte, compresión, tensión o división (MPa)

9) Condiciones de servicio.

Condiciones continuas, intermitentes o cíclicas de exposición al calor, frío, rango de temperatura y presión, clima, humedad, agua (caliente o fría), químicos, luz del sol, radiación, solventes y vapores.

10) Otras consideraciones

Costo, vida del adhesivo, toxicidad, inflamabilidad, olor, color, propiedades de corrosión, térmicas, eléctricas y químicas; propiedades ópticas etc.

11) Especificaciones.

Gubernamentales u otras.

12) Uso presente del adhesivo.

Limitaciones y cantidades usadas. (3)

## 2.2 Preparación de la superficie.

Ya que la unión adhesiva es un fenómeno superficial, la preparación de la superficie antes de la unión adhesiva es la clave para una unión satisfactoria. La preparación de la superficie o pretratamiento superficial, como es algunas veces llamado, es realizada para proveer superficies adherentes receptoras para el desarrollo de juntas adhesivas fuertes y durables. (4)

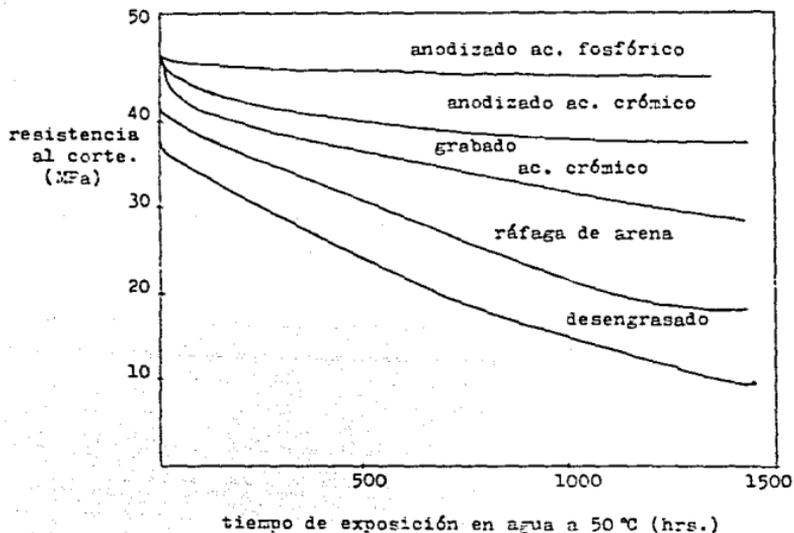
Para darnos una idea de la importancia del tratamiento superficial, veamos el efecto del tratamiento en la resistencia de la junta. (3) (Ver tabla 1)

Tabla 1.

Adherente	Tratamiento	Adhesivo	Resistencia al corte(MPa)
Aluminio	como se recibió	epoxi	3.06
Aluminio	vapor desengrasante	epoxi	5.77
Aluminio	ráfaga de arena	epoxi	12.1
Aluminio	grabado ácido fuerte	epoxi	19.0
Titanio	como se recibió	vinil-fenol	9.35
Titanio	desengrasado	vinil-fenol	21.4
Titanio	grabado ácido fuerte	vinil-fenol	46.5
Cobre	vapor desengrasante	epoxi	12.3
Cobre	grabado ácido fuerte	epoxi	16.1
Ac. inoxidable	como se recibió	vinil-fenol	36.0
Ac. inoxidable	grabado ácido fuerte	vinil-fenol	48.7

1 MPa= 145 psi.

Ahora veamos el efecto del tratamiento sobre el funcionamiento.



juntas de Al unidas con epoxi  
sujetas a envejecimiento acele-  
rado en agua a 50 °C.

Fig. 3

La preparación correcta de la superficie deberá ayudar a garantizar que la liga más débil de la junta adhesiva está dentro del material adhesivo y no en su interfase con el adherente. La superficie de los adherentes, como acero o aleaciones de Al, que van a ser unidos es un factor decisivo que influye en la unión entre el adhesivo y el metal. Es necesaria una limpieza superficial con solventes para eliminar películas de suciedad o grasa. El efecto de la limpieza es reforzado por tratamientos mecánicos o preparaciones químicas posteriores para formar una superficie altamente activada la cual da al adhesivo una mejor oportunidad para anclarse a los componentes. Aumentando la calidad de la superficie se incrementa la resistencia adhesiva arriba del valor de resistencia cohesiva del adhesivo. (49)

Cuando se evalúan factores críticos que afectan la unión de metales por ejem. Al y Ti, las condiciones de calor y humedad combinadas con esfuerzos son especialmente dañinas para uniones metálicas. Capas de óxido estables con la correcta topografía son críticas y una selección del pretratamiento adecuado es de importancia capital. (36)

### 2.2.1 Secuencia general de limpieza para metales.

Cualquier preparación de la superficie requiere el cumplimiento de una, dos o las tres de las siguientes operaciones.

#### 1) Limpieza con solventes.

La limpieza con solventes es el proceso de eliminación de suciedad en una superficie con un solvente orgánico, sin alteración física o química del material que está siendo limpiado.

Esto incluye varios métodos como desengrasado con vapor, rociado, inmersión y depuración mecánica o con ultrasonido. La limpieza con solventes puede ser terminal por sí misma, como en el caso de paneles de Al, que son desengrasados con vapor antes de la unión. Puede ser también un paso preliminar en una serie de operaciones químicas de tratamiento.

## 2) Depuración intermedia.

La depuración intermedia es el proceso de eliminación de películas de suciedad o manchas de una superficie con medios físicos, mecánicos o químicos sin alterar químicamente el material. Pequeñas cantidades del material base pueden ser eliminadas en este proceso. Algunos ejemplos incluyen ráfaga de arena, cepillado con alambres, raspado abrasivo y limpieza alcalina o con detergentes.

La limpieza con solventes debe ser realizada siempre antes de éste paso. Las operaciones intermedias depuradoras pueden ser terminales por sí mismas y preceder justo a la aplicación del adhesivo, como ocurre con la limpieza de acero inoxidable con limpiadores (soluciones) alcalinos inhibidos.

## 3) Tratamiento químico.

El tratamiento químico es el proceso que consiste en tratar una superficie limpia por medios químicos. La naturaleza química de la superficie es cambiada para mejorar sus cualidades de adhesión. La limpieza con solventes siempre deberá preceder a el tratamiento químico y comúnmente una limpieza intermedia debe ser efectuada entre ellos. Algunos de los más comunes son los grabados con ácidos fuertes, anodizado con ácido crómico, anodizado con ácido fosfórico etc.

### 2.2.2 Preparador, capa primera o "primer".

Un preparador adhesivo es comúnmente una solución de un adhesivo en un solvente orgánico; los espesores de esta película seca van de 0.00006 in a 0.002 in. Las principales funciones de un preparador son:

- 1) mejorar la humectación
- 2) proteger la superficie del adherente de la oxidación después de la limpieza, extendiendo el tiempo que puede transcurrir entre la preparación de la superficie y la aplicación del adhesivo.
- 3) ayuda a inhibir la corrosión.
- 4) modifica las propiedades del adhesivo para mejorar ciertas características, como el desprendimiento.
- 5) sirve como película barrera para prevenir reacciones desfavorables entre adherentes y adhesivos.

La primera capa o "primer" es efectuada en algunos casos para garantizar uniones superiores en durabilidad bajo condiciones adversas particulares. (4)

### 2.2.3 Influencia de la topografía superficial.

El papel de la topografía superficial en la adhesión es complejo. Superficies rugosas pueden inhibir la humectación del adhesivo y así producir baja adhesión. No obstante, bajo circunstancias favorables, por ejemplo baja viscosidad, bajo ángulo de contacto y tiempo suficiente antes de la cura, pueden ser humectadas superficies de topografía compleja.

La preparación de superficies metálicas con topografía microfibrosa a menudo provee un mecanismo para producir una deformación plástica del polímero, soportado por el concepto de un anclaje mecánico del adhesivo dentro de los poros o rugosidades de la superficie, mejorando la rigidez disponible para una combinación dada metal-polímero.

Entre más compleja es la topografía superficial más altos son los valores de  $G_c$  producidos. Las superficies fracturadas para altos y bajos son característicamente diferentes. Para bajos valores de  $G_c$ , son relativamente suaves (planas), pero para altos  $G_c$  una deformación plástica considerable es observada para ambos polímeros, el no modificado y el modificado. Altas resistencias están asociadas con la deformación plástica de la superficie y para la resina modificada una depuración de esfuerzos en la masa. En algunos casos, una contribución a la resistencia de la unión es debida a la fractura de las dendritas sobre la superficie del metal. (26)

Para comprender mejor lo anterior veamos la tabla 2 donde se reportan los resultados de algunos estudios.

Resina epoxi		
<u>Substrato</u>	<u>Gc(J/m<sup>2</sup>)</u>	<u>modo de falla</u>
Zinc plano	130	aparentemente adhesiva.
Zinc parcialmente dendrítico	480	adhesiva, pequeñas áreas de polímero sobre el lado del metal ( $\approx 14\mu$ ).
Zinc totalmente dendrítico	700	cohesiva, camino de la fractura arriba de las terminales dendríticas.
Epoxi modificada con 15% de hule		
Zinc plano	700	adhesiva, con áreas poliméricas residuales.
Zinc parcialmente dendrítico	2400	adhesiva/cohesiva. Grandes áreas de polímero ( $\approx 100\mu$ ).
Zinc totalmente dendrítico	3000	cohesiva, la mayoría del adhesivo sobre el lado del metal.

Tabla 2.

Para adhesión óptima, la superficie a la cual el adhesivo es aplicado debe ser limpiada o convertida a una condición adecuada antes de la unión, éste es el propósito de todos los tratamientos superficiales. (28)

Es deseable, aunque no siempre práctico, tener el material adherente básico expuesto directamente al adhesivo sin ninguna capa intermedia de pintura, óxido etc. Tales capas son llamadas "películas límite débiles" y en su presencia el adhesivo nunca toca la superficie del adherente. (4)

Estas películas deben ser eliminadas por medio de alguna de las etapas de la secuencia general de limpieza. La aplicación de la limpieza con solventes únicamente o el tratamiento completo dependerá de la aplicación de la unión y la resistencia requerida. Por ejemplo, tenemos aplicaciones prácticas de unión, la unión vibracional con ultrasonido da la posibilidad de adhesión automática de metales sin pretratamiento de las partes a unir. Adicionando una carga dura al adhesivo y tratamiento ultrasonico por dos segundos, pueden realizarse uniones adhesivas entre superficies aceitosas con resistencias a la tensión y al desprendimiento más altas que con un tratamiento superficial óptimo de dos horas para una aleación de Al por desengrasado y decapado. (29)

Para la unión adhesiva de aleaciones de Al en la industria aeroespacial se requiere un pretratamiento especial de las partes del metal para lograr uniones fuertes y durables. Los tratamientos químicos finales pueden ser: 1) decapado con ácido sulfúrico-crómico 2) anodizado con ácido sulfúrico o 3) anodizado con ácido crómico; todos estos procedimientos probaron ser útiles porque generan capas de óxido porosas sobre la superficie. (19)

### 2.3 Diseño de la junta.

Las juntas para unión adhesiva deben ser diseñadas particularmente para el uso de adhesivos. El hábito de principiar con un diseño usado para otro método de sujeción y modificarlo ligeramente para la unión adhesiva es muy malo y a menudo conduce a resultados desastrosos.

El objetivo del diseño de la unión es obtener máxima resistencia para una área determinada en la unión. Las uniones adhesivas actúan sobre áreas y no sobre puntos aislados. Por esta razón la junta debe de ser diseñada con el objetivo de minimizar la concentración de esfuerzos.

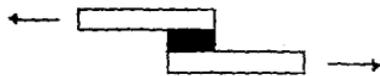
La geometría de la unión comúnmente dependerá de dos factores principales.

- 1) la dirección de todas las cargas aplicadas y fuerzas que la unión tendrá que soportar durante el servicio.
- 2) la facilidad con la que la junta puede ser formada. Esto dependerá en la forma en la cual los adherentes son fabricados (vacíados, moldeados, maquinados) y el material usado.

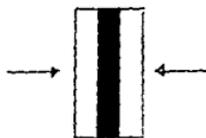
#### 2.3.1 Tipos de esfuerzos.

A continuación mostramos los esfuerzos encontrados en juntas adhesivas. Cualquier combinación de estos esfuerzos puede ser encontrada en una aplicación adhesiva. Estos esfuerzos son:

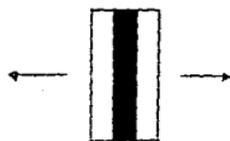
- a) compresión
- b) tensión
- c) corte
- d) desprendimiento
- e) división.



corte



compresión



tensión



división



desprendimiento

Esfuerzos principales en uniones adhesivas.

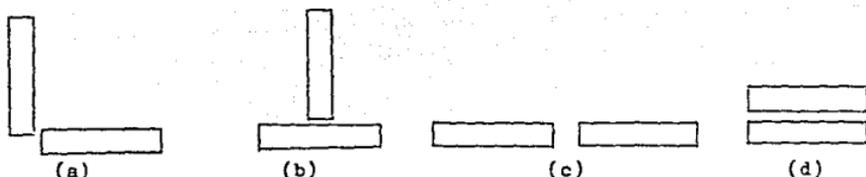
Cuando sea posible las juntas deberán ser diseñadas en tal forma que la mayoría de la carga sea transmitida a través de la unión como una carga al corte. Así mismo los esfuerzos al desprendimiento y a la división deben ser minimizados cuando sea posible. La selección del diseño de la unión está influenciada por las limitaciones en las facilidades de producción, el costo de producción y la apariencia final deseada de la parte.

La resistencia de una unión adhesiva es determinada principalmente por las propiedades mecánicas de los adherentes y adhesivo, los esfuerzos residuales internos, el grado verdadero de contacto interfacial y la geometría de la junta. Cada uno de estos factores tiene una fuerte influencia sobre el funcionamiento de la unión.

El ingeniero en diseño debe estar interesado en la eliminación de concentración de esfuerzos, lo cual reduce la vida útil de la unión. No obstante los esfuerzos localizados no son siempre claros y pueden ocurrir como resultado de expansión térmica diferencial del adhesivo y adherentes. Otra causa es el encogimiento del adhesivo durante la cura cuando son emitidos compuestos volátiles y estos pueden llegar a ser atrapados. Los esfuerzos internos disminuyen, conforme el espesor de la capa adhesiva disminuye, reduciendo también, la tendencia de atrapar compuestos volátiles. <sup>(4)</sup>

Todas las juntas adhesivas, no obstante que complejas, pueden ser reducidas a cuatro tipos básicos (unión de adherentes planos).

- a) ángulo
- b) te
- c) a tope
- d) superficial.



A continuación se muestran las configuraciones de juntas recomendadas considerando la dirección de las cargas y los esfuerzos principales que puede soportar la unión. (ver tabla 3)\*

La resistencia al corte de una junta adhesiva y su habilidad para mantener esa resistencia en servicio es por mucho dependiente del tratamiento superficial de los adherentes y está, por ello, fuera del alcance del diseñador. Un parámetro de unión que en alguna forma está bajo el control del diseñador, es el espesor de la línea de unión.

Para adhesivos termofijos rígidos la mayor resistencia al corte es obtenida con espesores delgados del orden de 0.02-0.1 mm entre más delgada mayor resistencia al rompimiento de la unión por flexión.

Para adhesivos elásticos éste debe ser aplicado para suministrar líneas de unión gruesas especialmente para cargas a la tensión y resistencia al impacto (de 0.3-0.5 mm). Para un adhesivo estructural en el que una resina termofija y un hule son combinados, el espesor óptimo de la línea de unión es intermedio a la línea delgada o gruesa de los materiales constituyentes (0.1-0.3mm). (3)

\* una tabulación completa se encuentra en la ref. 3, cap II

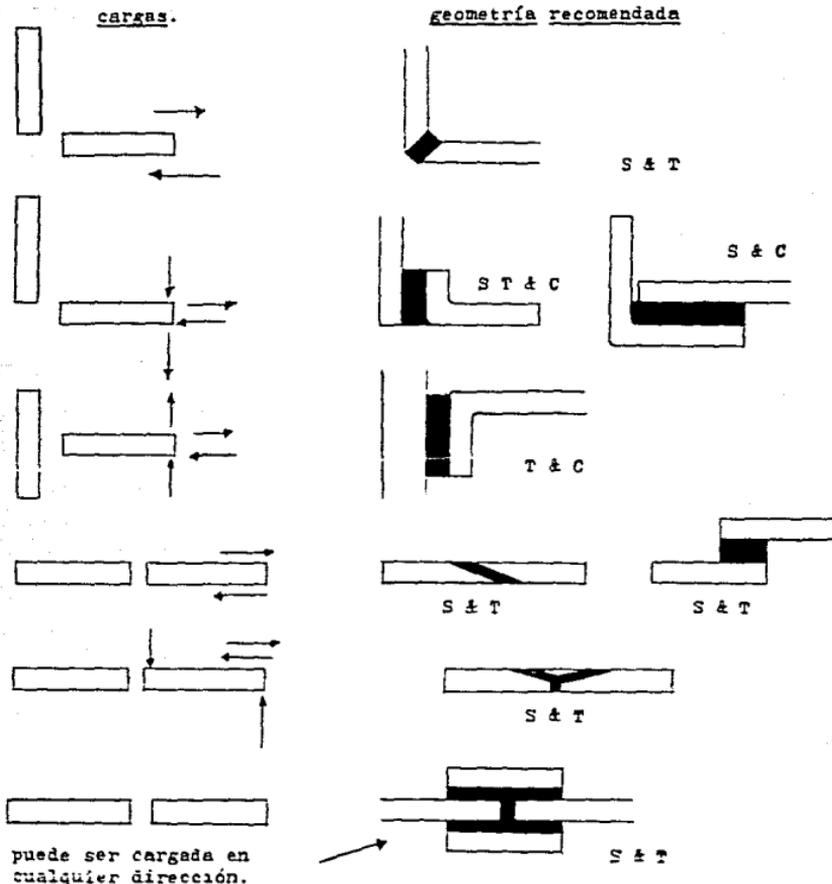


Tabla 3.

S=shear  
 T=tension  
 C=cleavage  
 P=peel

## 2.4 Control de las variables de procesamiento.

El control y entendimiento de como las variables de procesamiento afectan a el adhesivo y a las propiedades de la junta final, es mandatorio si altos niveles de reproductibilidad y confiabilidad quieren ser logrados. Las variables de procesamiento pueden ser separadas dentro de dos clases, aquellas relacionadas a los parámetros de fabricación de la junta (cura) que son:

- 1) control temperatura/presión
- 2) velocidad de calentamiento

y aquellas relacionadas con el adhesivo como la calidad del adhesivo, el contenido de humedad y la edad del adhesivo.

### 2.4.1 Parámetros de fabricación de la junta.

Los adhesivos estructurales de alta resistencia deben ser curados para desarrollar resistencia en la unión. La cura de un adhesivo o fijación es la transformación del estado líquido al sólido. En la mayoría de los casos la cura es realizada a través de la aplicación de calor, presión o ambos y es aquí donde la reacción de polimerización toma lugar.

Los parámetros de fabricación, tales como la variación de la temperatura de cura, han sido identificados como críticos para el funcionamiento final de juntas adhesivas. El calentamiento o velocidad de cura, efectuado durante la fabricación, es aludido por los investigadores en términos de niveles de esfuerzo interno, comportamiento reológico de cura, resistencia al corte y propiedades dinámicas-termomecánicas.

Se ha demostrado para sistemas epoxi, la existencia de reacciones de formación competitivas de la red que tienen diferentes velocidades de reacción, y que conducen a estructuras moleculares diferentes. Las estructuras intermedias formadas durante la cura=

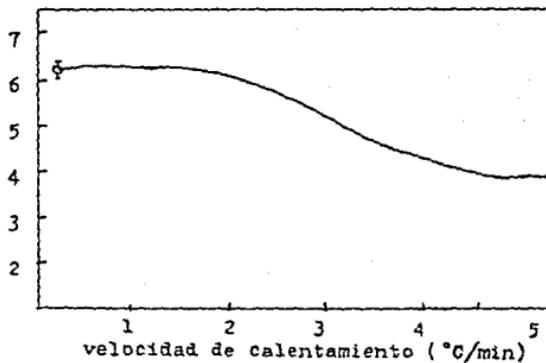
de adhesivos epoxi en proporciones bajas de calor serán esperadas diferentes a aquellas generadas a velocidades altas de calentamiento. Estos cambios estructurales se verán reflejados en las respuestas mecánicas de las juntas adhesivas. Los cambios de estructura molecular debidos al envejecimiento, al avance de peso molecular o a temperaturas de cura más bajas también afectan las propiedades finales del adhesivo curado. Los efectos generales de la velocidad de calentamiento encontrados en adhesivos están indudablemente relacionados a cambios en la morfología de la red. Cada sistema adhesivo será influenciado en grados variables dependiendo de la composición química y cinética de la reacción, de los catalizadores y aditivos empleados.

Los resultados del análisis dinámico-mecánico están de acuerdo con la  $T_g^*$  y las medidas de resistencia reflejan la necesidad de mantener velocidades de calentamiento específicas para alcanzar reproductibilidad y resistencias mecánicas óptimas en juntas unidas. (17)

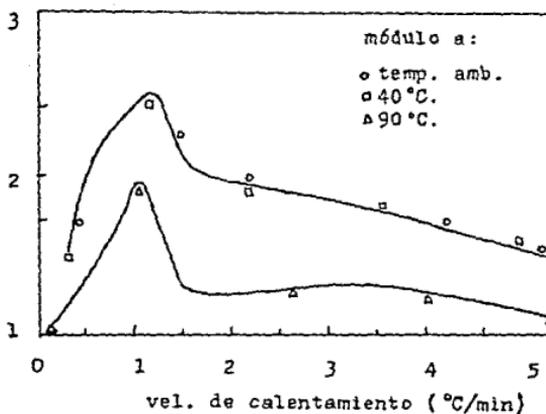
Dependiendo de las propiedades del adhesivo, las presiones de cura pueden variar desde presión de contacto de 1-5 psi hasta 500 psi, mientras que las temperaturas de cura pueden ser desde temperatura ambiente hasta 350 °C, aunque la máxima temperatura usual es de 177 °C. (3)

\*  $T_g$  = temperatura de transición al vidrio.

resistencia  
al esfuerzo  
cortante.  
(Ksi)



módulo  
dinámico.  
(GPa)



Variación de las propiedades mecánicas  
con la velocidad de calentamiento.

Los resultados anteriores corresponden a placas de Al tratadas con ácido fosfórico (anodizado) unidas con el adhesivo soportado AF 163.

Las especificaciones de cantidad de calor para adhesivos epoxi generalmente se extienden de 0.55 a 8 °C/min.

La mejor recomendación para una cura exitosa del adhesivo es apegarse a las condiciones de temperatura, presión, tiempo y cantidad de calor dadas por el fabricante. Los planes de cura dictados por el fabricante se acomodan a la cinética de cura de la reacción que debe producirse para lograr el funcionamiento óptimo del adhesivo.

#### 2.4.2 Variables relacionadas con el adhesivo.

El procedimiento específico de cura requerido para producir una resina curada de características de funcionamiento óptimas es dependiente de la precisa combinación de resina, agente de cura y/o catalizador. Lo anterior es importante especialmente para adhesivos de dos componentes en donde el usuario debe contar con el equipo de mezclado adecuado y controlar las proporciones de cada componente. Las variaciones que se pueden suceder durante la fabricación con respecto a la composición del adhesivo repercuten indudablemente sobre sus propiedades finales (Tg, propiedades mecánicas etc.)

También han sido realizados estudios acerca del contenido de humedad en adhesivos y su efecto sobre el funcionamiento concluyendo que la humedad absorbida causa reducción en la resistencia al corte del adhesivo.

Las películas adhesivas sin curar absorben humedad durante el almacenaje lo cual afecta la resistencia de la unión. Para evitar esto, un preacondicionamiento del adhesivo en la etapa B bajo 3-5 mm Hg de vacío por 3-4 hrs. es recomendado para eliminar el contenido de humedad. El método es efectivo cuando el contenido de humedad absorbida es por debajo de 0.3% y por 3-4 hrs únicamente, cuando el contenido inicial de humedad se incrementa por arriba de este nivel o cuando el secado es llevado por períodos más largos, ocurre deterioración de las propiedades. (15)

La edad del adhesivo se refiere a su comportamiento sorción-desorción de humedad. La decoloración e hinchazón han sido observadas después de grandes períodos de tiempo de almacenaje. La incorporación de humedad se incrementa con el aumento de la humedad relativa a temperatura constante o con el aumento de temperatura a humedad relativa constante.

La humedad absorbida antes y después de la cura de un adhesivo tiende a emigrar hacia la interfase, ocasionando el debilitamiento de la unión en esta zona y resistencias de unión más bajas. (37)

Cuando la decisión de ensamblar con adhesivos ha sido tomada serán logrados resultados óptimos sólo por medio de una cuidadosa atención a cada etapa del proceso de unión. La unión adhesiva involucra los siguientes pasos interdependientes básicos:

a) selección adecuada del adhesivo.

Esto demanda una consideración de los requerimientos de funcionamiento para la unión y el ensayo con materiales similares (para confirmar que el diseño de la junta y el tipo de adhesivo son adecuados).

b) selección del método para la preparación de la superficie.

Siguiendo a la selección del tipo de adhesivo, es necesario considerar tratamientos adecuados de los adherentes. En ocasiones los mismos fabricantes de adhesivos sugieren los tratamientos más convenientes para los adherentes que serán unidos con determinados adhesivos.

c) diseñar la unión específicamente para la unión adhesiva.

Un error común es dejar la selección del adhesivo hasta después de que el diseño de la junta ha sido determinado. El diseño puede no ser adecuado para unión adhesiva cuando los componentes no resistirán el procesamiento o tolerancias no permiten a el adhesivo penetrar. La determinación de esfuerzos en la unión, tipo y tamaño aunado a los requerimientos de resistencia apuntarán a materiales adhesivos preferentes.

d) fabricación del ensamble.

Esto involucra aplicación del adhesivo y curado final de la unión bajo condiciones controladas. (3)

### CAP III. DURABILIDAD DE UNIONES ADHESIVAS METAL-METAL.

Las uniones adhesivas deben soportar las fuerzas mecánicas que actúan sobre ellas, pero también deben resistir las condiciones de servicio; la durabilidad siempre estará ligada a el ambiente de servicio. (4)

Tal servicio puede involucrar exposiciones a corto o largo plazo en condiciones interiores más bien suaves o exposición continua a medios ambientes exteriores en algunas de las peores condiciones climatológicas del mundo, a menudo con poca o sin ninguna protección dada por acabados o recubrimientos. A menudo el servicio involucra ciclos repetidos de una condición a otra, como de una estación a otra. (11)

Los factores que afectan la durabilidad a largo plazo de ensambles metálicos unidos con adhesivos expuestos a ambientes naturales incluyen la naturaleza del adhesivo, el esfuerzo aplicado a la junta, el ambiente operacional y la calidad de la superficie metálica antes de la unión. No obstante lo anterior la durabilidad de un adhesivo en condiciones ambientales extremas es por mucho dependiente del tratamiento superficial de los adherentes, así mismo la aplicación de esfuerzos causará que la unión adhesiva se degrade más rápido que una unión libre de esfuerzos. (28)

Wangness ha hecho las siguientes observaciones acerca de la durabilidad de sistemas adhesivos.

-El uso de sistemas con "primer" pigmentado con cromato mejora bastante la durabilidad.

-Los sistemas que curan en caliente poseen una mayor durabilidad que los sistemas que curan a temperatura ambiente.

-La química de los sistemas adhesivos tiene un efecto sobre la durabilidad, los sistemas altamente entrecruzados, como los curados con aminas y los fenólicos, generalmente poseen una durabilidad superior.

Debido a el gran número de factores que influyen en la durabilidad de uniones adhesivas se deben hacer pruebas de durabilidad conducidas a todos los sistemas, antes de que sean seleccionados para cualquier aplicación particular; estas deben incluir los adherentes, preparación de la adherentes , adhesivos y parámetros de cura necesarios para cada aplicación.

### 3.1 Condiciones que afectan el funcionamiento de adhesivos.

Las condiciones que afectan el funcionamiento de las uniones adhesivas, y que por tanto tienen efecto sobre la durabilidad de estas son las siguientes:

#### a) alta temperatura.

Todos los polímeros son degradados en alguna medida por la exposición a altas temperaturas. Un adhesivo que debe soportar altas temperaturas debe tener un alto punto de fusión o ablandamiento y debe ser resistente a la oxidación; deben tener estructuras poliméricas rígidas y grupos químicos estables.

#### b) bajas temperaturas (criogénicas).

El mayor uso de adhesivos para aplicaciones criogénicas es para uniones exteriores aislantes de sustratos metálicos y no metálicos. Los problemas asociados con juntas adhesivas a temperaturas criogénicas son el resultado de concentración de esfuerzos y gradientes desarrollados dentro de la unión. Las acusas de concentración de esfuerzos son agravadas por las temp. criogénicas. La conductividad térmica es importante para minimizar los=

transientes durante el enfriamiento. Estos esfuerzos son reducidos por medio de la línea de unión (delgada) y conductividades térmicas altas.

c) humedad e inmersión en agua.

La humedad puede afectar la resistencia adhesiva en dos formas. Algunos materiales poliméricos particularmente los poliuretanos basados en ester se reconvertirán, por ejemplo perderán rigidez, resistencia y en el peor de los casos se ablandarán durante la exposición en aire húmedo caliente.

El agua también puede penetrar a el adhesivo y preferentemente desplazar el adhesivo en la interfase de la unión. La resistencia adhesiva se deteriorará más rápidamente en un ambiente de vapor acuoso que en agua líquida debido a la más rápida penetración del vapor de agua. Ya que la interfase es de suma importancia "primers" y tratamientos superficiales tienden a impedir la disminución de la resistencia adhesiva en medios húmedos.

d) factores climatológicos y otros.

Por mucho, los factores más perjudiciales que influyen la edad de uniones adhesivas exteriores son la humedad y el calor. los ciclos térmicos y la radiación ultravioleta son relativamente factores menores. El agua salada, el rociado de sales, químicos, solventes, condición de vacío y biológicos pueden también deteriorar las uniones adhesivas disminuyendo su resistencia. (4)

A continuación mostramos una tabla de recomendaciones para aplicaciones en ambientes específicos basada en una gran cantidad de experiencias pasadas. (Tabla 4)

Sistema adhesivo	Altas temperaturas	Bajas temperaturas	Humedad	Agua salada (niebla de sales)	Químicos y solventes	Vacio	Radiación	Biológicos
Epoxi	Los de uso general hasta 170°C, existen algunos útiles para servicio a largo plazo (150-200°C) los más resistentes con los curadores con anhídridos.	Aceptables los curados con polimida.	* Los curados con amina proveen mejor estabilidad hidrolítica.	Curados con anhídridos retienen la mitad de sus propiedades después de exposiciones a largo plazo.	Los más resistentes son los curados con amina aromática.		Excelente resistencia a radiación en general.	
Nitrilo-fenol	Tienen excelente resistencia al corte entre 120 y 150°C y su retención de resistencia por envejecimiento es muy buena en este rango.	Valiosos por su alta resistencia al desprendimiento.	La falla bajo condiciones húmedas en de tipo cohesiva.	El mejor sistema para prevenir falla prematura en cualquier medio corrosivo, niebla o inmersión.			Más resistentes al daño por radiación que los epoxi.	
PI.	Exposiciones cortas hasta 538°C, debido a su estructura rígida baja resistencia al desprendimiento.						Excelente resistencia a el daño por radiación	
PBI.	Se recomiendan hasta 240°C a alta temperatura de cura.							
Poliuretano		* Excelentes propiedades mecánicas a -253°C, los mejores para aplicaciones criogénicas.			Muestran buena resistencia a la mayoría de los químicos, solventes y aceites.	* Buenos resultados en condición de vacío.		Los poliuretanos basados en poliésteres son los más susceptibles al ataque de bacterias.
Epoxi-nylon		Alta resistencia a temperatura criogénicas en el rango (-100 a -300°F)	No tan buenos como los nitrilo-fenol.					
Epoxi-fenol	* Rango de temperatura (150-260°C) los mejores en aplicaciones para temperaturas elevadas en aplicaciones a largo plazo no tan buenos como los nitrilo-fenol.	Buena resistencia a temperaturas criogénicas al igual que para altas temperaturas						
Epoxi-nitrilo				Mejores propiedades que los epoxi no modificados.		Por debajo de los poliuretanos.		

- 1) Los sistemas señalados con un \* son los que más duran bajo dicho ambiente
- 2) La combinación de dos o más variables aminoran el efecto de estas y disminuye la durabilidad esperada.
- 3) Los sistemas adhesivos son para unión estructural y sirven para unir metales.
- 4) Los biológicos casi no tienen efecto sobre los adhesivos sintéticos

TABLA 4

### 3.1.1 Durabilidad por morfología superficial.

Recientemente ha sido descubierto para Al y Ti que las microrugosidades tienen mucho que ver en la durabilidad mejorada de uniones adhesivas bajo esfuerzo hidrotérmico.

Existe comúnmente una pobre correlación entre resistencia y rugosidades macroscópicas según lo que se observa en el método SEM. Las microrugosidades que pueden ser vistas con STEM parecen ser de mucho mayor importancia. El grado de fijación mecánica entre adhesivo y sustrato, dependerá de la penetración y unión en los poros y esto a su vez dependerá de la forma, dimensiones y química superficial de la estructura porosa.

Si el tratamiento de la superficie la deja con todos los sitios cubiertos con  $\text{OH}^-$  quimi-sorbido, el cual se une fuertemente a los grupos funcionales ácidos de la epoxi, no hay fuerza termodinámica impulsora para una reacción posterior con agua. Estos tratamientos de superficie son estables bajo esfuerzo hidrotérmico y son muy durables.

Los tratamientos superficiales que dejan la superficie con  $\text{OH}^-$  no adsorbido son termodinámicamente inestables y reaccionarán con  $\text{H}_2\text{O}$  después de la unión, por lo cual la unión no será durable. Es por esto que un criterio crucial de la resistencia descansa en la capa quimi-sorbida que resulta del tratamiento.

La formación de microrugosidades durante el tratamiento superficial puede moderar (mitigar) la dependencia de una química superficial adecuada y, a través de un anclaje mecánico mejorar grandemente la durabilidad de las juntas. Por ejemplo para acero inoxidable los tratamientos superficiales fuertemente oxidantes disuelven la capa más exterior de la aleación y una capa de =

Cr, Ni, Mo intermetálica reprecipita en forma de una estructura capilar dendrítica cubierta de óxido de Cr. Estas dendritas ( de aprox. 500 Å) cubiertas por la capa de óxido forman una cadena dendrítica que arrastra a el adhesivo dentro de la red, provocando anclaje mecánico. (21)

### 3.2 Adhesivos para metales específicos.

En esta sección se sugieren adhesivos para metales específicos. Ocasionalmente son publicadas tablas listando un gran número de adhesivos recomendados para adherentes específicos. Estas tablas pueden ser engañosas para suministrar información sobre uniones fuertes y durables, debido a que el usuario tiende a olvidar que algunas combinaciones de adhesivos y adherentes son superiores a otras, particularmente en durabilidad, no obstante que la resistencia a otros ambientes es también importante.

Se enfatizan a continuación, los tipos de adhesivos que han demostrado suministrar uniones fuertes y perdurables con metales.

#### Aluminio y aleaciones.

Existen varios sistemas adhesivos recomendados para unir Al, los adhesivos recomendados en orden decreciente en cuanto a la durabilidad son:

- 1) nitrilo-fenol
- 2) epoxi para alta temperatura
- 3) epoxi con temp. cura= 121 °C
- 4) hules modificados con epoxi temp. cura= 121 °C
- 5) vinil-epoxi
- 6) epoxi curada con amina, pasta de dos partes temp. cura=amb.
- 7) poliuretano en dos partes

### Berilio.

Los adhesivos recomendados incluyen epoxi-fenol, nitrilo-fenol epóxicos (temp. cura=amb.), epoxi-nylon, poliimida, polibenzaimidazol y poliuretano. Ya que el Berilio retiene significativa resistencia a 540 °C, la aplicación para alta temperatura es amplia para este metal poco exótico. Los PBI y las PI pueden ser estables en aire hasta 288 °C. A pesar de que los sistemas convencionales son mucho más sensitivos a la temperatura que los PBI y PI, son considerablemente más fuertes a temperatura ambiente.

Resistencias de unión mayores a 4300 psi al corte y a la tensión pueden ser obtenidas por unión adhesiva de Be y fracturas debidas a falla cohesiva en el adhesivo.

### Bronce.

Los adhesivos utilizados con Cu y aleaciones pueden también ser usados con bronce.

### Cadmio.

Los adhesivos recomendados incluyen nitrilo-fenol y adhesivos acrílicos (anaeróbicos).

### Cobre y aleaciones.

Los adhesivos recomendados incluyen nitrilo-fenol, epoxi, poliuretano, nylon-epoxi, cianoacrilatos y acrílicos anaeróbicos.

Únicamente los epoxi curados en caliente y que contienen DICY o melamina deben ser usados. La DICY ha mostrado ser benéfica ya sea usada solo como agente de cura para la resina epoxi, cuando es mezclada con otros agentes de cura o cuando es usada para pre-tratar la superficie del Cu antes de la unión. Aún cuando sea simplemente adicionada a revestimientos la DICY y la melamina incrementan el tiempo de la falla adhesiva, ya sea en Cu tratado con permanganato alcalino o sin ningún tratamiento.

### Oro.

Los adhesivos recomendados incluyen epoxi, epoxi-fenol, polivinil alquil eter y acrílicos anaerobicos (necesitan "primer" para activar el sistema)

### Plomo.

Epoxi, polivinil alquil eter, poliuretano (2 partes), epoxi-fenol, silicones y cianoacrilatos. Los termofijos de alta resistencia y los adhesivos combinados son poco usuales para unir plomo, ya que su uso no es justificado y deberá preferirse uno de más bajo costo o manejo más fácil. Han sido reportadas resistencias al corte de 21 MPa (300 psi).

### Magnesio y aleaciones.

Incluyen los epoxi, epoxi-fenol, poliuretanos, cianoacrilatos, vinil-fenol, neopreno-fenol y nylon-epoxi. Una amplia variedad de adhesivos pueden ser usados para unir magnesio tanto más si una adecuada protección a la corrosión es mantenida en la unión. Debido a la sensibilidad del Mg por la humedad y al acoplamiento galvánico, los adhesivos a base de agua pueden causar algunos problemas. La preparación de la superficie debe siempre efectuarse para asegurar que el adhesivo por sí mismo no reaccionará con la aleación y crear una condición de corrosión. Otra importante observación es que un alto módulo del adhesivo tiende a suministrar menores resistencias de unión que los adhesivos con bajo módulo.

### Níquel y aleaciones.

El níquel es usualmente empleado en forma aleada. Relativamente poco trabajo ha sido realizado en la unión adhesiva de aleaciones de níquel, debido a que la mayoría de estas aleaciones son usadas a temperaturas arriba de la temp. de servicio de los adhesivos orgánicos, o bajo condiciones de corrosión.

Adhesivos inorgánicos de suficiente ductibilidad no han sido desarrollados. A la fecha los adhesivos epoxi son los más comunes para unir Ni y sus aleaciones. Los PBI y PI también pueden ser usados para aplicaciones en altas temperaturas. Otros adhesivos usados incluyen epoxi-nylon, nitrilo-fenol y vinil-fenol.

#### Acero al carbón.

Los adhesivos recomendados incluyen los epoxi, nitrilo-fenol, PBI (alta resistencia en un amplio rango de temperaturas), PI y epoxi-fenol para aplicaciones de alta resistencia. Para aplicaciones de menor resistencia se pueden usar adhesivos a base de hule (teroplásticos)

#### Acero inoxidable.

No obstante que los métodos para preparar la superficie son usualmente diferentes, los adhesivos usados para acero suave pueden en general ser usados para acero inoxidable.

#### Estaño.

Los adhesivos recomendados incluyen los epoxi y los epoxi-modificados.

#### Titanio y aleaciones.

Los adhesivos recomendados incluyen epoxi, nitrilo-epoxi, nitrilo-fenol, PI y epoxi-fenol. Los nitrilo-fenol, debido a su alta resistencia al desprendimiento son recomendados para la unión metal-metal hasta temperaturas de 177 °C. Los nuevos adhesivos a base de PI pueden ser utilizados para temperaturas hasta de 260 °C. Los adhesivos para altas temperaturas no basados en PI son los sistemas basados en polifenilquinoxilonas. Un adhesivo basado en este polímero heteroaromático mostró una disminución de solo el 25% de su resistencia original después de 500 hrs a 378 °C.

### Tungsteno y aleaciones.

Poca información ha sido encontrada en adhesivos recomendados para tungsteno, sin embargo los epoxi y nitrilo-epoxi se pueden emplear con éxito.

### Uranio.

Se pueden usar los epoxi para unir este metal poco común.

### Zinc y aleaciones.

Los adhesivos recomendados incluyen nitrilo-epoxi, epoxi, cianacrilatos y adhesivos basados en hule.

Existen dentro de los adhesivos para unión metal-metal algunos que con ciertos metales trabajan mejor, es decir resultan más durables y resistentes. La afinidad que muestran las superficies metálicas por algunos adhesivos es debida a varios fenómenos, por ejemplo las capas de óxido originadas por algunos tratamientos químicos y su combinación con ciertos grupos funcionales presentes en la resina contribuyen en gran medida al aumento de la adhesión, sin embargo, otros fenómenos que se cree influyen en la adhesión no han sido explicados aún.<sup>(4)</sup>

De las recomendaciones anteriores, concluimos que los adhesivos más versátiles para la unión metal-metal son los epoxi y los epoxi-modificados (epoxi-hule).

Los adhesivos epoxi encuentran amplio uso en la industria debido a su alta resistencia y relativa facilidad de aplicación. Debido a los epóxidos, hidróxidos, aminos y otros grupos polares, los adhesivos epoxi tienen alta adhesión específica a metales, vidrio y cerámicos. Su resistencia conduce a una buena fuerza cohesiva dentro de la línea de unión de forma que algunas=

veces, por ejemplo en uniones aluminio-aluminio, la falla bajo carga ocurrirá dentro del material que está siendo unido en vez de que en la línea de unión. (73)

Estos materiales son usados en formulaciones adhesivas para el mercado consumidor, mantenimiento de herramienta industrial, industrias de la construcción y de accesorios, industria automotriz y debido a su alta resistencia y poco peso en la industria aérea.

Cuando son comparados con otros materiales plásticos las resinas epoxi ofrecen varias ventajas de funcionamiento en aplicaciones adhesivas. Algunas de estas ventajas incluyen:

- 1.- Excelente resistencia al corte por tensión.
- 2.- No hay productos volátiles desarrollados durante la cura.
- 3.- Bajo encogimiento durante la cura.
- 4.- Buena resistencia a la humedad y a químicos.
- 5.- Buena habilidad para la humectación superficial.
- 6.- La cura a menudo puede ser realizada a temperatura ambiente.
- 7.- Buena acción sellante.
- 8.- Bajo deslizamiento (arrastre) bajo esfuerzos prolongados
- 9.- Características de manejo y funcionamiento versátiles. (72)

### 3.3 Pruebas a largo plazo para evaluar durabilidad.

Sorprendentemente, los adhesivos para unir metales fueron usados por varios años en aplicaciones estructurales y semiestructurales en aeroplanos y otros usos militares, antes de que cualquier estudio de permanencia de tales juntas fuera hecho.

Las razones citadas para esto fueron:

- 1) Que los tipos químicos de resinas en dichos adhesivos, como en las resinas fenólicas y hules sintéticos, eran conocidos como durables en usos no adhesivos.
- 2) Que las condiciones finales de uso de la superficie no eran severas y la vida en servicio era igualmente corta debido a la rápida obsolescencia.

En 1953 se comenzó una serie de estudios de exposición para estudiar el funcionamiento de una serie de 5 adhesivos comerciales en Al para juntas a traslape simple cuando eran expuestas al medio ambiente sin protección en Fairbanks (Alaska) Nuevo México, Madison (Wisconsin), Miami (Florida) y la zona del canal de Panama. Las pruebas incluían exposiciones a cada una de las varias condiciones controladas en laboratorio, en un intento por obtener una correlación con la exposición exterior que pudiera sugerir alguna prueba de laboratorio a corto plazo conveniente para el abrigado de futuros adhesivos e inclusión en especificaciones de adhesivos.

Esta serie de estudios fue luego expandida para incluir un total de 12 adhesivos con énfasis principal, más tarde, en dos de los sitios de exposición más severos, Miami y el canal de Panama.

En estos estudios, pánels unidos estuvieron sin esfuerzo alguno y otros fueron sometidos a un esfuerzo constante de curvatura durante toda la exposición. Las superficies de Al fueron preparadas para la unión usando el procedimiento estándar ácido sulfúrico-dicromato de sodio, el cual ha demostrado dar el mejor funcionamiento bajo condiciones de niebla de sales.

Después de 6, 12, 24 y 36 meses los pánels fueron removidos de la exposición y devueltos al laboratorio, en donde se obtuvieron las muestras para prueba al corte. Los resultados muestran que los adhesivos funcionan un poco diferente, siendo la exposición en la costa de Florida más severa que en la zona del canal.

Los adhesivos de resinas epoxi y resinas acrílicas generalmente mostraron mayor deterioración, particularmente bajo condiciones forzadas. Ciertos adhesivos como los vinil-fenol y los epoxi-fenol ambos sujetos a esfuerzo y sin él, funcionaron bien por los 3 años enteros en Florida y en la zona del canal. Algunas de las juntas más pobres mostraron considerable evidencia de corrosión del metal, sugiriendo otra vez que los efectos de la exposición sobre el adherente y el adhesivo están interrelacionados.<sup>(11)</sup>

Dentro de otras pruebas de durabilidad tenemos el daño y la degradación de juntas adhesivas de metales por la acción de condiciones específicas como envejecimiento (cambio debido a la acción del tiempo), solventes, temperatura, humedad, vapor, combustibles, aceites lubricantes y factores climatológicos;<sup>(64)</sup> pruebas de durabilidad sobre adhesivos conductores y pruebas al corte en traslape con carga sostenida en condiciones de alta temperatura y alta humedad para hacer correlaciones cualitativas de la durabi-

lidad de uniones adhesivas metal-metal, como una función del tipo de adhesivo, temperatura de cura, tipo de adherente, tipo de preparación de la superficie y atmósfera de carga. (31)

Entre las conclusiones obtenidas por dichas pruebas tenemos:

-Es la acción del agua el factor principal que causa una disminución en la resistencia de la unión y un incremento en la resistencia de adhesivos conductores, por ejemplo, epoxi cargado con Ag (polvo). La durabilidad varía con la composición del adhesivo conductor y el tratamiento superficial de los metales unidos, la adición de un agente acoplante a el adhesivo conductor incrementó la durabilidad. (60)

-El criterio para producir óptima adhesión y larga durabilidad incluye:

- 1) Pretratamiento superficial para eliminar todas las capas indefinidas.
- 2) Una superficie del sustrato que sea fisicoquímicamente activa con respecto a el adhesivo.
- 3) Un efecto fisicoquímico recíproco entre el adhesivo y el sustrato que sea resistente a la hidrólisis.
- 4) Control del campo químico exterior por el adhesivo, de tal forma que la estabilidad de la superficie en el sustrato sea mantenida.

Las pruebas mecánicas a corto plazo únicamente garantizan una cierta calidad e inclusive pueden ser engañosas. Una técnica de unión adhesiva durable requiere un desarrollo integrado que considere todos los parámetros, desde materiales, hasta procesamiento. (71)

## CAP. IV. LA RESISTENCIA DE LA UNIÓN.

### 4.1 Transmisión de carga a través de uniones adhesivas.

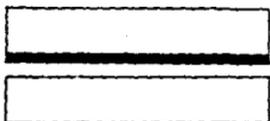
El propósito de un adhesivo es la transmisión de fuerzas de un adherente a otro. De esta forma el funcionamiento de un adhesivo es siempre evaluado en términos de pruebas de adhesión mecánicas en las cuales se mide la resistencia del polímero o de su interfase con los adherentes.

El criterio para definir si la resistencia de una unión es la adecuada, es ver si la separación ocurre a lo largo de la interfase o no; se cree que este dominio de la interfase constituye la liga débil de la unión y no representa la resistencia del polímero mismo.

Una unión adhesiva puede fallar (desunirse) ya sea en la interfase adhesivo-adherente o dentro del adhesivo mismo. Cuando la falla ocurre en la interfase adhesivo-adherente se trata de una falla adhesiva, mientras que si la falla sucede dentro de la capa adhesiva hablamos de una falla cohesiva. Un adhesivo óptimamente configurado es aquel cuya falla es del tipo cohesivo, ya que de esta forma son aprovechadas al máximo las propiedades mecánicas de los adherentes.

El análisis de la resistencia de uniones adhesivas usualmente abarca dos distintas fases, llamadas análisis de esfuerzos y deformaciones en la unión y la subsecuente evaluación de la falla.

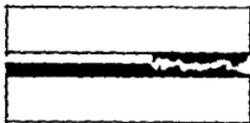
Tipos de falla.



falla adhesiva,  
no deseable



falla cohesiva  
deseable



60% adhesiva  
40% cohesiva  
la más común



En el pasado los análisis teóricos de esfuerzos involucraban bastantes suposiciones:

- la unión era tipo traslape simple
- ambos adherentes eran hechos del mismo metal y tenían la misma geometría.
- adherente y adhesivo se comportaban elásticamente
- esfuerzos curvos o al desprendimiento no estaban involucrados
- los esfuerzos residuales y la expansión térmica eran ignorados
- las deflexiones eran pequeñas.

Los estudios teóricos presentes han llegado a ser mucho más complejos. Nuevas técnicas de computadora, permiten el uso de aproximaciones tipo matriz del elemento finito. Los efectos de variables importantes, están siendo determinados por estudios paramétricos. El comportamiento elástico de baja deflexión a temperatura constante en juntas a tope y escalonadas ha sido reemplazado por un comportamiento elástico-plástico, deflexión grande combinada con diferencias de expansión térmica o esfuerzos residuales inducidos por el encogimiento de la cura. (5)

#### b) análisis experimental de esfuerzos.

Típicamente, el criterio para una medida cualitativa de la resistencia interna de una unión adhesiva hacia una carga externa ha sido la distribución de esfuerzos en el adhesivo y los adherentes. Está no es una tarea fácil. Aún en juntas a traslape simple la actual distribución de esfuerzo-deformación bajo cargas, son combinaciones de esfuerzos al corte y tensión extremadamente complejas y son muy propensos de alterarse por características de material no uniforme, concentración de esfuerzos o fallas parciales localizadas.

Es muy difícil medir exactamente las deformaciones en uniones adhesivas con tales espesores de línea y con adhesivos relativamente inaccesibles. Se están usando con éxito limitado medidores de esfuerzos, extensómetros y fotoelásticos. (5)

A continuación presentamos la deformación y predicción de resistencia en juntas a traslape simple con bordes biselados que tienen adherentes de metales disímiles haciendo una comparación de los resultados analíticos con los experimentales. Las coordenadas y dimensiones para las juntas se muestran en la fig. 4

Una junta con  $\theta=90^\circ$  y  $L_1=0.0$  mm. indica una junta a tope. La posición en la dirección " s " es mostrada por notaciones no dimensionales  $s = s \cdot \sin \theta / t$ .

$\bar{s} = -0.5, 0.0, 0.5$  indican la superficie superior, la posición media y la superficie más baja de la junta.

Acero al carbón, latón, cobre y aleación de aluminio son utilizados como adherentes y una resina epoxi como adhesivo.

$x$  = dirección longitudinal.  
 $z$  = dirección del espesor.  
 $s$  = dirección paralela a la capa adhesiva.  
 $n$  = dirección vertical a la capa adhesiva.  
 $L$  = longitud de la junta.  
 $L_1$  = longitud del adherente.  
 $L_2$  = longitud del traslape.  
 $t_1$  = espesor de los adherentes.  
 $t_2$  = espesor de la capa adhesiva.  
 $\theta$  = ángulo del bisel.

- ① adherente
- ② adhesivo
- ③ adherente.

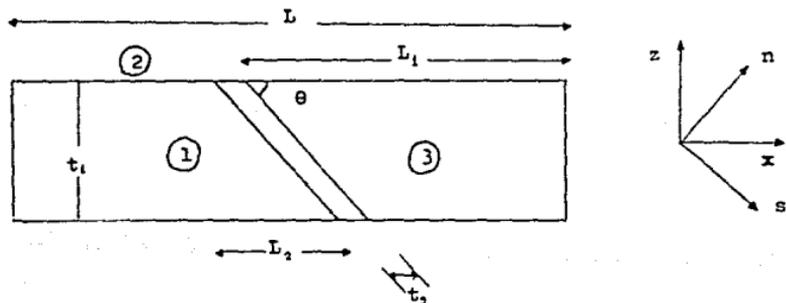


Fig. 4

El análisis de esfuerzos es realizado usando el método del elemento finito elástico y la suposición de condición de esfuerzo plano. La configuración del elemento finito y las condiciones límite son mostradas a continuación.

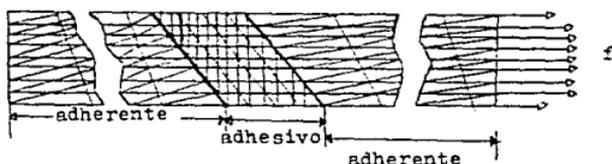


diagrama del elemento finito.

Las condiciones de carga son asumidas de tal forma que el valor medio de  $f/N$  es aplicado a los puntos nodales superior e inferior en el canto derecho de la junta y  $f/N$  a los otros puntos nodales. El punto nodal medio en el canto izquierdo de la unión es fijado en ambas direcciones "x" y "z", otros puntos nodales son fijados en la dirección "x" y libres en la dirección "z".  $f/N$  es la carga  $f$  dividida por el número de elementos finito  $N$  en la dirección "z". Los esfuerzos de la junta son medidos por el uso de un medidor de esfuerzos estático bajo 250 Kgf de carga por una máquina de prueba universal.

Propiedades de los materiales.

	módulo de Young (GPas)	rel. de Poisson.
acero al carbón.....	206	0.33
aleación de Al .....	71.5	0.34
cobre .....	130	0.34
latón .....	100	0.35
resina epoxi .....	3.33	0.34

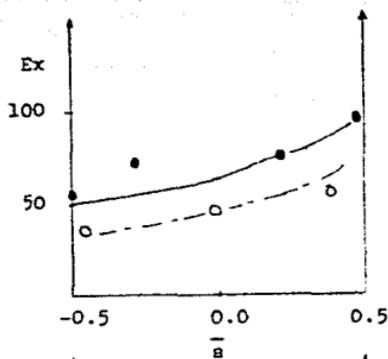
### Resultados analíticos.

Una junta de largo = 178 mm. y 10 mm. de espesor se analiza, la longitud del traslape  $L_1$  es variada. El esfuerzo promedio  $\bar{\sigma}_a$  es definido como la carga dividida por el área de sección transversal de la junta. A continuación se muestra la distribución de esfuerzos  $E_x$ ,  $E_z$  y  $\gamma_{xz}$  a lo largo de la dirección  $\bar{s}$  en los adherentes. Un esfuerzo promedio  $\bar{\sigma}_a = 10$  MPa es aplicado cercano a la capa adhesiva  $n = 1$  mm.

Los esfuerzos  $E_x$  en el adherente derecho son menores que en el adherente izquierdo de acero al carbón, a lo largo de toda la dirección  $\bar{s}$  debido a que el módulo de Young del adherente derecho es más pequeño que el del adherente izquierdo.

El esfuerzo  $E_z$  en el adherente derecho es más pequeño que en el adherente izquierdo, pero los esfuerzos  $E_z$  distribuidos en ambos adherentes son más pequeños que los encontrados en la dirección  $E_x$ . El esfuerzo al corte  $\gamma_{xz}$  en el adherente derecho es más grande que en el adherente izquierdo cercano a  $\bar{s} = -0.5$  pero es más pequeño cuando  $\bar{s}$  es mayor a  $-0.45$  y su valor es mínimo en  $\bar{s} = 0.4$ .

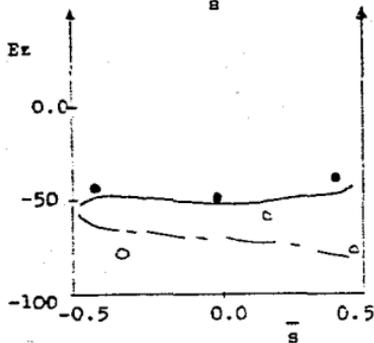
Se puede observar que en el caso de juntas que tienen adherentes de metales disímiles, la distribución de esfuerzos en los adherentes varía grandemente debido a las diferencias en el módulo de Young entre los adherentes. Esto es bastante diferente para una junta que tiene adherentes del mismo metal en donde los esfuerzos varían muy poco.



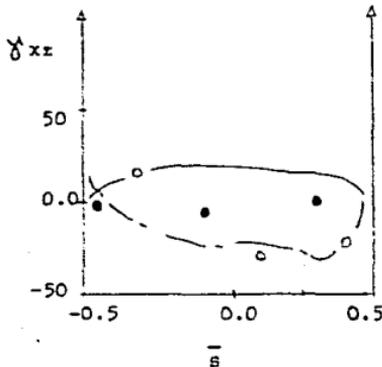
	Cal.	Exp.
adherente izquierdo (ac. al carbón)	—————	●
adherente derecho (latón)	- - - - -	○

Distribución de esfuerzos  
 $E_x, E_z, \gamma_{xz}$  en los adherentes  
izquierdo y derecho.

$L_2 = 50\text{mm.}$   
 $\theta = 11.3$   
 $t_1 = 10\text{mm}$   
 $t_2 = 0.05\text{mm.}$   
 $\sqrt{\sigma_a} = 10\text{MPa}$



	Cal.	Exp.
adherente izquierdo (ac. al carbón)	—————	●
adherente derecho (latón)	- - - - -	○



	Cal.	Exp.
adherente izquierdo (ac. al carbón)	—————	●
adherente derecho (latón)	- - - - -	○

### Resultados experimentales.

Los resultados están de acuerdo con los resultados analíticos. Esto significa que las condiciones límite usadas en este análisis son válidas.

### Predicción de resistencia en uniones.

La resistencia de la junta bajo carga de tensión es predicha usando el método de Von Mises. Aplicando la condición de Von Mises en ambos adherentes y en la capa adhesiva se obtiene la ley de resistencia adhesiva a partir de una carga de prueba combinando tensión y torsión, sobre juntas a tope en tubos de pared delgada.

La condición de Von Mises está representada como sigue:

$$F_1 = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau_{12}^2) / \sigma_{c1}^2 = 1 \quad \text{para el adherente} \dots (1)$$

$$F_2 = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau_{12}^2) / \sigma_{c2}^2 = 1 \quad \text{para la capa adhesiva} \dots (2)$$

donde  $\sigma_{c1}$  y  $\sigma_{c2}$  denotan los esfuerzos límite de adherente y adhesivo respectivamente.

La ley de resistencia adhesiva está representada como:

$$F_3 = (\sigma_n / \sigma_{c3})^m + (\tau_s / \tau_{c3})^m = 1 \dots (3)$$

donde  $\sigma_n$  y  $\tau_s$  denotan los esfuerzos a la tensión y al corte en la interfase adhesiva. En la tabla II se dan las constantes  $\sigma_{c1}$ ,  $\sigma_{c2}$ ,  $\tau_{c1}$  y  $m$  de las ecuaciones de la ley de resistencia (1-3) y  $\sigma_{c2}$  para el adhesivo epoxi es 64 MPa.

Constantes de la ley de resistencia.

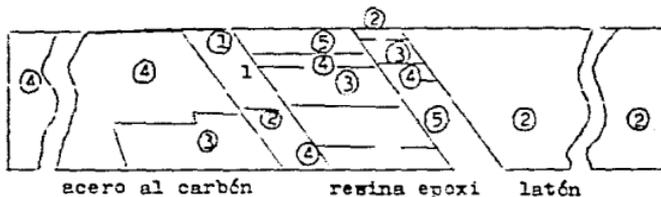
	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	$\tau_{0.1}$	m
acero al carbón	343	31.5	30.8	8.66
aleación de Al	69	41.2	41.2	2.00
cobre	78	47.1	44.2	1.26
latón	118	50.8	48.2	1.05

los valores de  $\sigma_{0.1}$ ,  $\sigma_{0.2}$  y  $\tau_{0.1}$  están dados en MPas.

La resistencia de la junta, calculada aplicando las ecuaciones de la ley de resistencia a el cálculo de distribución de esfuerzos en las correspondientes partes de la junta, se muestran a continuación.

esfuerzo (MPa)

①	0 - 100	$L_1 = 50$ mm.
②	100 - 200	$\theta = 11.3$
③	200 - 300	$t_1 = 10$ mm.
④	300 - 400	$t_2 = 0.05$ mm.
⑤	400 -	



distribución de esfuerzos en la junta.

La distribución de esfuerzos en juntas bajo cargas de tensión y esfuerzos al corte pueden ser analizadas usando el método del elemento finito. La resistencia de la unión se predice aplicando la ley de resistencia a el cálculo de distribución de esfuerzos en la junta. La validez del resultado analítico es confirmada por los resultados experimentales.

La diferencia en el módulo de Young entre los adherentes tiene gran influencia sobre la resistencia de la unión. La junta con metales disímiles muestra una distribución de esfuerzos en los adherentes que varía grandemente, comparada con la junta que tiene adherentes del mismo metal.

En una junta que tiene metales disímiles se propaga una hendidura dentro de la capa adhesiva o interfases y finalmente la junta se fractura más rápidamente.

Importante es recordar lo siguiente, entre más pequeña es la diferencia en el módulo de Young de los adherentes, más grande es la resistencia de la unión. (10)

#### 4.1.2 Análisis de la falla.

La función de una junta adhesiva estructural es transmitir una carga externa a un miembro estructural. Si la junta falla en la función para la que fue intentada, sufrirá daño o hendidura. El daño puede ser la fractura actual de la estructura, deformación elástica excesiva o flujo inelástico excesivo.

Para una combinación dada de adherente y adhesivo, el analista de esfuerzos debe decidir de que modo o teoría de falla, la unión fallaría si las cargas aplicadas llegaran a ser bastante más grandes para causar la falla. La decisión sobre cual teoría realmente determina el modo de falla está comúnmente basada en experiencias pasadas o en alguna forma de evidencia-

experimental. El problema fundamental en la mecánica de adhesivos en juntas, es obtener alguna relación entre las cargas aplicadas a la unión y un parámetro que adecuadamente describa el criterio para la falla estructural. (5)

a) energía de fractura.

Hemos ya considerado algunos ejemplos de los análisis de esfuerzos para geometrías de prueba apropiadas. Viremos ahora para la evaluación de estos análisis por la extracción de un parámetro de fractura o función.

El parámetro el cual se establece por sí mismo como la descripción más útil de la resistencia de la unión es la energía adhesiva de fractura. Los análisis que condujeron a la determinación de estas cantidades están basados en comportamiento elástico, debido a que la estructura teórica del comportamiento de estos materiales es entendida bastante bien.

Cuando la fractura ocurre y se generan nuevas superficies se requiere una cierta cantidad de energía. Esta energía es una combinación de la energía requerida para romper las uniones atómicas a lo largo del camino de la fractura y la energía disipada en la región de alto esfuerzo alrededor de la punta de la hendidura.

La determinación experimental de la energía de fractura involucra la propagación de una hendidura (crack) en la geometría de la unión. Si la hendidura sigue por la interfase se llama energía de fractura adhesiva, mientras que si la fractura involucra la generación de dos nuevas superficies en el adhesivo conduce a la energía de fractura cohesiva.

Cuando la separación de la interfase ocurre, la energía de fractura adhesiva produce una medida de la resistencia de la unión, mientras que una falla a través del adhesivo indica la resistencia del polímero y que la resistencia de la unión interfacial es más grande que la anterior.

Algunas geometrías de unión utilizadas para determinar la energía de fractura son la muestra para prueba al desprendimiento y el modelo de doble viga voladiza.

b) energía de fractura como una función de las propiedades del adhesivo.

En una prueba de resistencia a la fractura como en la técnica del modelo doble viga voladiza, la muestra con una longitud de hendidura "a" está bajo una carga P gradualmente incrementada. La distribución de esfuerzos en la punta de la hendidura para una carga determinada P antes de la propagación de la fractura es dependiente del módulo del adhesivo E y del módulo del adherente E'.

Por medio de explicaciones bien justificadas, S.M. Lee obtuvo las siguientes ecuaciones

$$G = l_p \frac{\sigma_y^2}{E} \dots \dots \dots (4) \qquad G' = \frac{r_p}{6\pi(1-\nu^2)\sigma_y^2} \dots \dots (5)$$

donde:

$\sigma_y$  = esfuerzo límite del adhesivo.

$l_p$  = longitud de la zona plástica.

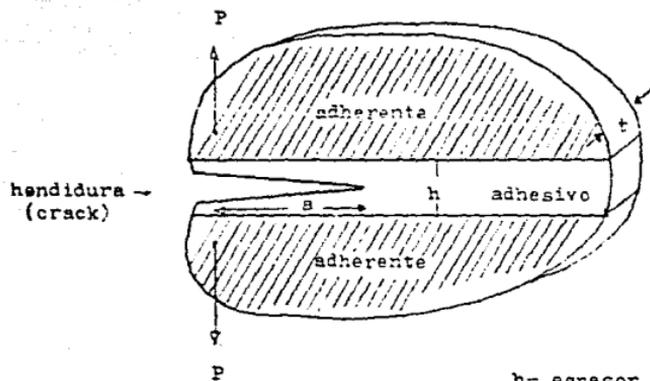
E = módulo de Young del adhesivo

$r_p$  = radio de la zona plástica.

= relación de Poisson.

G = energía de fractura de la junta

G' = energía de fractura de la masa adhesiva.



$h$  = espesor del adhesivo.  
 $t$  = espesor del adherente.  
 $a$  = longitud del crack.

Doble viga voladiza.

Si  $l_p = Sr$  y combinando las ecuaciones, tenemos:

$$G = M (\sqrt{y}/E)^{1+m} G' \dots (6)$$

donde,  $M = 1/(6\pi(1-\nu^2))^{3/2}$

$m =$  una variable que va de  $\lambda$  a 1, dependiendo de cuanto se extiende la zona plástica.

La ecuación (6) relaciona la energía de fractura de la junta con las variables del material adhesivo. La implicación física de esta ecuación es que un material adhesivo deseado para resistir la fractura debe no solo tener una zona plástica bastante larga, si no también un valor de  $\sqrt{y}/E$  alto en esta zona.  $G$  es controlada por el esfuerzo límite del adhesivo ( $\sqrt{y}$ ), el módulo de Young  $E$  y la energía de fractura de la masa adhesiva  $G'$ . (27)

#### 4.2 Pruebas físicas de adhesivos.

Se requiere de métodos de prueba especializados para la evaluación de las propiedades de resistencia de uniones adhesivas. Además de la determinación de la resistencia de la unión, estos métodos proveen un medio para checar la eficacia del proceso usado para hacer las uniones. La resistencia de la unión es invariablemente dependiente de los factores técnicos de unión como aplicación del adhesivo, pretratamiento de los adherentes y condiciones de cura del adhesivo.

Las muestras de prueba requeridas para dar resistencias a la falla reproducibles necesitan ser cuidadosamente diseñadas y preparadas. La mayoría de los métodos de prueba estándar emplean muestras de prueba de tamaño y forma definidos. Los datos obtenidos de los métodos de prueba son útiles para comparar el funcionamiento de varios adhesivos antes de la selección de uno para

un trabajo de ensamble en particular. Debe ser enfatizado que las muestras de prueba escasamente simulan la configuración actual del ensamble y su medio ambiente, por lo tanto, no se puede confiar en ellos para predecir el funcionamiento del ensamble en servicio. (3)

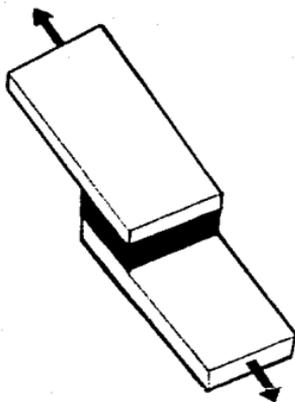
#### 4.2.1 Métodos de prueba estándar.

Son pruebas ya perfectamente establecidas por ASTM en las que diferentes geometrías de prueba son sometidas a un tipo de esfuerzo, dependiendo de los adherentes de la unión y el parámetro bajo estudio. Tenemos métodos para cuantificar la resistencia de la unión hacia diferentes tipos de esfuerzo.

Por ejemplo:

propiedad de resistencia	especificación ASTM.
corte	D 905-64, D 905-49
tensión	D 897-73, D 429-73
impacto	950-73
desprendimiento	D-903-49, D 773-47
división	D 1062-73
flexión	D 1184-69

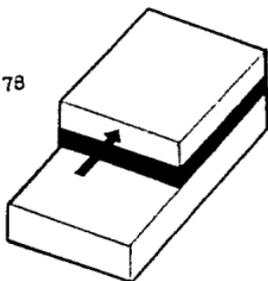
Una clasificación completa de las diversas pruebas físicas aplicables a materiales adhesivos puede ser encontrada en la referencia no. 3.



Prueba para  
resistencia  
al corte.

ASTM D 1002-72

impacto  
ASTM 950-78



desprendimiento

ASTM D773-47

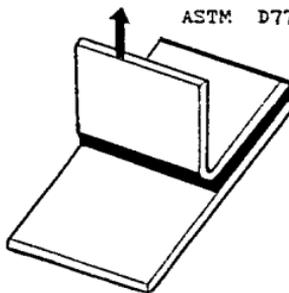


Fig. 5 Pruebas físicas de adhesivos.

El constante desarrollo de los materiales adhesivos y la imperiosa necesidad de información acerca de los factores que influyen en el funcionamiento de las uniones adhesivas ha conducido a investigadores y conocedores de la materia a perfeccionar los métodos de prueba así como la implementación de algunos otros.

Entre ellos se pueden mencionar los estudios de las propiedades de fatiga en placas y láminas de Al de 1 a 5 mm, bajo cargas de amplitud constante y cargas máximas, la resistencia estática al desprendimiento a largo plazo y la resistencia al corte utilizando capas de adhesivo de 0.5-5 mm de espesor con carga o sin carga de Al en polvo,<sup>(30)</sup> estudios para evaluar el efecto del tratamiento superficial de metales y su relación con la habilidad para unirse con adhesivos termofijos al utilizar una intercapa elástica,<sup>(51)</sup> estudios de corrosión por presencia de humedad dentro de la capa adhesiva,<sup>(52)</sup> pruebas de flexión para el estudio de la adhesión de un polímero al acero considerando el tipo de resina, pretratamiento superficial y el tiempo; estudios para evaluar la durabilidad ambiental en uniones a traslape simple.<sup>(65)</sup>

Así mismo se han hecho estudios sobre el efecto de la temperatura en el comportamiento de tensión y de sus propiedades dinámico-mecánicas por medio de los valores de ruptura por esfuerzo y por módulo elástico;<sup>(64)</sup> estudios de muestras expuestas a combinaciones de diferentes tipos de esfuerzos como carga mecánica, temperatura y humedad;<sup>(32)</sup> así como estudios sobre los mecanismos de adhesión entre polímero y metal en base a la química superficial y sus propiedades termodinámicas, estos estudios se utilizaron para predecir la disminución de la resistencia de la unión interfacial cuando un metal unido es sumer-

gido en agua. (39) Por otro lado también se han hecho investigaciones en relación a la estructura del adhesivo y su influencia sobre la adhesión, como por ejemplo el estudio de las propiedades mecánicas de resinas epoxi modificadas con hule; el estudio del efecto del grado de cura en las propiedades físicas y mecánicas de matrices epoxi, (56) y el estudio de la deformación y fractura de un adhesivo altamente entrecruzado sometido a diferentes tipos de esfuerzos. (57)

Entre los resultados obtenidos a partir de dichos estudios se encuentran:

1.- Los valores de resistencia al corte son más altos que los de resistencia estática al desprendimiento, en pruebas a largo plazo. Cuando los espesores de la capa adhesiva ( $g$ ) son de 0.5 a 1 mm la presencia de Al en polvo ocasiona una disminución en los valores de resistencia en comparación con los valores cuando no se incluye carga.

Quando  $g=3$  a 5 mm se observa un incremento en ambos valores de resistencia cuando el contenido de la carga va de 10-30%. (50)

2.- La prueba al desprendimiento PN-69/C-89302 adaptada para evaluar el estado de preparación superficial de metales, mostró que los tratamientos químicos tienen una mayor resistencia a largo plazo que los tratamientos mecánicos.

3.- La cinética y el grado de sorción de agua, la hendidura por esfuerzo-corrosión, la resistencia estática de la unión adhesiva polímero-metal después de someterla a agua dependieron del tratamiento de la superficie mecánica y del arreglo de las capas límite polímero-metal.

4.-El pretratamiento ácido o básico sobre superficies de acero galvanizado incrementa la adhesión de adhesivos epoxi. Así mismo la capa de ruptura inicial puede ser identificada usando la prueba de flexión de los tres puntos.

5.-Una discriminación altamente sensitiva entre diferentes tratamientos superficiales y combinaciones de adhesivos es posible, usando muestras para esfuerzo al corte a traslape simple perforadas.

6.-La resistencia inicial de la junta y la resistencia residual no fueron influenciadas por un tipo simple de esfuerzo ni aún por la combinación de dos tipos de esfuerzos. La combinación de tres tipos de esfuerzo causó falla espontánea en 30 días aún después de exposición a un ambiente húmedo y caliente.

7.-Las propiedades mecánicas de resinas epoxi modificadas con hule son medidas en términos de la dependencia del módulo de tensión elástico sobre la fracción volumen de hule. A mayor fracción volumen de hule, mayor módulo de tensión elástico.

8.-El no. promedio de funcionalidad de la resina y el volumen libre en la matriz curada, gobiernan las propiedades mecánicas y físicas de matrices epoxi.

9.-La deformación plástica juega un papel decisivo en las grandes deformaciones y en la fractura de resinas epoxi altamente entrecruzadas.

Todas pruebas se han realizado utilizando diferentes tipos de adhesivos sobre diferentes metales. Entre los adhesivos sobresalen los epoxi ED 20, ED 20 modificado, FM 73, FM 300K y algunos otros termofijos como el Cyanoran B4, K-153 y Epidian 106. Entre los adherentes más utilizados están Al, acero, acero galvanizado, zinc y cobre.

Podemos apuntar como lo más relevante de lo expuesto anteriormente lo siguiente:

-La característica más deseable de un adhesivo es su habilidad para formar una unión fuerte entre adherentes. A la fecha, las características de unión por sí mismas solo pueden ser determinadas mediante una prueba destructiva.

-La calidad de una unión adhesiva se considera buena, si bajo sujeción de cualquier prueba mecánica, la separación ocurre dentro del adhesivo, lejos de la interfase.

-El análisis de esfuerzos y deformaciones nos informa sobre el comportamiento de la unión y la distribución de esfuerzos en la misma, siempre que los esfuerzos principales en la unión sean al corte y tensión. Las propiedades mecánicas de los adherentes (módulo de Young) contribuyen a la resistencia total de la unión .

-En el análisis de la falla se determina el tipo o modo de falla de la unión y está basado en evidencias experimentales. La energía de fractura es el parámetro que relaciona adecuadamente las cargas aplicadas con un criterio de falla estructural, además está depende de variables del material adhesivo por lo cual se puede aumentar, siempre y cuando se mejoren, el esfuerzo límite del adhesivo ( $\sigma_y$ ) y la energía de fractura de la masa adhesiva ( $G'$ ).

## CAP V. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN ADHESIVOS.

### 1) Avances en pruebas y estudios en películas.

#### a) pruebas de permanencia acelerada.

En el pasado, el número de diferentes sistemas químicos usados en adhesivos para servicio a largo plazo fue bastante pequeño. Las nuevas resinas sintéticas adhesivas fueron introducidas lenta y cautelosamente y fue necesario iniciar exposiciones a largo plazo de juntas para condiciones controladas de laboratorio, o para condiciones climatológicas actuales y demostrar el funcionamiento relativo pocos años antes de que cualquier uso real de estos nuevos adhesivos empezara. Verdaderamente fue necesario conducir y publicar resultados de estas pruebas a largo plazo antes de que los fabricantes intentaran usar los nuevos adhesivos y antes de que los consumidores aceptaran tales productos para situaciones de unión.

Uno de los principales problemas para ambos, desarrolladores y usuarios prospecto, es determinar la probable vida en servicio principalmente en condiciones severas de uso.

Sería deseable contar con métodos de prueba cortos, de unas cuantas horas, que fueran equivalentes a muchos años de exposición continua y ser capaces de asumir que las condiciones de prueba exactamente duplican las condiciones de servicio.

El desarrollo de pruebas de permanencia acelerada que dupliquen en un corto tiempo el funcionamiento esperado por períodos de meses a años aún permanece como un gran sueño, no obstante ya se han hecho algunos progresos. (11)

i) degradación de la unión por corrosión inducida.

Ciclos de corrosión inducida fueron efectuados sobre acero galvanizado y acero rolado en frío para analizar la química interfacial y el efecto de los productos de corrosión sobre la durabilidad de las uniones. Cada ciclo de corrosión comprendió 15 min de inmersión en NaCl acuoso al 5%, un secado de 75 min a temp. ambiente y 22.5 hrs de exposición a humedad estática (85% de humedad relativa y 50 °C). Cinco ciclos fueron completados por semana de prueba. Para el presente estudio las muestras fueron expuestas por 3 semanas y la exposición causó una disminución substancial en la resistencia de las uniones de acero galvanizado. (18)

ii) evaluaciones comparativas en juntas de Al en condiciones de exposición variable.

Es necesidad reciente buscar la forma más económica para evaluar la resistencia a la corrosión en juntas de Al sin la necesidad de ningún equipo especial y en un tiempo relativamente corto.

A continuación son comparadas tres condiciones de prueba para determinar la agresividad relativa de cada procedimiento y cual de ellos es más sensitivo a la corrosión por rocío de agua salada y por lo tanto más adecuado para evaluar la durabilidad de uniones adhesivas de Al.

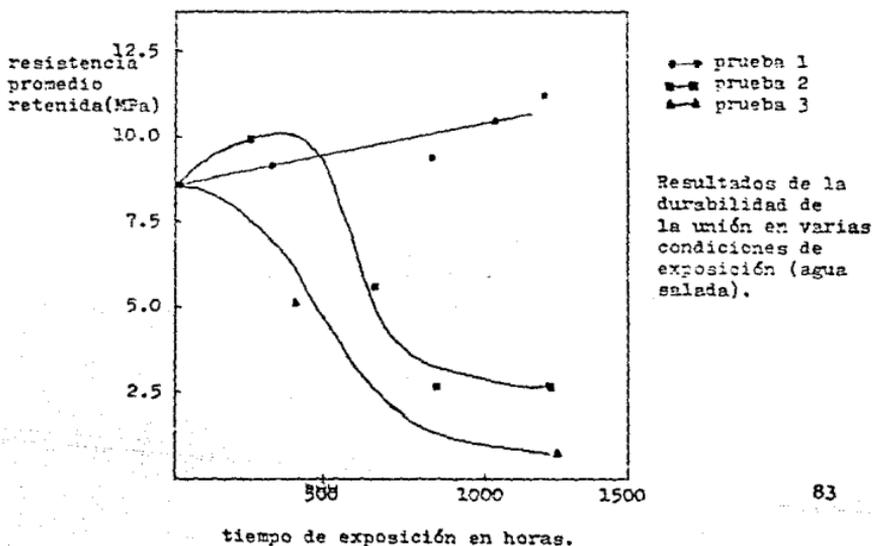
#### Condiciones de prueba.

- 1) ASTM B117 consiste en exposición continua a 35 °C en una niebla generada con una solución al 5%.
- 2) El procedimiento de "Alcoa international" basado en la inmersión por 10 min cada hora en una solución de NaCl al 3%

3) Un método modificado por Minford, que consiste en un proceso de inmersión durante toda la noche en una solución al 3% de NaCl y un secado de 3 hrs a temperatura ambiente.

La exposición a condiciones cíclicas húmedas/secas (prueba 3) mostró una sensibilidad mucho mayor para identificar la corrosión en agua salada dentro de un período de menos de 500 hrs. Por medio de las condiciones de prueba 3 podemos obtener información acerca de la durabilidad de una unión adhesiva de Al a la corrosión en un tiempo relativamente corto (500-1000 hrs).

Estas condiciones de servicio pueden ser encontradas en cualquier región cercana al mar (costas, playas, puertos) y los resultados de la prueba podrán hacerse extensivos para ponderar una posible vida de servicio en ambientes similares. (25)



b) pruebas no destructivas.

Propiedades como la constante dieléctrica, el módulo dinámico, la conductividad térmica y la habilidad para transmitir sonido o radiación pueden ser medidas por técnicas no destructivas y usadas para diferenciar entre uniones de alta y baja resistencia. El objetivo de estos métodos es determinar si la unión adhesiva es satisfactoria sin destruirla.

Los procedimientos de prueba no destructivos están sujetos a mucha investigación reciente y muchas de las técnicas aún necesitan ser establecidas como medios confiables para checar el funcionamiento de la unión. (3)

Las pruebas no destructivas sobre juntas, serían muy útiles para medir cambios en las uniones durante periodos de exposición a varias condiciones ambientales. La misma muestra podría ser probada repetidamente a intervalos durante la exposición y así eliminar los problemas que se originan con muestreo estadístico a un gran número de muestras para ser destruidas en intervalos, como se hace actualmente en los exámenes de permanencia.

Diets y sus compañeros han utilizado un procedimiento de prueba ultrasónica para estudiar muestras metálicas expuestas al calor y con carga a la tensión. Todavía permanece la pregunta de si las condiciones ultrasónicas repetidas afectarían la junta misma o si tales pruebas no destructivas pueden adecuadamente exponer pequeños cambios en la calidad de la unión con diferentes adherentes y sistemas adhesivos. (11)

Se están realizando pruebas no destructivas usando un patrón de interferometría electrónica atómica en uniones adhesi-

vas afectadas por la entrada de agua, para detectar áreas desunidas causadas por la penetración de agua dentro de juntas metal-metal a traslape simple. El método opera detectando las ligeras diferencias en movimiento entre áreas unidas y desunidas producidas por carga mecánica. Las pruebas son hechas sobre uniones adhesivas con epoxi-poliamicida en muestras de acero sujetas a pruebas ambientales prolongadas en agua fresca a 40 °C. La técnica puede detectar áreas totalmente desunidas, pero no áreas solo debilitadas por la penetración de agua. (66)

c) estudios en películas adhesivas.

Uno podría cuestionar la conveniencia para estudiar las características de permanencia de películas adhesivas completamente separadas de adherentes y juntas, por ejemplo películas adhesivas moldeadas sobre vidrio o sobre plásticos hidrocarburofluorados. Se ha hecho un trabajo limitado acerca de este punto de tiempo en tiempo.

Uno de los principales obstáculos ha sido la falta de un criterio significativo para observar y caracterizar cambios en dichas películas durante el envejecimiento, que puedan ser correlacionados con cambios actuales en las juntas mismas. En el presente, los cambios en la calidad actual de la junta son analizados en alguna forma de muestra para prueba mecánica, por tanto, el posible uso de recientes análisis instrumentales sobre estas películas aisladas deberá continuar en estudio. En estos estudios de películas moldeadas aisladas, se evita cualquier posible influencia de los adherentes sobre las propiedades de la película adhesiva.

Existe evidencia empírica considerable para sugerir que los adherentes pueden tener efectos importantes sobre la película adhesiva por medio de posible orientación, cambios en la actividad del solvente, efectos químicos del catalizador en la interfase y las simples alteraciones de las condiciones tiempo-temperatura-presión usadas para convertir el adhesivo fluido a el estado sólido curado. Tales influencias de los adherentes podrían ser determinadas formando juntas en la forma usual y luego disolviendo o destruyendo, de alguna manera los adherentes sin afectar la película por sí misma. Esto es medianamente fácil de hacer con metales como el Al y adhesivos muy durables. El efecto de tal tratamiento sobre la película es aún cuestionable y son necesarios mejores medios para evaluar cambios en la película resultante. (11)

## 2) Velocidades de cura.

Siempre será preferible contar con sistemas adhesivos cuya cura se realice en el menor tiempo posible. A excepción de los cianacrilatos, en donde algunas formulaciones curan en minutos, todos los otros adhesivos estructurales requieren de un tiempo considerable de cura.

### i) adhesivos de cura rápida para metales.

El tiempo de cura de Epilox T20-20/DPTA, un adhesivo epoxi, sobre una aleación de Al (ALMg3P26) fue reducido de un 25-50% por medio de cura con choque térmico. Las muestras de prueba fueron calentadas a  $95^{\circ}\text{C} \pm 3'$  en 1.5 min y enfriadas de 3-5min entre pistones de acero frío y luego aproximadamente 5 seg en agua a  $20^{\circ}\text{C}$ . La dureza final fue alcanzada en una post-cura a temperatura ambiente por 6-8 hrs. La resistencia al corte por-

tensión y la resistencia en el agua fueron significativamente incrementadas por el entrecruzamiento, aumentado a partir de la cura con choque térmico. (35)

Gracias a los procesos de cura por choque térmico ya existen adhesivos epoxi que requieren tiempos de cura que van desde unos pocos minutos a segundos, como por ejemplo el sistema Epilox EGE 19/W3 que ya ha sido descrito. (43)

ii) mecanismos de aceleración en reacciones de cura.

Otra forma de curar más rápido es por medio de aceleradores incorporados en la formulación. Se han hecho grandes esfuerzos y la investigación continua acerca de los mecanismos de aceleración en reacciones de cura.

Así tenemos el estudio de los mecanismos que involucran algunos de los aceleradores más comunes en las reacciones de cura de resinas epoxi usando sistemas modelo (fenil diglicidil eter) especialmente notando reacciones de oligomerización del anillo oxirano en presencia de aminas terciarias. (58)

### 3) La interfase polímero-metal.

Uno de los mayores problemas de los adhesivos en general y de los basados en cianoacrilatos en particular, es su pobre resistencia a la humedad. A pesar de la acumulación de datos sobre el efecto de la humedad en la resistencia de adhesivos estructurales, el mecanismo de falla no está completamente entendido. Falconer examinó la respuesta de juntas adhesivas epoxi a condiciones de alta humedad y sugirió la existencia de materiales en la interfase, los cuales eran más sensibles al agua que la mayor parte de la masa principal del polímero. Las uniones acero-acero rápidamente pierden fuerza cuando son expuestas a

la humedad, debido a que el agua difunde a través de la interfase óxido metálico/adhesivo causando debilitamiento de la capa de óxido por acción del óxido férrico. La fuerza adhesiva también puede ser reducida por degradación hidrolítica del adhesivo, comenzando en la interfase y progresando hacia el centro del ensamble. Este proceso es catalizado por los productos de corrosión del sustrato metálico, por el agua condensada en la interfase.<sup>(9)</sup>

El daño y degradación de juntas adhesivas en metales puede originarse por envejecimiento (cambio debido a la acción del tiempo), solventes, calor, humedad, vapor, influencias biológicas, factores climatológicos o cualquier número de químicos. Sea cual sea la condición a la que está sujeta la junta, se ha observado que la parte más susceptible de la unión y donde se origina la falla es la interfase polímero-metal.

Algunos estudios teórico-experimentales sobre la interfase polímero-metal han arrojado algunas conclusiones.

-La adhesión en la interfase polímero-metal esta grandemente influenciada por la condición microscópica (morfología superficial) de la superficie del metal y por la resistencia compuesta (condiciones macroscópicas).

-La funcionabilidad del adhesivo afecta la adhesión, especialmente para algunos metales (cobre por ejemplo).

-El estado energético, el potencial eléctrico de la superficie y el tratamiento superficial afectan la adhesión en la interfase polímero-metal.<sup>(53)</sup>

-El coeficiente de difusión del agua es más grande en la interfase que en los adhesivos y la velocidad de absorción de humedad puede ser determinada por la difusión de agua en la interfase.

Hay necesidad de mucha investigación fundamental sobre los mecanismos y cinética de deterioración de los varios sistemas adhesivos, de entre ellos los epoxi han recibido la mayor atención.

La formación de capas adhesivas de la resina epoxi bisfenol A (ED 20) curada con polietileno-poliamina sobre la superficie de acero y otros materiales es efectuada para estudiar las propiedades de la interfase y su posible regulación. Se determinaron los cambios en parámetros cinéticos en la formación de la capa adhesiva, la composición de la capa y propiedades termodinámicas del sustrato, y se concluyó que disminuyen la resistencia del polímero en la zona adhesiva. Las propiedades de la interfase adhesivo-sustrato pueden ser controladas por cambios en temperatura o composición del adhesivo o por la adición de un surfactante catiónico (Bromuro de octiltrimetilamonio) el cual bloquea la alta energía superficial del sustrato y elimina su efecto negativo sobre la formación del adhesivo, ocasionando un incremento en la resistencia de unión de los adhesivos epoxi curados en frío. (69)

#### 4) Mejoras en adhesivos epoxi.

Algunas de las desventajas de los adhesivos epoxi son por ejemplo: baja resistencia a la humedad, no curan en presencia de agua etc. Veamos ahora que se está haciendo para atacar estos puntos débiles y algunas otras mejoras relacionadas con las resinas epoxi.

##### i) nuevas formulaciones.

Tactix 695 es una nueva clase de resina epoxi tolerante al daño, que suministra una combinación no obtenible antes de rigidez y  $T_g$ , lo cual permite que el uso de materiales compuestos ligeros de alta resistencia sea extendido a nuevas áreas.

Alcanza resistencias a la tensión tan altas como las obtenidas para resinas epoxi modificadas con hule y aproximándose a las de los termoplásticos ingenieriles, sin depender de los efectos de una fase secundaria la cual causa problemas en varias áreas de la fabricación del compuesto. También evita los problemas de viscosidad asociados con la interpenetración de redes poliméricas epoxi/termoplástico. Al igual que en las nuevas matrices termoplásticas, la procesabilidad de la resina epoxi convencional es retenida. Esta resina es representativa de una familia de epoxi-resinas termoplásticas las cuales pueden ser acabadas para satisfacer una variedad de requerimientos de proceso. (61)

ii) aumento de la resistencia en condiciones húmedas.

Una muestra de lo que se está haciendo para atacar la baja resistencia a la humedad, es la síntesis y prueba de agentes acoplantes (beta-dicetonas) para mejorar la durabilidad de epoxi-acero. Adhesivos para la unión de juntas de acero en presencia de humedad comprenden, una resina epoxi aplicada sobre la superficie del acero, el cual previamente es tratado con Citrato de Amonio para eliminar el óxido y luego con un agente acoplante (betadicetona) por ejemplo dibenzoilmetano. El tratamiento suministra buena resistencia tanto en juntas secas como en húmedas. (45)

iii) inhibidores a la hidratación en uniones adhesivas.

El uso de varios ácidos aminofosfónicos como inhibidores a la hidratación para mejorar las propiedades de estructuras de Al unidas adhesivamente, es investigado mediante pruebas mecánicas (doble traslape al corte, desprendimiento T)=

integrales y fracturadas (prueba de la cuña). Cada uno de los inhibidores probados es compatible con adhesivos epoxi en un ambiente seco y la mayoría lo es en un ambiente caliente y húmedo.

El inhibidor NTMP (ácido fosfónico nitrilotrismetileno) mostró que la hidratación del óxido podría ser disminuida de forma que la propagación de la fractura ocurra antes de ello. En este caso la liga más débil de la unión es el acoplamiento del inhibidor al adhesivo. Inhibidores diseñados para fortalecer este acoplamiento fueron sintetizados y están siendo examinados. (44)

iv) epoxi curables en agua.

Composiciones epoxi de dos componentes curables en agua ya están disponibles. Los sistemas adhesivos comprenden:

I) una resina epoxi con una composición de 70-99% de resina epóxica no acrílica (promedio 1.7 grupos epoxi) y una resina epoxi acrílica 1-30% con promedio de 1.7-2.3 de grupos epoxi.  
II) un componente endurecedor de poliamida-amina (promedio 1.7 de grupos amino secundarios o primarios).

Los dos componentes fueron combinados y usados para unir hojas de acero en agua con resistencias de unión de  $12 \text{ Kg/cm}^2$  contra  $5 \text{ Kg/cm}^2$  para un adhesivo preparado sin la resina epoxi acrílica.

v) resinas epoxi de alto peso molecular mejoradas con bisfenol S.

Bisfenol A, bisfenol S y epíclorohidrina son polimerizados en un sistema acuoso alcali-dioxano usando polioxietileno como catalizador para la transferencia de fase.

El peso molecular de la resina epoxi aumentó cuando se incrementó el contenido de bisfenol S y el tiempo de polimerización. La temperatura óptima de polimerización es de 80-90°C y la atmósfera alcalina adecuada fue 1.2-1.5 veces la de los bisfenoles. El punto de fusión y la temperatura de descomposición de la resina epoxi es de 40°C más alta. (70)

vi) propiedades viscoelásticas.

Las propiedades viscoelásticas de una resina epoxi basada en bisfenol A que contiene oligómeros epoxi alifáticos como modificadores elastificantes y UP607 como agente de cura son estudiadas para determinar el efecto de la elastización sobre las propiedades viscoelásticas de resinas epoxi en un amplio rango de condiciones de deformación bajo carga cíclica.

Las propiedades de rigidez y deformación de la fractura dependen de la estructura topológica. Los ligantes elásticos con propiedades viscoelásticas mejoradas son obtenidos por la introducción de fragmentos de largas cadenas de oligómeros epoxi DE91 y TE91 y agente de cura UP607 en la resina epoxi basada en bisfenol A.

La estructura y arreglo estructural durante la deformación depende de la velocidad de la deformación y afecta mucho en la degradación del polímero y su pérdida mecánica durante la carga cíclica. El copolímero ED16-TE91-UP607 tiene las mejores propiedades viscoelásticas como resultado del arreglo estructural. (67)

vii) composiciones epoxi resistentes al agua.

Composiciones epoxi a prueba de agua con adhesión incrementada contienen 0.5-2.0 partes de elastómero termoplástico butadieno-estireno y 1.5 partes de terpentina en adición a la-

resina epoxi (10-50), polietilenamina 1-5 y bitumen líquido de 5-10 partes. (48)

-Un sistema adhesivo con resistencia a el agua incrementada, contiene 27.6 a 35% peso de isobutilfenil eter como plastificante, 1.8 a 5.6% de hidroxiterpenteno en adición a una resina epoxi (52.6-61.4) y amina como endurecedor (7.9-9.2). (58)

viii) otros estudios.

Otros estudios en relación a los adhesivos epoxi incluyen la caracterización de los mismos por DSC durante el entrecruzamiento y las propiedades mecánicas. Los cambios de entalpía y la necesidad de una temperatura suficientemente alta también fueron consideradas dentro de este estudio.

Así mismo se ha enfatizado por medio de otros estudios, que las propiedades más importantes durante el diseño de adhesivos epoxi son la Tg, la deformación interna, la resistencia al calor de la composición, las propiedades adhesivas de la resina entrecruzada y la adhesión por enlaces covalentes. (53)

#### 5) Progresos en adhesivos para altas temperaturas.

Para el funcionamiento a altas temperaturas son encontrados dos problemas distintos. El adhesivo puede solo ablandarse termoplásticamente y perder resistencia sin ninguna degradación química significativa. Este es un efecto inmediato notado dentro de pocos minutos a una temperatura elevada. Muchas veces el adhesivo recobrará su resistencia inicial si es enfriado de nuevo a temperatura ambiente antes de ser probado para destrucción.

Un problema más extensivo pertenece a la degradación debida a la oxidación y cambios químicos relacionados con altas temperaturas. En tales casos, hay distintas indicaciones=

de que el metal adherente puede tener efectos específicos sobre tal deterioración, efectos que son característicos del tipo químico de adhesivo. Esto es ciertos adhesivos como los copolimeros de butadieno y ciertas poliamidas funcionan mejor en aceros resistentes a la corrosión, si se calientan para envejecimiento por 100-200 hrs a 500°F, mientras los epoxifenol son más prometedores sobre Al a las mismas condiciones particularmente cuando el adhesivo está modificado con ciertos compuestos inorgánicos como trióxido de arsenico o dióxido de manganeso.

Estos hallazgos relacionados, sugieren la necesidad de considerar la estructura polimérica del adhesivo y la formulación del adhesivo por sí misma a la luz del metal adherente como una interfase químicamente activa para el funcionamiento en altas temperaturas, no solo para asegurar adhesión inicial adecuada, si no para alcanzar buen funcionamiento en cambios debidos a la acción del calor. (11)

Debido a la continua elevación de los requerimientos de temperatura, el interés se está dirigiendo hacia adhesivos inorgánicos y cerámicos. Los adhesivos inorgánicos resistentes al choque térmico están compuestos por: Fe, Ag, o Cu en polvo con tamaño de partícula menor o igual a 444, mica natural o sintética o algún otro material laminar por ejemplo bentonita o caolinita y silicato de Na o aluminato de Na como ligante. Los adhesivos pueden ser usados para unir metal-metal, metal-cerámica y metal-vidrio. La resistencia de las uniones después de 50 ciclos térmicos con calentamiento rápido hasta 500°C es de 40-65 KG/cm<sup>2</sup>.

Como ya se mencionó, los materiales poliméricos de mayor resistencia contra el calor son las poliimidas (PI). Estas sin embargo, presentan la desventaja de no ser manejables.

Una nueva poliimida procesable es obtenida al tratar el 1,3-bis(2 (3 aminofenoxi)etil)eter con anhídrido 3,3,4 benzo-fenotetracarboxílico en N-metil pirrolidina para formar un ácido poliamídico intermedio y después convertirlo en una poliimida procesable. Las propiedades físicas tales como la estabilidad térmica, resistencia a solventes, Tg, viscosidad y propiedades mecánicas como rigidez de fractura, adhesión a la película y propiedades del compuesto fueron reportadas como excelentes. El polímero tiene alta resistencia a la tensión para Ti-Ti.

Igualmente la poliimidatermoelástica LARC-TPI ya ha sido reportada para aplicaciones funcionales y estructurales en naves espaciales. Estos materiales son capaces de soportar 32000 hrs a 300 °C sin deterioro de sus propiedades mecánicas. (55)

#### 6) Perspectivas de aplicación en la industria automotriz.

La unión de partes automotrices mediante el uso de adhesivos es una realidad. Partes automotrices han sido calentadas en su superficie adherente de 70-150 °C por medio de calentamiento de alta frecuencia, luego revestidas con un adhesivo sólido (XD 3499) y unidas entre sí. (34)

Más aún, un vehículo terrestre a base de Al fue construido adhesivamente para demostrar la posibilidad de omitir la soldadura.

El potencial para compuestos de alto funcionamiento en aplicaciones automotrices estructurales es muy grande ya que existen compuestos específicos muy promisorios y procesos de fabricación viables. Las propiedades particulares de mayor re-

levanza para aplicaciones automotrices ya han sido presentadas junto con un escenario para la extensión necesaria de conocimientos requeridos antes de que alta confianza pueda ser establecida en la aplicación estructural de los materiales adhesivos. Mientras todas las herramientas básicas y materiales como programas de computadora, determinación de la tenacidad del adhesivo, técnicas de preparación y métodos de caracterización simplificados están llegando a ser disponibles, pasará todavía algún tiempo antes de que los muchos aspectos involucrados puedan ser exitosamente conjuntados dentro de una tecnología práctica de trabajo, capaz de producir automóviles unidos con adhesivos a una escala industrial. (33,42)

## CAP VI. APLICACIONES.

En cada esfera de la actividad industrial y especialmente en aeronaves, automóviles, industria naval, industrias eléctrica, electrónica y en la ingeniería civil, los adhesivos son comúnmente usados tanto para la unión de metales como para la de materiales disímiles.

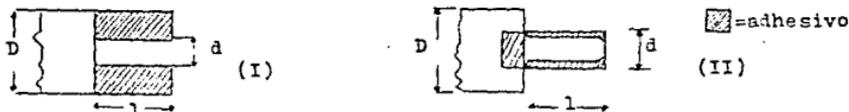
Los diseñadores, arquitectos e ingenieros han llegado a estar completamente enterados de las propiedades sobresalientes de estos materiales y los especifican regularmente. En esta sección también mencionamos los campos de uso restantes para adhesivos en la unión metal-metal; los ejemplos considerados han sido escogidos principalmente para ilustrar su versatilidad y las muchas diferentes aplicaciones que son posibles. (2)

### Situaciones de sujeción diversas.

1.-Hay varios medios mecánicos para fijar un perno que sostiene una carga a una superficie; usando una tuerca, atornillándolo, remacharlo o usar una clavija. El método más simple es la unión adhesiva, ya sea usando un adhesivo epoxi que cura a temp. ambiente o en caliente. Se pueden obtener esfuerzos de fallo de  $14 \text{ KN/mm}^2$  y  $28 \text{ KN/mm}^2$  respectivamente con un perno cilíndrico de 12 mm de diámetro unido 25 mm dentro de la base de la placa.

2.-El uso de un adhesivo epoxi para unir un buje de soporte a una palanca en vez de que el buje sea presionado y asegurado con tornillos ha llevado a economías en tiempo y costo. La necesidad de un maquinado de tolerancia cerrada es eliminada, ocasionando una reducción en los costos de producción, un incremento en productividad y una reducción en rechazos.

3.-Un buen ejemplo en donde la unión adhesiva puede conducir a economías en materias primas y maquinado, es el caso general de unión de un eje a una chumacera (gorrón). Si el eje está hecho de un material sólido la siguiente utilización de material y factores de maquinado aplican para diferentes tamaños de eje:



diámetro del eje(D) (mm)	utilización de material (%)	factor de maquinado (%)
40	39	61
50	25	75
60	17.5	82.5

donde el factor de utilización de material es la relación entre el peso de la parte acabada y la semiterminada, en este caso  $(d/D)^2 \times 100$ .

Si la chumacera (gorrón) es hecha a parte y unida al eje (ejem. II) puede usarse una barra de acero sólida en este caso las proporciones dadas arriba son:

diámetros(mm)	utilización de material (%)	factor de maquinado (%)
a) para el eje		
D= 40	51	49
D= 50	68	32
D= 60	78	22
b) para el gorrón d=25    d <sub>1</sub> =28	82	18

Otras dimensiones relevantes son la profundidad del barrenado ( $i=40$  mm) y el área unida ( $A=3500$  mm<sup>2</sup>). Cuando un adhesivo epoxi es usado en vez de hacer la chumacera de la barra sólida por maquinado, los datos muestran que existe una reducción en la cantidad de maquinado y un mejor aprovechamiento del material.

4.-En ingeniería mecánica pueden hacerse ensambles complicados uniendo moldes fundidos simples por unión adhesiva. La cantidad de rechazos de un fabricante de bombas fue reducida de un 25% a casi 0% usando este método. Originalmente la parte de la bomba era vaciada en una sola pieza, pero debido a la complejidad de su forma interior a menudo ocurrían muchas burbujas lo cual ocasionaba altas proporciones de rechazos. Formas fundidas simples y la unión de ellas con un adhesivo elimina la necesidad de hoyos para pernos y pestañas, requeridas para la sujeción mecánica, reduciendo la cantidad de rechazos drásticamente.

5.-Abundan otros ejemplos en el campo de la ingeniería mecánica. Herramientas de corte de metal y cerámica pueden ser unidas a mangos o cabezas de corte (metal a puntas de carburo, por ejem) usando un adhesivo epoxi que cura entre 100 y 200°C. Los adhesivos son usados también para la unión de componentes metálicos de maquinaria en la construcción de máquinas-herramientas.

6.-Los adhesivos han sido exitosamente usados para unir y sellar cabezas de tanques a tubos en equipo, como intercambiadores de calor tubulares y separadores de aceite. El método tradicional para asegurar los tubos a las tapas es por medio de soldadura, pero se ha encontrado que la unión adhesiva es un método más confiable.

La cabeza a presión de un tanque de amoniaco líquido en un cohete aéreo de investigación fue unida y sellada con una película adhesiva especial.

7.-Semerdjiev reportó el desarrollo de un eje-rueda fijo. El objetivo era la reducción de peso y altos esfuerzos internos y eliminar ruidos resonantes (sonoros), desventajas que el equipo convencional de acero poseía.

En el diseño prototipo se usó un eje hueco fabricado de varios tubos de pared delgada colocados y unidos por dentro uno con otro. Los cojinetes de acero forjado también fueron unidos dentro de la flecha eje. Las ruedas consisten en una cubierta laminada de fibra de vidrio-epoxi, sobre los cantos de las cuales se une un arco de acero como superficie de apoyo. Los rodamientos son unidos a la flecha-eje. El conjunto en total pesó 500 kgs y tuvo una capacidad para llevar carga de 20 000 Kgs, comparado con un conjunto convencional con la misma capacidad de carga el cual pesa 1230 Kgs. Habría por tanto un ahorro del 60% en peso, si el nuevo conjunto de rodamientos fuera puesto en servicio. (2)

8.-Un ejemplo en la industria de la ingeniería ligera es el de un artículo que es cubierto con un adhesivo, en el cual son esparcidas sobre el adhesivo, partículas de un material conductor que tienen una forma determinada, el artículo es unido a otro artículo, dando una capa adhesiva eléctricamente conductora. Así un adhesivo epoxi y partículas esféricas de Cu fueron usadas para unir una placa de metal a otra, siendo la unión eléctricamente conductora. (40)

9.-Un ejemplo relevante tomado de la industria de ingeniería ligera es el del calentador doméstico de parafina, en el cual los adhesivos epoxi no solo producen un artículo más barato, si no también más fuerte, mejor diseñado y un artículo más fácil de vender. Al principio el tanque de la parafina era hecho de dos partes básicas que comprendían una base de latón resistente a la corrosión, a la cual era soldada la otra mitad, una placa delgada superior. El ensamble era después pintado y la junta soldada y sellada por dentro para prevenir fugas.

En años recientes se encontró dificultad creciente para obtener mano de obra calificada para la operación de soldadura y era indeseable trabajar con fundentes que tenían que ser lavados y neutralizados. Conforme la proporción de personal femenino aumentó fue necesario modificar el proceso de manufactura para eliminar la operación de soldadura.

El problema de la corrosión fue superado por el uso de acero pre-pintado, sin requerir ninguna pintura posterior y por medio de una unión adhesiva o mecánica el tanque fue unido y la junta sellada en una sola operación. Esto fue logrado aplicando el adhesivo a los bordes de ambas mitades y luego ensamblando y remachando la costura. El tanque fue pasado a través de un horno-túnel, endureciendo el adhesivo sin ningún método complicado de localización y sujeción de las dos mitades unidas.

El adhesivo también funcionó como un sello garantizado a lo largo de toda la unión. Al mismo tiempo fue posible fijar otros accesorios auxiliares al tanque por medio del adhesivo. De esta forma, todas las partes que son adicionadas al tanque son unidas en una sola operación, de modo que después de que el artículo ha pasado a través del horno-túnel virtualmente todas las operaciones de ensamble han sido completadas.

Como resultado del rediseño del proceso de manufactura se eliminaron la soldadura y la pintura, por el uso de adhesivos y acero pre-pintado. La operación de ensamble es simplificada, ya que es llevada a cabo totalmente dentro de una área de la planta y todas las uniones adhesivas son curadas en un solo paso por el horno-túnel. Mano de obra no calificada puede ser usada, debido a que el adhesivo es distribuido automáticamente=

y la aplicación y ensamble de las partes, las cuales ya han sido preparadas y colocadas, son procesos simples.

Se estima que no obstante que el proceso es menos costoso, ya que la soldadura y la pintura se eliminan y la mano de obra calificada se reemplaza, la ventaja principal es que se está produciendo un producto más resistente, confiable y por tanto más competitivo a un costo menor.

10.-Otro ejemplo en el campo de la ingeniería ligera es el modelo chasis automotriz. Aquí tenían que ser unidos una matriz fundida de zinc y dos imanes rectangulares insertos. La unión de estos dos materiales por soldadura es muy problemática. Podría ser con soldadura de plata a muy alto costo y requeriría de los servicios de mano de obra calificada a elevados salarios; además habría el riesgo de incendio en la pieza fundida de zinc o causar desorientación o fragilidad en los imanes y podrían aumentar el número de piezas rechazadas.

En esta situación un adhesivo puede dar mucho mejor resultado a un costo más bajo. Los requerimientos básicos eran una alta resistencia al corte, resistencia contra aceite, lubricantes, vibración y abrasión. Un adhesivo epoxi satisface todos estos requerimientos, permitiendo que el chasis sea ensamblado a menor costo y con pocos rechazos.

11.-Uno de los usos de tipo ingenieril en la industria electrónica consiste en la fabricación de radio-cabinas libres de distorsión. Originalmente las cabinas requerían 150 puntos de soldadura y constantemente fallaban en pruebas cíclicas de presión las cuales simulaban la expansión térmica sufrida por los compartimientos. Ninguna falla fue experimentada cuando la soldadura fue reemplazada por una junta continua unida adhesivamente.

La misma organización usó un adhesivo epoxi para sellar una caja suministradora de potencia para aguantar una prueba de impermeabilidad al aire de 25 psi. El uso del adhesivo fue menos caro y confiable más que la soldadura, elimina la necesidad de sellos y empaques separados. Los costos generales de producción fueron reducidos en un 50%, la fabricación con tolerancias estrechas fue posible y la apariencia del producto fue mejorada, comparada con la construcción soldada.<sup>(2)</sup>

12.-Substratos metálicos flexibles para circuitos impresos son preparados por unión de dos laminillas con un adhesivo que consiste en una resina termofija y un hule. El proceso de endurecimiento de la capa adhesiva sobre las dos laminillas es retardado, de forma que las láminas sean colocadas juntas cuando una o ambas capas adhesivas están en estado gel.

El adhesivo resultante de la combinación de bisfenol A, hule nitrilo, sulfato de diaminodifenilo, imidazol y metil etil cetona (solvente) fue revestido sobre una hoja de Cu electrolítico, la laminilla fue calentada 15 min a 150°C formando una capa adhesiva de 20 $\mu$  de espesor. El tiempo de gelación para el adhesivo fue de 10 min a 150°C; así mismo el adhesivo fue aplicado sobre una hoja delgada de Al calentada 3 min a 150°C formando una capa adhesiva de 20 $\mu$ . Las dos hojas fueron calentadas 60 min a 170°C y 70 Kg/cm<sup>2</sup> formando un substrato metálico flexible. El substrato tuvo resistencia al desprendimiento de 1.9 Kg/cm<sup>2</sup>, resistencia a el aislamiento de 1.0x10<sup>13</sup> y una caída de voltaje de 3 Kv(dc).<sup>(33)</sup>

No obstante lo anterior, el mayor uso de los adhesivos en circuitos impresos, es el de la adhesión de conductores a la base aislante.

Los requerimientos de un adhesivo para poder ser usado en circuitos impresos son: 1) propiedades eléctricas al menos equivalentes a la base aislante 2) buena unión a cobre y a plásticos laminados termofijos 3) retención de la unión en proceso (a través de soldadura y electronlateado) y en servicio (bajo degradación térmica, choque térmico, vibración etc.) 4) no corrosión de cobre u otros metales 5) volátiles no dañinos.

Hay muchas otras aplicaciones para adhesivos en circuitos impresos incluyendo el uso como un sustituto de la soldadura cuando se hacen conexiones eléctricas. Estas soldaduras en frío son comúnmente basadas en resinas epoxi con polvos de plata, sin embargo otros adhesivos contienen otras cargas conductoras. La mayoría de los polvos metálicos forman óxidos no conductores y sulfuros, por esto el uso de la plata. En general es necesario emplear entre el 25 y el 30% en volumen de la carga de plata para suministrar la conductividad adecuada. (13)

13.-En la industria de la construcción aérea y aeroespacial, las modernas estructuras de aeronaves como en aviones supersónicos y misiles colocan gran énfasis en las ventajas que son ganadas a partir de técnicas de unión adhesiva, incluyendo la necesidad de superficies aerodinámicas suaves, libres de proyecciones, la muy eficiente distribución de esfuerzos de un miembro o otro, la reducción de concentración de esfuerzos, común en los medios mecánicos de sujeción; y la reducción en peso por el uso de paneles rígidos e inflexibles de hojas de metal delgadas unidas a centros celulares de metal o plástico reforzado.

Los requerimientos extremos de funcionamiento pueden a menudo ser satisfechos mejor con componentes unidos adhesivamente=

y por consiguiente, el adelanto y desarrollo de un número de adhesivos modernos de nueva naturaleza química, de los cuales los adhesivos epoxi son los más usados en el presente en esta industria.

El avión B-58 Hustler de la fuerza aérea de USA tiene el 85% de su revestimiento metálico exterior unido adhesivamente, gran parte de ello con adhesivos epoxi, utiliza 4500 ft<sup>2</sup> de paneles unidos y requiere 900 lbs de adhesivo por aeronave, reemplazando 500,000 remaches, tal construcción se espera soporte 30 000 horas de servicio a 325 °F.

La aereolínea "F 27 frindship" y la "F 28 fellowship" también emplean grandes cantidades de adhesivos en apoyo a cargas primarias y estructuras secundarias.<sup>(1)</sup>

Los paneles alveolares unidos con epoxi, poseen alta resistencia y relación de peso, junto con una buena resistencia térmica y vibracional; son ampliamente usados en aeronaves para fuselaje de puertas, paneles laterales, pisos, elevadores, timones de dirección y proyecciones de ajuste.

Los helicópteros también usan componentes alveolares para ensambles de ranura, armazones de pisos, rampas de carga y en las paletas del mismo rotor. La sustitución de una paleta unida con adhesivo en lugar de una hoja remachada, incrementó la vida de servicio de 90 a 1200 hrs.

Los adhesivos epoxi y los paneles alveolares son frecuentemente usados en los vehículos espaciales y satélites. Una explicación de uno de tales usos ha sido dada para el satélite Ariel-3. Lanzado para circular la tierra una vez cada 95.5 min a una distancia de 494 Km en el perigeo y 600 Km en el auge, el satélite pesó 86 Kg.

Muchos artículos de equipo en el satélite emplearon resinas epoxi adhesivas, por ejemplo el armazón y la estructura de instrumentos para los varios paquetes experimentales.<sup>(2)</sup>

14.-La industria automotriz está empecando a utilizar grandes cantidades de adhesivos estructurales en la fabricación del cuerpo principal para reemplazar la soldadura por puntos, por muchas de las mismas razones por las que la industria aérea usa adhesivos. Un uso corriente es la unión interior y exterior a corazas de estampados metálicos para tapas y cuerpos de taraderras. La operación de ensamble es completamente automática y consiste en la aplicación de 80 a 100 puntos de un adhesivo especial viscoso, controlado por medio de válvulas ejectoras, hacia el metal en su condición original aceitosa. El panel ensamblado es mecánicamente rasgado alrededor de los bordes y una poca de soldadura por puntos es aplicada para mantener el panel junto temporalmente. Luego los paneles son procesados a través de un sistema limpiador de metales, baño de "primer", ciclos de horneo y finalmente una cubierta de color y ciclos de secado. El adhesivo es curado durante el horneo del "primer". Las ventajas del nuevo proceso de unión incluyen: la eliminación de cordones sólidos y patrones de soldadura por puntos sobre la superficie final del panel acabado. La corrosión de los paneles también es reducida por la acción sellante del sistema adhesivo.

Un problema de la ingeniería automotriz es el aleteo y cascabeleo de la cubierta del motor y tapaderas de alta velocidad. Para salvar este problema, algunos fabricantes unen miembros reforzados a los lados o en la parte inferior de estos paneles de doble curvatura, usando un adhesivo epoxi modificado.

Este incrementa la rigidez, elimina el aleteo y hace el peso del ensamble menor. (1)

15.-En otros campos de la transportación, los adhesivos han sido más ampliamente usados que en los automoviles. Ejemplos son el aseguramiento de refuerzos a cubiertas y pieles de botes de Al, también en el mundo marino un batiscafo fue unido con un compuesto epoxi curado en caliente.

Los carriles de los trenes subterráneos han sido asegurados directamente a superficies pulidas del tunel por la unión con un adhesivo epoxi, de forma que los carriles no requirieron de conexiones o fijación en una cama de grava. Son posibles ahorros considerables debido a que la altura del tunel puede ser reducida de 30-35 cm. (2)

#### Otros ejemplos de usos diversos.

16.-Adhesivos epoxi-hule curables en frío son utilizados en la reparación de tuberías en minas. Los adhesivos epoxi-hule tienen una alta resistencia de unión con plásticos, hules y metales y son resistentes al impacto, ciclos térmicos, agua, aceites y gasolina. Las líneas reparadas soportan una presión interna de 6 MPa; estos adhesivos son recomendados para tuberías usadas en la industria minera del carbón y del esquisto.

17.-Un adhesivo endurecido anaeróbicamente es aplicado a una placa aleada o metal, cubierta con otra aleación o metal y presionadas o roladas para hacer una placa compuesta. Una hoja de acero de 0.8 mm fue laminada con una laminilla de Al de 0.1 mm usando el material adhesivo endurecido anaeróbicamente y titanato como acoplante a  $1000 \text{ Kg/cm}^2$ . La resistencia al corte tipo T fué de  $4 \text{ Kg/25 mm}$  y el laminado resultante fue resistente a la corrosión.

18.-Los adhesivos metal-metal también pueden unir revestimientos químicos a metales. Mecclas de un hule basado en nitrilo, una resina fenólica, una resina epoxi y un agente de cura son revestidas sobre laminas y curadas para dar revestimientos, los cuales dan buena adhesión a metales aplicados por revestimientos químicos (electroplateado) en la fabricación de circuitos eléctricos, objetos ornamentales, partes de automóviles etc. Las láminas revestidas fueron cubiertas químicamente con Cr y luego con Cu.

19.-Adhesivos a base de polímeros acrílicos y poliésteres insaturados modificados con surfactantes reactivos, han sido usados como adhesivos en la reparación de barcos debido a su resistencia a la humedad, productos del petróleo y corrosión. (47)

Cintas adhesivas a base de fibra de vidrio no entrelazadas y resinas epoxi son útiles para reparar tuberías de gas caliente. Los espesores de la cinta son de 0.15 a 0.5 mm y con un módulo de tensión de 3000 Kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia al corte de 1000 Kg/cm<sup>2</sup>. Las cintas ya fueron aplicadas a una tubería exhausta para un tanque de agua caliente. (48)

20.-Contenedores y botes metálicos son fabricados aplicando adhesivos acuosos que contienen poliuretanos, en la costura del cuerpo o entre el cuerpo y las tapas. Luego se estrecha o aprieta alrededor de la envoltura y es calentado el contenedor. (59)

21.-Láminas de espesores pequeños son cubiertas con adhesivos epoxi, catalizadores fotocurables y agentes de entrecruzamiento térmico y son curadas con luz UV. El laminado resultante tuvo una resistencia a el calor de soldadura de 25 seg a 260 °C y una resistencia a el desprendimiento de 2.0 Kg/cm.

El laminado continuo de hojas delgadas de metal para la formación de placas es común en muchas industrias por las ventajas que representa el unir metales disímiles sin que se presenten productos de corrosión.<sup>(41)</sup>

22.-En la industria de la radio, el radio-telescópico gigante en Waterbork Holanda, presenta muchos elementos esenciales unidos con un producto epoxi.El equipo consiste en 12 discos parabólicos cada uno de 25m de diámetro, 10 discos estacionarios espaciados 144m uno del otro y dos móviles, siendo montados en una larga vía de 330m conectados a la antena estacionaria.Los adhesivos fueron usados durante la construcción y ensamble, para hacer los deflectores, conectarlos a su estructura soporte y para conectar anillos de distribución a sus subestructuras.

Los reflectores parabólicos consisten de aproximadamente 100 segmentos, cada uno tiene un soporte de acero galvanizado para el cedazo reflejante de acero inoxidable.Si el cedazo era asegurado al armazón por clavijas o tornillos, la uniformidad de los reflectores podría ser afectada, ya que punto por punto la fijación causaría tensiones desiguales.La unión adhesiva supera las dificultades y también provee un grado de auto-tensión para el cedazo conforme se encoge durante el enfriamiento después de la cura en caliente del adhesivo epoxi.

Los 20 grandes anillos transmisores con un diámetro de 9 m son fabricados con un novedoso método.Los mecanismos de transmisión son hechos en la forma natural por maquinado y luego curvados y unidos a una subestructura soldada por unión con epoxi.Las terminales de cada segmento son también unidas para seguridad adicional.<sup>(2)</sup>

23.- Entre los usos convencionales de unión de alambres de metal, los adhesivos están siendo usados para unir acero porcelanizado a superficies duras y otras cubiertas y para una variedad de =

alambres aisladores a páneces de construcción exteriores. (1)

Algunos alambres han sido revestidos con compuestos de resinas epoxi (polieterpolioles), polisulfonas y poliimidadas, luego devanados en mandriles para dar arrollamientos que tienen buena resistencia mecánica a alta temperatura. Por ejemplo un alambre de 0.5 mm fue cubierto con un sistema adhesivo cuya composición era a base de bis(4-maleimidofenil)metano en solventes orgánicos y secado a 230 °C para formar una capa adhesiva de 0.015 mm que tiene una temperatura de ablandamiento de 165 °C y buena resistencia a el freón. Luego el alambre fue devanado sobre un mandril de 4 mm de diámetro y calentado 30 min a 230 °C, el arrollamiento tuvo una resistencia a la flexión de 5.0, 4.5, y 2.5 Kg a 25, 120 y 160 °C respectivamente. (49)

24.-Las juntas tubulares de metal son ahora adhesivamente unidas por andamiaje, por ejemplo cuerpos de bicicletas, líneas de refrigerante, gas y fluidos hidráulicos.

Otros ejemplos de unión adhesiva es la fabricación de equipos deportivos:

- La unión de la flecha de Al a puntas de acero, en jabalinas.
- Pegado de cabezas a la flecha metálica en palos de golf.
- La unión de diferentes utensilios de hierro para obtener modernas piedras con agarraderas.
- Fabricación de esquíes modernos etc.

Otros usos diversos pueden ser mencionados, fabricación de trombones y otros instrumentos de viento, de modernos aparatos de respiración, reparación de estalactitas rotas, mecanismos de transmisión mecánica para el servicio armado, complejos electrónicos de memoria, etc. (2)

## CAP VII. CONCLUSIONES.

1.-Siendo el área de los polímeros un amplio campo de acción para el desarrollo profesional del Químico y del Ingeniero Químico, consideramos muy importante que todo lo relacionado con ellos, desde la síntesis, procesos de polimerización y de moldeo, aplicaciones, limitaciones, nuevos desarrollos etc, sean tratados de una manera más profunda en alguna etapa de la carrera.

La estructura y forma de un paquete terminal acerca de los polímeros deberá ser diseñada en conjunto por el departamento académico, los coordinadores de carrera y los profesores interesados; no obstante, se puede iniciar este proyecto realizando trabajos concretos que traten con los materiales poliméricos, como en este caso una aplicación tecnológica, la unión de metales utilizando polímeros.

2.-La polimerización en sistemas adhesivos para unión metal-metal, es una polimerización por etapas en ausencia de disolventes lo que resulta en un polímero altamente entrecruzado después de la cura de este.

3.-Los sistemas adhesivos para unión metal-metal son en su mayoría resinas termofijas que fijan por la formación de una unión ya sea a temperatura ambiente o elevada.

4.-Una de las más altas contribuciones de algunas de las más nuevas resinas sintéticas para adhesivos es el alto grado de permanencia de las juntas adhesivas, cuando son propiamente hechas. Se pueden fabricar nuevos polímeros y mejorar las formulaciones para suministrar una gran variedad de propiedades en adhesivos, incluyendo alta estabilidad química y resistencia general a la deterioración de la junta bajo varias condiciones de servicio. El servicio puede involucrar exposiciones=

a corto y largo plazo en condiciones interiores suaves o exposiciones continuas a medios ambientes exteriores en algunas de las peores condiciones climatológicas del mundo.

3.-A pesar de sus innumerables ventajas (pag. 12), el uso de adhesivos metal-metal no tiene más la aceptación que debiera principalmente al desconocimiento de las propiedades de estos.

6.-Son varios los requisitos que se deben cumplir para obtener una unión adhesiva resistente y durable, entre ellos es necesario considerar los requerimientos siguientes:

- a) Selección adecuada del adhesivo.
- b) Tratamiento de la superficie a unir.
- c) Diseño y geometría de la junta.
- d) Control de las variables de procesamiento.

Por lo que cuando se desee utilizar un adhesivo para la unión metal-metal se debe buscar la ayuda de los fabricantes o especialistas, quienes son expertos en la tecnología de adhesivos.

7.-En cualquier evaluación de la calidad de una unión adhesiva, la calidad inicial dependerá de ambos, el adhesivo usado y las condiciones bajo las cuales la unión es realizada. Una unión se considera buena si la separación ocurre en el adhesivo y no en la interfase cuando se somete a cualquier prueba mecánica.

8.-El acceso analítico a la interfase es difícil y solo pocos estudiosos han tratado con este punto. Como consecuencia, un conocimiento acerca de los factores que determinan una unión buena y estable es aún investigado.

Por tanto en el presente, ninguna evaluación del funcionamiento de una unión adhesiva puede ser realizada sin pruebas extensivas a largo plazo. Obviamente hay una gran necesidad en el desarrollo de criterios microscópicos para la caracterización de la junta completa. Debido al pequeñísimo tamaño de las estructuras involucradas y a la complejidad de las interacciones químicas se debe hacer uso de herramientas de análisis y microscopía electrónica.

Esto contrasta con otras técnicas de unión como la soldadura, en donde una buena unión puede ser reconocida por la existencia de ciertas características distintivas en una metalografía de la sección transversal de la unión.

9.-Entre los principales factores que afectan la durabilidad de sistemas adhesivos tenemos: la temperatura de servicio, el clima y humedad, la morfología superficial.

10.-Una evaluación de costos para decidir si la unión adhesiva es más conveniente que algún otro método de unión, involucra la consideración de muchos factores.

Será factible el uso de adhesivos cuando se cuente con procesos integrales de tecnologías aplicables a las diferentes industrias y puedan ser aprovechadas al máximo las ventajas de la unión adhesiva, así como conseguidos ahorros en mano de obra, mayor productividad, aumento en la calidad y competitividad de los productos, etc.

11.-Las formulaciones adhesivas basadas en resinas epoxi actualmente son las más utilizadas en la unión metal-metal, y prometen ser las de más desarrollo en el futuro debido a las extraordinarias propiedades de estas resinas tanto físicas como adhesivas. Lo anterior se pudo constatar durante la elaboración del trabajo, las pruebas, desarrollo e investigación están

siendo fuertemente orientadas hacia estos materiales.

12.-La implementación de los adhesivos en situaciones de fijación en la industria, es indudable que va en ascenso. Una gran cantidad y diversidad de industrias se ha venido a beneficiar al utilizar adhesivos en sus procesos con la consiguiente reducción de costos, disminución de rechazos, menor peso de los artículos, aumento de la vida de servicio etc.

Existen muchas situaciones de unión en donde los adhesivos jamás sustituirán a la soldadura (mantenimiento, reconstrucción de piezas etc.) y a otras técnicas de sujeción, pero existen muchas otras en donde ya las sustituye con grandes ventajas, como se anotó antes, el uso de adhesivos para unión metal-metal, complementa más que obsoletar a las otras técnicas para la unión de metales.

## APENDICE.

Adhesivo estructural.-Un adhesivo estructural es el que produce una unión en la cual al menos uno de los adherentes se vence antes de que la junta falle. Generalmente posee una capacidad de resistir altos esfuerzos al corte de 7 MPa o más altos sobre periodos extendidos de tiempo, así como la de mantener la resistencia bajo condiciones ambientales hostiles.

AES.-Auger electron spectroscopy, método de análisis superficial con el cual es posible la identificación cualitativa y la determinación cuantitativa de elementos químicos en la muestra, así como la identificación de estados oxidativos y de unión química de elementos químicos.

Azente acoplante.-Compuesto que mejora la adherencia (acopla) entre resinas.

Anodizado.-Formación por procedimientos electrolíticos, de una película de óxido duro y no corroible, sobre Al o una aleación ligera para su protección contra la oxidación.

Amorfo.-Compuesto sin orden en el arreglo de sus moléculas, no cristalino.

Cura.-Transformación del estado líquido al sólido de un adhesivo. En la mayoría de los casos la cura es realizada a través de la aplicación de calor, presión o ambos y es aquí donde la reacción de polimerización toma lugar.

DICY.-Diciandiamida.

Dímero.-Oligómero compuesto por dos moléculas de monómero.

Energía de fractura.-Energía necesaria que debe ser proporcionada para que una unión adhesiva falle.

Encogimiento.-Disminución dimensional debido al curado o al enfriado.

Entrecruzamiento.-Enlaces químicos entre cadenas de un polímero.

Etapa A.-Un estado anterior en la reacción de ciertas resinas termofijas, en el cual el material aún es soluble en ciertos líquidos y fusible. Algunas veces referido como resol.

Etapa B.-Una etapa intermedia en la reacción de una resina termofija en la cual el material se ablanda cuando se calienta y se hincha en contacto con ciertos líquidos pero no funde ni se disuelve completamente. Las resinas en compuestos termofijos están usualmente en esta etapa.

ESCA.-Electron spectroscopy for chemical analysis.

Módulo de Young.-El módulo de elasticidad en tensión. La relación de esfuerzos de un material sujeto a deformación.

Oligómero.- Polímero de bajo peso molecular; primeros compuestos formados durante la polimerización, pueden encontrarse también como residuos al final de la misma.

Laminación.-Proceso mediante el cual, se adhieren entre sí, dos o más capas de uno o varios materiales mediante el uso de calor, presión, adhesivos etc.

Permeabilidad.-Es la capacidad de un material para permitir el paso o difusión de líquidos y vapores.

PI.- Poliimidas.

PBI.- Polibenzimidazol.

Resina.--Polímero de alta viscosidad, puede ser natural o sintética.

Resistencia a la tensión.--Es el esfuerzo de tensión que soporta un material sin sufrir ruptura o elongación permanente. Se expresa como fuerza por unidad de área de sección transversal de la pieza sometida a tensión.

SEM.--Scanning electron microscopy.

T<sub>g</sub> (temperatura de transición cristalina o vítrea).--Es el punto que se alcanza al descender la temperatura de un polímero fundido, o goma y en el que los materiales poliméricos, sufren un marcado cambio de propiedades asociado con el virtual cese de movimiento molecular.

TEGI y DEGI.--Oligómeros epoxi.

Termofijo.--Material con un punto de fusión superior a su temperatura de descomposición, propiedad que le permite ser moldeado y solidificado una sola vez.

Termoplástico.--Material plástico que se reblandece al aumentar la temperatura. Tiene un punto de fusión menor a su temperatura de descomposición, propiedad que le permite ser fundido y solidificado un número indefinido de veces.

Transición vítrea.--El cambio de un polímero amorfo o en una región amorfa de un polímero parcialmente cristalino desde una condición viscosa o con consistencia de caucho, hasta una dura y relativamente frágil. Esta transición generalmente ocurre en una región relativamente pequeña de temperatura y es similar a la solidificación de un líquido a el estado cristalino, pero no es una transición de fase.

No solo la dureza y la fragilidad sufren cambios marcados en esta región de temperatura, si no también propiedades como la expansibilidad térmica y el calor específico.

Trímero.-Oligómero constituido por tres moléculas monoméricas.

UP607.-Agente de cura.

## BIBLIOGRAFÍA.

- 1.-Bikerman J.J.  
"Enciclopedia de la tecnología química"  
3ra ed.  
Editorial Interscience  
USA 1978  
Vol. 1 pp 482-545
- 2.-Porter W.G.  
"Usos de resinas epoxi"  
1ra ed.  
Editorial Butterworths  
Londres 1975  
pp 233-247
- 3.-Shields J.  
"Adhesives handbook"  
3ra ed.  
Editorial Interamericana  
Londres 1984  
pp 1-139
- 4.-Landrock A.L.  
"Adhesives technology handbook"  
1ra ed.  
Editorial Noyes publication  
USA 1985  
pp 31-41, 55-85, 191-193, 239-269
- 5.-Fabris H.J. and Knauss W.G.  
"Comprehensive polymer science"  
1ra ed.  
Editorial Pergamon press  
USA 1989  
tomo 3 pp 1-2, tomo 7 pp 131-173
- 6.-Anonimo, an introduction to two methods of chemical fastening,  
Sheet metal industries 1979 56(2) pp 141-2,146
- 7.-Millet G.H. proprieties of cyanoacrilates, Adhesive age,  
Oct 1981, pp 27-32

- 8.-Peace R. evaluating cyanoacrilates for product assembly, Adhesive age, Sep 1979, pp 29-32
- 9.-Drain K.F. and Guthrie J. The effect of moisture on the strength of steel-steel cyanoacrylate adhesive bonds, Journal of adhesion, 1984, 17 pp 70-82
- 10.-Kyogoku H. and Sugibayashi T. Strength evaluation of adhesively bonded joints of dissimilar metals, Trans. Japan Inst. of metals, 1986, 27 no. 11, pp 849-857
- 11.-Usda. Forest products laboratory for US dept, Evaluación de estudios de permanencia, 1986 pp 38-60
- 12.-Chan C.M. and Venkatraman S. Crosslinking of poly(arylene ether ketones), J. applied polymer science, 1986, 32 pp 5933-5943
- 13.-Rider D.K. Adhesives in printed circuits applications, Bell telephone laboratories, 1986 pp 49-58
- 14.-Sargent J.P. and Ashbee K.H.G The contribution of osmosis to dimensional instability of adhesive joints, j. adhesion 1984, 17 pp 83-94
- 15.-Dodiuk H. and Drori L. The effect of moisture in epoxy films adhesives on their performance, j. adhesion, 1984, 17 pp 33-44
- 16.-Hahn H.T. Residual stress in the interfacial bond zone of curing adhesives by a sensitive strain measurement technique, j. adhesion, 1984, 17 pp 21-32
- 17.-Pike R.A. and Pinto J.P. Factors affecting the processing of epoxy film adhesives, j. adhesion, 1984, 17 pp 51-70
- 18.-Dickie R.A. and Holubka J.w. Interfacial chemistry of corrosion-induced bond degradation for epoxy/dicyandiamida adhesive bonded to cold-rolled and galvanized steels, j. adhesion sci. technol, 4, no. 1, pp 57-67, 1990

- 19.-Nitschke F. The metal-polymer interface in aluminium adhesive joints: a microanalytical study, j. adhesion sci. technol, 4, no. 1, pp 41-55, 1990
- 20.-Maluquer whal J.J.  
 "Enciclopedia de la técnica y de la mecánica"  
 1ra ed.  
 Editorial Nauta  
 España 1979  
 tomo 1 pp 70
- 21.-Smith T. Mechanisms of adhesive bond endurance: steel-epoxy under hydrothermal stress, j. adhesion, 1984, 17, pp 1-20
- 22.-Stringer L.G. Comparasion of the shear stress-strain behaviour of some structural adhesives, j. adhesion, 1985, 18, pp 185-196
- 23.-Josavi H. and Sancktar E. The effect of cure temperature and time on the bulk fracture properties of a structural adhesive, j. adhesion, 1985, 18, pp 25-48
- 24.-Allen K.W. Bubbles in adhesive joints, j. adhesion, 1984 17, pp 45-50
- 25.-Minford J.D. Comparative aluminium joint evaluations in varying saltwater exposure conditions, j. adhesion, 1985 18, pp 19-24
- 26.-Hine P.J. and Puckham D.E. Surface pretreatment of zinc and it's adhesion to epoxy resins, j. adhesion, 1984, 17 pp 207-229
- 27.-Lee S.M. An in-situ failure model for adhesive joints, j. adhesion, 1985, 18, pp 1-15

	vol.	
28.- Chemical Abstracts	92 :	111780y
29.- Chemical Abstracts	92 :	111802g
30.- Chemical Abstracts	92 :	151539h
31.- Chemical Abstracts	103 :	142977t
32.- Chemical Abstracts	102 :	79627r
33.- Chemical Abstracts	105 :	98758n
34.- Chemical Abstracts	105 :	98763k
35.- Chemical Abstracts	104 :	130977a
36.- Chemical Abstracts	105 :	137961v
37.- Chemical Abstracts	105 :	98726a
38.- Chemical Abstracts	105 :	89603f
39.- Chemical Abstracts	104 :	225924v
40.- Chemical abstracts	105 :	25377c
41.- Chemical Abstracts	104 :	150318q
42.- Chemical Abstracts	103 :	197017k
43.- Chemical Abstracts	102 :	114430v
44.- Chemical Abstracts	102 :	189257c
45.- Chemical Abstracts	98 :	161958g
46.- Chemical Abstracts	98 :	161965g
47.- Chemical Abstracts	98 :	180592z
48.- Chemical Abstracts	98 :	180759j
49.- Chemical Abstracts	106 :	180956e
50.- Chemical Abstracts	106 :	68373m

51.- Chemical Abstracts	106 :	68374n
52.- Chemical Abstracts	106 :	51107e
53.- Chemical Abstracts	107 :	24123w
54.- Chemical Abstracts	106 :	139099q
55.- Chemical Abstracts	106 :	139110m
56.- Chemical Abstracts	107 :	116341u
57.- Chemical Abstracts	107 :	116342v
58.- Chemical Abstracts	100 :	35361d
59.- Chemical Abstracts	94 :	85265d
60.- Chemical Abstracts	106 :	157549r
61.- Chemical Abstracts	107 :	238111q
62.- Chemical Abstracts	107 :	60673j
63.- Chemical Abstracts	106 :	33851p
64.- Chemical Abstracts	104 :	169638r
65.- Chemical Abstracts	106 :	139132y
66.- Chemical Abstracts	106 :	139133w
67.- Chemical Abstracts	106 :	51105c
68.- Chemical Abstracts	106 :	120609j
69.- Chemical Abstracts	106 :	68106b
70.- Chemical Abstracts	108 :	22650n
71.- Chemical Abstracts	108 :	22663u

72.- Technical data report, Dow epoxy resins, no. 35-J  
190-39 , Abril 1971.

73.- Technical data report, Dow epoxy resins, no. 35-J,  
Enero 1966.