

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y CIENCIA DE MATERIALES

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES DE MADRID

***DISEÑO Y COMPORTAMIENTO
DE
UNIONES ESTRUCTURALES MECÁNICAS Y
ADHESIVAS.
CONDICIONES SUPERFICIALES
Y
OPERACIONALES***

Presentado por:

RICARDO GARCÍA LEDESMA
INGENIERO INDUSTRIAL

Dirigido por:

JAVIER OÑORO
DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL

AÑO 2013

AGRADECIMIENTOS

Estoy muy agradecido a todas aquellas personas y entidades que de una u otra forma han colaborado durante el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

En primera instancia, mi profunda gratitud al Dr. Javier Oñoro López, director de esta tesis, por su competencia profesional, por su paciencia, por sus múltiples y valiosos consejos, por su ayuda y en general por el tiempo dedicado.

Al Dr. Jose María Amo Ortega, al Dr. Antonio Portolés García, a Dña. Raquel Bermejo y a Dña. Carmen Durán, por sus aportaciones científicas, su ayuda y colaboración prestada.

Al CENIM, por la aportación de sus equipos, instalaciones y materiales para la realización de algunas de las probetas.

A la E.T.S. de Ingenieros Industriales, por la prestación de sus instalaciones, equipos y materiales para la realización de las probetas y los ensayos.

A las empresa HENKEL (fabricante de los adhesivos LOCTITE) y SIKA por las aportaciones de los adhesivos y por la información sobre las características de los mismos.

Por último, un agradecimiento muy especial a mi esposa y a mis hijos, por sus ánimos y paciencia que han tenido durante la realización de esta tesis.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

PRESIDENTE:

D. CARLOS RANNINGER RODRIGUEZ.
CATEDRATICO DE UNIVERSIDAD.
ETSI INDUSTRIALES.
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID (UPM).

SECRETARIO:

D. ANTONIO PORTOLES GARCIA.
PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD.
ETSI INDUSTRIALES.
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID (UPM).

VOCALES:

D. JOSE MARIA AMO ORTEGA.
INVESTIGADOR CSIC.
INGENIERIA DE MATERIALES.
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC).

Dña. MARIA NATIVIDAD ANTON IGLESIAS.
PROFESORA TITULAR DE UNIVERSIDAD.
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ZAMORA.
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.

D. FRANCISCO J. JUANES GARCIA.
PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD.
EU DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE BILBAO.
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA
(UPV/EHU).

DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE
UNIONES ESTRUCTURALES
MECÁNICAS Y ADHESIVAS.
CONDICIONES SUPERFICIALES Y
OPERACIONALES

ESTRUCTURA DE LA TESIS

1.- RESUMEN.

2.- ANTECEDENTES.

3.- MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL.

4.- RESULTADOS.

5.- CONCLUSIONES.

6.- BIBLIOGRAFÍA.

INDICE

1.- RESUMEN

2. ANTECEDENTES

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- El reto de unir todo con todo.

1.2.- Las uniones.

1.3.- Uniones mecánicas.

1.3.1.- Mediante dispositivos accesorios.

1. Puntas.
2. Roblonado o remachado.
3. Tornillos.
4. Otros.

1.3.2.- Mediante ensamblaje.

1.3.3.- Mediante engarzado.

1.3.4.- Mediante recalcado.

1.4.- Uniones soldadas.

1.5.- Uniones con adhesivos.

1.5.1.- Generalidades.

1.5.2.- Ventajas.

1.6.- Uniones híbridas.

1.7.- Distribución de tensiones en montajes soldados, remachados y con adhesivos.

2. UNIONES ROBLONADAS Y REMACHADAS

2.1.- Introducción.

2.2.- Uniones remachadas trabajando a cortadura.

2.2.1.- Introducción.

2.2.2.- Fallo por cortadura.

2.2.3.- Fallo por aplastamiento.

2.2.4.- Fallo por rotura de la chapa a tracción.

2.2.5.- Fallo por cortadura de la chapa (laceración).

2.3.- Uniones remachadas trabajando a tracción.

2.4.- Normativa sobre resistencia de cálculo de remaches y roblones.

2.4.1.- Resistencia a aplastamiento.

2.4.2.- Resistencia a cortante.

2.4.3.- Resistencia a tracción.

3. UNIONES ATORNILLADAS.

3.1.- Introducción.

3.2.- Relajación.

3.3.- Autoaflojamiento.

3.3.1.- Motivos del autoaflojamiento.

3.3.2.- *Formas de evitar el autoaflojamiento.*

3.4.- Tipos y métodos de fijación de roscas.

3.4.1.- *Método de asentamiento.*

3.4.2.- *Dispositivos de prevención del desprendimiento (del tipo de par residual.*

3.4.3.- *Dispositivos para evitar el autoaflojamiento.*

3.4.4.- *Elección del tornillo correcto.*

3.5.- Cálculo resistente de tornillos.

3.5.1.- *Introducción.*

3.5.2.- *Cálculo de tornillos trabajando a cortadura.*

3.5.3.- *Cálculo de tornillos trabajando a tracción.*

3.6.- Normativa sobre resistencia de cálculo de tornillos.

3.6.1.- *Resistencia a aplastamiento.*

3.6.2.- *Resistencia a cortante.*

3.6.3.- *Resistencia a tracción.*

4. UNIONES RECALCADAS.

4.1.- Definición.

4.2.- Tipos de recalcado.

4.3.- Materiales a unir.

4.4.- Proceso de ejecución.

4.5.- Antecedentes y aplicaciones.

4.6.- Ventajas.

4.7.- Limitaciones.

4.8.- Parámetros clave.

4.9.- Ensayos no destructivos.

4.10.- Tensión de rotura.

4.10.1.- *Factores que influyen en la tensión de rotura de la unión.*

4.10.2.- *Valores aproximados de tensiones estáticas con clinchado en acero suave para diámetro del punzón $C=4,6$ mm.*

4.10.3.- *Valores aproximados para diámetro del punzón $C=5.5$ mm, para unir chapas de distinto espesor y en algunos casos de distinto material.*

4.11.- Consideraciones a tener en cuenta al realizar uniones con recalcado.

5. UNIONES SOLDADAS.

5.1.- Introducción.

5.2.- Soldadura por resistencia.

5.3.- Defectología de la soldadura por puntos.

5.4.- Ensayos para determinar la calidad de la unión.

5.4.1.- *Generalidades.*

5.4.2.- *Apariencia visual.*

5.4.3.- *Resistencia estática.*

5.4.4.- *Tamaño del punto y modo de fractura.*

5.5.- Aplicaciones de la soldadura por resistencia.

6. UNIONES ADHESIVAS.

6.1.- Definición.

6.2.- Fundamentos.

6.3.- Historia.

6.4.- Adhesión y cohesión.

6.4.1.- *Definiciones.*

6.4.2.- *Partes que componen la unión.*

6.4.3.- *Tipos de fallos de la unión.*

6.5.- Mecanismos de actuación del adhesivo.

6.6.- Adhesión estructural.

6.7.- Diseño de uniones adhesivas.

6.7.1.- *Ideas generales.*

6.7.2.- *Cargas y tensiones resultantes.*

6.7.3.- *Diseño de la unión adhesiva.*

6.8.- Cálculo de uniones.

6.8.1.- *Ideas generales.*

6.8.2.- *Cargas externas.*

6.8.3.- *Uniones a solape.*

6.8.4.- *Modificaciones para mejorar la tensión de rotura de la unión.*

6.8.5.- *Optimización de las uniones solapadas.*

6.9.- Unión adhesiva de sustratos de plástico.

6.9.1.- *Ideas generales.*

6.9.2.- *Agrietamiento por tensión de los termoplásticos.*

6.9.3.- *Métodos para prevenir el agrietamiento.*

6.9.4.- *Resumen de recursos disponible para unir sustratos de plástico.*

6.10.- Durabilidad de las uniones.

6.11.- Tipos de adhesivos.

6.11.1.- *Introducción.*

6.11.2.- *Adhesivos termocurados.*

6.11.3.- *Adhesivos termoplásticos.*

6.11.4.- *Adhesivos elastómeros.*

6.11.5.- *Adhesivos termoestables.*

6.11.6.- *Adhesivos de procedencia animal.*

6.11.7.- *Adhesivos vegetales.*

6.11.8.- *Adhesivos orgánicos sintéticos.*

6.11.9.- *Adhesivos anaeróbicos.*

6.11.10.- *Adhesivos de curado UV.*

6.11.11.- *Cianoacrilatos. (Comúnmente llamados "superglues").*

6.11.12.- *Epoxis.*

6.11.13.- *Acrílicos.*

6.11.14.- *Acrílicos modificados.*

6.11.15.- *Las siliconas.*

6.11.16.- *Poliuretanos.*

6.11.17.- *Silanos modificados.*

6.12.- Selección de adhesivos.

6.12.1.- *Primera aproximación a la elección del adhesivo.*

6.12.2.- *Factores a tener en cuenta para elegir el adhesivo.*

6.13.- Preparación superficial.

6.13.1.- *Ideas generales.*

6.13.2.- *Preparación de Metales.*

6.13.3.- *Tratamientos superficiales más comunes.*

6.13.4.- *Ensayo de mojabilidad.*

6.14.- Aplicaciones de los adhesivos.

6.14.1.- *Sujeciones mecánicas.*

6.14.2.- *Sellado y aislamiento.*

6.14.3.- *Resistencia a la Corrosión y a la Vibración.*

6.14.4.- *Resistencia a fatiga.*

6.14.5.- *Suavización de contornos.*

6.14.6.- *Aviación y naves espaciales.*

6.14.7.- *Aplicaciones eléctricas y electrónicas.*

6.14.8.- *Embalaje.*

6.14.9.- *Aparatos electrodomésticos.*

6.14.10.- *Mercado del automóvil.*

6.14.11.- *Aplicaciones en la madera.*

6.14.12.- *Aplicaciones en la construcción.*

6.15.- Limitaciones.

6.16.- Ventajas y desventajas de los adhesivos.

6.16.1.- *Ventajas con respecto a otros medios de unión.*

6.16.2.- *Desventajas con respecto a otros medios de unión.*

6.16.3.- *Poliuretano.*

6.16.4.- *Silano modificado.*

6.16.5.- *Cianoacrilato.*

6.16.6.- *Epoxi.*

6.17.- Procedimientos de unión con adhesivos.

6.17.1.- *Métodos de aplicación.*

6.17.2.- *Fijaciones inmediatamente después de la unión.*

6.17.3.- *Curado.*

6.18.- Ensayos.

6.18.1.- *Ensayos destructivos.*

6.18.2.- *Ensayos no destructivos.*

6.18.3.- *Ensayo de carga.*

6.18.4.- *Golpeando, o ensayo de sonido.*

6.18.5.- *Ensayo con ultrasonidos.*

6.18.6.- *Inspección visual.*

6.18.7.- *Extracción de núcleos de ensayo.*

6.18.8.- *Resistencia química.*

6.18.9.- *Resistencia a temperatura.*

6.18.10.- *Envejecimiento a temperatura.*

6.18.11.- *Consideraciones especiales.*

6.19.- Normativa de adhesivos.

6.19.1.- *Introducción.*

6.19.2.- *Resumen de normas americanas.*

6.19.3.- *Resumen de normas europeas.*

7.- UNIONES HÍBRIDAS.

7.1.- Introducción.

7.2.- Ventajas e inconvenientes de la unión híbrida.

7.2.1.- *Ventajas.*

7.2.2.- *Inconvenientes.*

7.3.- Realización de las uniones híbridas.

7.3.1.- *Método de aplicación.*

7.3.2.- *Etapas.*

7.3.3.- *Diseño de la unión híbrida.*

7.3.4.- *Preparación superficial.*

7.4.- Selección del adhesivo para realizar la unión híbrida.

7.4.1.- *Características convenientes para adhesivo.*

7.4.2.- *Adhesivos utilizados en las uniones híbridas.*

7.5.- Unión híbrida de adhesivo combinada con soldadura por puntos.

7.5.1.- *Generalidades.*

7.5.2.- *Consideraciones de proceso.*

7.5.3.- *Ventajas e inconvenientes.*

7.5.4.- *Defectos que se producen.*

7.5.5.- *Propiedades mecánicas de la unión combinada con adhesivo y soldadura.*

7.6.- Unión híbrida adhesivo combinada con unión mecánica.

7.6.1.- *Fundamento.*

7.6.2.- *Consideraciones de proceso.*

7.6.3.- *Ventajas e inconvenientes.*

7.6.4.- *Defectos de la unión híbrida que combina adhesivo y unión mecánica.*

7.6.5.- *Propiedades mecánicas de la unión mecánica con adhesivo.*

7.7.- Control de calidad de las uniones híbridas.

7.7.1.- *Requerimientos de calidad.*

7.7.2.- *Monitorización y control de la calidad.*

7.7.3.- *Ensayos destructivos.*

7.7.4.- *Ensayos no destructivos.*

3.- MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL.

1.- UNIONES ESTRUCTURALES CON CHAPA FINA.

1.1.- Importancia tecnológica.

1.2.- Condiciones superficiales.

1.2.1.- *Superficie Blanca.*

1.2.2.- *Superficie lijada.*

1.2.3.- *Superficie galvanizada.*

1.2.3.1.- *Definición.*

1.2.3.2.- *Aplicaciones.*

1.2.3.3.- *Ventajas medioambientales.*

1.2.3.4.- *Características del acero electrocincado.*

1.2.3.5.- *Características del acero galvanizado por inmersión en caliente.*

1.2.3.6.- *Mecanismos de protección contra la corrosión de los recubrimientos de cinc.*

1.2.3.7.- *Descripción detallada de los fenómenos físicos que suceden durante la vida del acero galvanizado.*

1.2.3.8.- *Características de las chapas utilizadas en los ensayos.*

1.2.4.- *Superficie prepintada.*

1.2.4.1.- *Introducción.*

1.2.4.2.- *Ventajas económicas de la superficie prepintada.*

1.2.4.3.- *Ventajas tecnológicas de las chapas prepintadas.*

1.2.4.4.- *Características y composición química de las probetas usadas.*

1.2.5.- *Otras superficies.*

2.- UNIONES Y MATERIALES UTILIZADOS.

2.1.- Materiales Base.

- 2.1.1.- *Chapa blanca.*
- 2.1.2.- *Chapa lijada.*
- 2.1.3.- *Chapa galvanizada.*
- 2.1.4.- *Chapa prepintada.*

2.2.- Resistencia mecánica de los materiales base.

- 2.2.1.- *Resistencia real (TR). (Fig. 59).*
- 2.2.2.- *Resistencia equivalente a la del adhesivo (TR_E). (Fig. 60).*
- 2.2.3.- *Dificultad que el adhesivo tenía más resistencia que el substrato.*

2.3.- Tipo de unión seleccionada.

2.4.- Sistemas de fijación.

2.5.- Adhesivos seleccionados.

- 2.5.1.- *Introducción.*
- 2.5.2.- *Adhesivo Cianoacrilato.*
- 2.5.3.- *Adhesivo Epoxi.*
- 2.5.4.- *Adhesivo Silano Modificado.*
- 2.5.5.- *Adhesivo Poliuretano, marca Sika.*
- 2.5.6.- *Adhesivo de Poliuretano, marca Kömmerling.*

2.6.- Uniones mecánicas seleccionadas.

- 2.6.1.- *Uniones clinchadas. (Fig. 63).*
 - 2.6.1.1.- *Definición.*
 - 2.6.1.2.- *Método de ejecución.*
 - 2.6.1.3.- *Características más destacadas.*
- 2.6.2.- *Uniones remachadas.*

3.- OPERACIONES DE UNIÓN.

3.1.- Secuencia de Adhesión.

- 3.1.1.- *Selección de chapas.*
- 3.1.2.- *Preparación de superficies.*
- 3.1.3.- *Limpieza de superficies.*
- 3.1.4.- *Preparación para unir.*
- 3.1.5.- *Realización de las uniones.*
 - 3.1.5.1.- *Uniones con sólo adhesivo.*
 - 3.1.5.2.- *Uniones de tipo mecánico solamente.*
 - 3.1.5.3.- *Uniones mixtas de adhesivo mas clinchado.*
 - 3.1.5.4.- *Uniones mixtas de adhesivo mas remache.*
 - 3.1.5.5.- *Dificultad de alineación de probetas.*
- 3.1.6.- *Medición de la unión.*
 - 3.1.6.1.- *Dificultad para conseguir uniones similares.*
 - 3.1.6.2.- *Metodología de medición.*

3.2.- Espesor de adhesivo.

- 3.2.1.- *Introducción.*
- 3.2.2.- *Adhesivo Cianoacrilato (Loctite 480).*
- 3.2.3.- *Adhesivo Epoxi de dos componentes (Loctite 9464).*
- 3.2.4.- *Adhesivo Silano Modificado (Loctite 5069).*
- 3.2.5.- *Adhesivo Poliuretano (Sika-flex 260).*

3.3.- Aprendizajes conseguidos.

4.- ENSAYOS MECÁNICOS.

4.1.- Máquina de ensayo.

- 4.1.1.- *Descripción.*
- 4.1.2.- *Funcionamiento.*
- 4.1.3.- *Características de la máquina de tracción.*
- 4.1.4.- *Parámetros utilizados en el ensayo.*
- 4.1.5.- *Resultados.*
- 4.1.6.- *Dificultad de alineación de carga durante el ensayo de tracción.*

- 4.2.- Probetas de ensayo.**
 - 4.2.1.- *Normativa del ensayo.*
 - 4.2.2.- *Dimensiones de las probetas (Fig. 89).*
 - 4.2.3.- *Número de probetas.*
- 4.3.- Realización de los ensayos.**
 - 4.3.1.- *Descripción del ensayo.*
 - 4.3.2.- *Preparación del ensayo.*
 - 4.3.3.- *Ejecución del ensayo.*
- 4.4.- Presentación de resultados.**
 - 4.4.1.- *Anotación de resultados.*

4- RESULTADOS

1.- METODOLOGÍA PARA LA ANOTACIÓN DE RESULTADOS.

- 1.1.- Representación gráfica de las curvas tensión deformación de los ensayos.**
- 1.2.- Tabla de resultados.**
- 1.3.- Estado de las probetas rotas.**

2.- FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS RESULTADOS.

- 2.1.- Espesor de adhesivo.**
 - 2.1.1.- *Influencia del espesor de adhesivo en la unión.*
 - 2.1.2.- *Dificultad para conseguir uniformidad de espesor de adhesivo.*
 - 2.1.3.- *Desplazamientos totales en función del espesor de adhesivo.*
 - 2.1.4.- *Desplazamientos totales en función de la relación entre el Desplazamiento total y el espesor de adhesivo.*
 - 2.1.5.- *Aprendizajes conseguidos respecto al espesor de adhesivo.*
- 2.2.- Tipo de superficie.**
- 2.3.- Rugosidad de la superficie.**
- 2.4.- Tipo de adhesivo.**
 - 2.4.1.- *Consideraciones generales.*
 - 2.4.2.- *Aprendizajes conseguidos.*
- 2.5.- Tipo de unión mecánica.**
- 2.6.- Tipo de unión mixta.**
 - 2.6.1.- *Consideraciones generales.*
 - 2.6.2.- *Aprendizajes conseguidos.*
- 2.7.- Tiempo de curado del adhesivo.**
- 2.8.- Realización de la unión en fresco o en seco.**
- 2.9.- Espesor de las chapas a unir.**
 - 2.9.1.- *Consideraciones generales.*
 - 2.9.2.- *Aprendizajes conseguidos.*

3.- CALIDAD DE DATOS OBTENIDOS.

- 3.1.- Introducción.**
- 3.2.- Análisis general de los coeficientes de variación (CV).**
- 3.3.- Análisis de valores medios de CV en cada substrato.**
- 3.4.- Análisis de valores medios de CV en cada unión.**
- 3.5.- Influencia de la unión mecánica (clinchado y remache) en los coeficientes de variación de las uniones mixtas.**
 - 3.5.1.- *Respecto del CV del adhesivo.*
 - 3.5.2.- *Respecto del valor medio del CV del adhesivo y de la unión mecánica.*
- 3.6.- Aprendizajes conseguidos sobre coeficientes de variación.**

4.- RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS UNIONES.

- 4.1.- Introducción.**

- 4.2.- Análisis según la magnitud de resistencia.**
- 4.3.- Análisis de resistencia desde el punto de vista del tipo de superficie.**
- 4.4.- Análisis de resistencia de los valores medios de cada unión.**
- 4.5.- Análisis por valores medios de cada sustrato.**
- 4.6.- Influencia del adhesivo y el tipo de superficie.**
- 4.7.- Comparativa entre unión con remache y unión con clinchado.**
- 4.8.- Influencia del clinchado.**

4.8.1.- Valores de resistencia de las uniones con clinchado.

4.8.2.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO con respecto a la suma de resistencias de las uniones CLINCHADAS solas y el Adhesivo solo.

4.8.3.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO, respecto al CLINCHADO.

4.8.4.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO, respecto del Adhesivo.

- 4.9.- Influencia del remache sobre la resistencia mecánica, en la unión adhesiva.**

4.9.1.- Valores de resistencia de las uniones realizadas con remache.

4.9.2.- Análisis de resistencia relativa de la unión mixta con remache, con respecto a la suma de las resistencias de las uniones REMACHE sola y el Adhesivo solo.

4.9.3.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con REMACHE, respecto al REMACHE solo.

4.9.4.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con REMACHE, respecto al Adhesivo solo.

- 4.10.- Influencia del estado del adhesivo, fresco o curado, sobre la resistencia mecánica, al realizar la unión mixta con remache.**

4.10.1.- Influencia de tipo de adhesivo.

4.10.2.- Influencia del tipo de superficie.

4.10.3.- Análisis general de la influencia de la unión inmediata (fresco).

4.10.4.- Análisis detallado de la influencia de la unión inmediata (fresco).

- 4.11.- Aprendizajes conseguidos.**

5.- DEFORMACIONES.

- 5.1.- Análisis general de deformaciones.**
- 5.2.- Análisis detallados de las deformaciones.**
- 5.3.- Análisis de valores medios de deformaciones para cada unión.**
- 5.4.- Análisis de valores medios de alargamiento para cada sustrato.**
- 5.5.- Aprendizajes conseguidos.**

6.- ADHERENCIA EN CADA TIPO DE SUPERFICIE.

- 6.1.- Consideraciones generales.**
- 6.2.- Aprendizajes conseguidos.**

7.- TIPO DE ROTURA, DÚCTIL O FRÁGIL.

- 7.1.- Introducción.**
- 7.2.- Análisis y clasificación por tipos de rotura.**
- 7.3.- Aprendizajes conseguidos.**

8.- RIGIDEZ DE LA UNIÓN.

- 8.1.- Rigidez de las uniones realizadas con adhesivos.**
- 8.2.- Rigidez de las uniones de tipo mecánico.**
- 8.3.- Rigidez de las uniones híbridas.**

5.- CONCLUSIONES

CAPITULO 1

1- RESUMEN

DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE UNIONES ESTRUCTURALES MECÁNICAS Y ADHESIVAS. CONDICIONES SUPERFICIALES Y OPERACIONALES

RESUMEN

Las uniones estructurales mecánicas y adhesivas requieren la combinación de un número importante de parámetros para la obtención de la continuidad estructural que exigen las condiciones de diseño. Las características de las uniones presentan importantes variaciones, ligadas a las condiciones de ejecución, tanto en uniones mecánicas como especialmente en uniones adhesivas y mixtas (unión mecánica y adhesiva, también conocidas como uniones híbridas).

Las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas dependen de la naturaleza y propiedades de los adhesivos y también de muchos otros parámetros que influyen directamente en el comportamiento de estas uniones. Algunos de los parámetros más significativos son: el acabado superficial de los materiales, área y espesor de la capa adhesiva, diseño adecuado, secuencia de aplicación, propiedades químicas de la superficie y preparación de los sustratos antes de aplicar el adhesivo.

Los mecanismos de adhesión son complejos. En general, cada unión adhesiva solo puede explicarse considerando la actuación conjunta de varios mecanismos de adhesión. No existen adhesivos universales para un determinado material o aplicación, por lo que cada pareja sustrato-adhesivo requiere un particular estudio y el comportamiento obtenido puede variar, significativamente, de uno a otro caso. El fallo de una junta adhesiva depende del mecanismo cohesión-adhesión, ligado a la secuencia y modo de ejecución de los parámetros operacionales utilizados en la unión.

En aplicaciones estructurales existen un número muy elevado de sistemas de unión y de posibles sustratos. En este trabajo se han seleccionado cuatro adhesivos diferentes (cianoacrilato, epoxi, poliuretano y silano modificado) y dos procesos de unión mecánica (remachado y clinchado). Estas uniones se han aplicado sobre chapas de acero al carbono en diferentes estados superficiales (chapa blanca, galvanizada y prepintada).

Los parámetros operacionales analizados han sido: preparación superficial, espesor del adhesivo, secuencia de aplicación y aplicación de presión durante el curado. Se han analizado tanto las uniones individuales como las uniones híbridas (unión adhesiva y unión mecánica).

La combinación de procesos de unión, sustratos y parámetros operacionales ha dado lugar a la preparación y ensayo de más de mil muestras. Pues, debido a la dispersión de resultados característica de las uniones adhesivas, para cada condición analizada se han ensayado seis probetas.

Los resultados obtenidos han sido:

El espesor de adhesivo utilizado es una variable muy importante en los adhesivos flexibles, donde cuanto menor es el espesor del adhesivo mayor es la resistencia mecánica a cortadura de la unión. Sin embargo en los adhesivos rígidos su influencia es mucho menor.

La naturaleza de la superficie es fundamental para una buena adherencia del adhesivo al sustrato, que repercute en la resistencia mecánica de la unión. La superficie que mejor adherencia presenta es la prepintada, especialmente cuando existe una alta

compatibilidad entre la pintura y el adhesivo. La superficie que peor adherencia tiene es la galvanizada.

La secuencia de aplicación ha sido un parámetro significativo en las uniones híbridas, donde los mejores resultados se han obtenido cuando se aplicaba primero el adhesivo y la unión mecánica se realizaba antes del curado del adhesivo.

La aplicación de presión durante el curado se ha mostrado un parámetro significativo en los adhesivos con poca capacidad para el relleno de la junta. En los otros casos su influencia ha sido poco relevante.

El comportamiento de las uniones estructurales mecánicas y adhesivas en cuanto a la resistencia mecánica de la unión puede variar mucho en función del diseño de dicha unión. La resistencia mecánica puede ser tan grande que falle antes el sustrato que la unión. Las mejores resistencias se consiguen diseñando las uniones con adhesivo cianoacrilato, eligiendo adecuadamente las condiciones superficiales y operacionales, por ejemplo chapa blanca aplicando una presión durante el curado de la unión.

La utilización de uniones mixtas aumenta muy poco o nada la resistencia mecánica, pero a cambio proporciona una baja dispersión de resultados, siendo destacable para la superficie galvanizada, que es la que presenta peor reproducibilidad cuando se realizan uniones sólo con adhesivo.

Las uniones mixtas conducen a un aumento de la deformación antes de la rotura. Los adhesivos dan rotura frágil y las uniones mecánicas rotura dúctil. La unión mixta proporciona ductilidad a la unión. Las uniones mixtas también pueden dar rotura frágil, esto sucede cuando la resistencia del adhesivo es tres veces superior a la resistencia de la unión mecánica.

Las uniones híbridas mejoran la rigidez de la junta, sobre todo se aprecia un aumento importante en las uniones mixtas realizadas con adhesivos flexibles, pudiendo decirse que para todos los adhesivos la rigidez de la unión híbrida es superior.

DESIGN AND BEHAVIOR OF MECHANICAL AND ADHESIVE STRUCTURAL JOINTS. SURFACE CONDITIONS AND OPERATIONAL PARAMETERS.

ABSTRACT

The mechanical and adhesive structural joints require the combination of a large number of parameters to obtain the structural continuity required for the design conditions. The characteristics of the junctions have important variations, linked to performance conditions, in mechanical joints as particular in mixed adhesive joints (mechanical and adhesive joints, also known as hybrid joints).

The mechanical properties of the adhesive joints depend of the nature and properties of adhesives and also of many other parameters that directly influence in the behavior of these joints. Some of the most significant parameters are: the surface finished of the material, area and thickness of the adhesive layer, suitable design, and application sequence, chemical properties of the surface and preparation of the substrate before applying the adhesive.

Adhesion mechanisms are complex. In general, each adhesive joint can only be explained by considering the combined action of several adhesions mechanisms. There aren't universal adhesives for a given material or application, so that each pair substrate-adhesive requires a particular study and the behavior obtained can vary significantly from one to another case. The failure of an adhesive joint depends on the cohesion-adhesion mechanism, linked to the sequence and manner of execution of the operational parameters used in the joint.

In the structural applications, there are a very high number of joining systems and possible substrates. In this work we have selected four different adhesives (cyanoacrylate, epoxy, polyurethane and silano modified) and two mechanical joining processes (riveting and clinching). These joints were applied on carbon steel with different types of surfaces (white sheet, galvanized and pre-painted).

The operational parameters analyzed were: surface preparation, thickness of adhesive, application sequence and application of pressure during curing. We have analyzed individual joints both as hybrid joints (adhesive joint and mechanical joint).

The combination of joining processes, substrates and operational parameters has resulted in the preparation and testing of over a thousand specimens. Then, due to the spread of results characteristic of adhesive joints, for each condition analyzed we have tested six samples.

The results have been:

The thickness of adhesive used is an important variable in the flexible adhesives, where the lower the adhesive thickness greater the shear strength of the joint. However in rigid adhesives is lower influence.

The nature of the surface is essential for good adherence of the adhesive to the substrate, which affects the shear strength of the joint. The surface has better adherence is preprinted, especially when there is a high compatibility between the paint and the adhesive. The surface which has poor adherence is the galvanized.

The sequence of application has been a significant parameter in the hybrid junctions, where the best results are obtained when applying first the adhesive and the mechanical joint is performed before cured of the adhesive.

The application of pressure during curing has shown a significant parameter in the adhesives with little capacity for filler the joint. In other cases their influence has been less relevant.

The behavior of structural mechanical and adhesive joints in the shear strength of the joint can vary greatly depending on the design of such a joint. The shear strength may be so large that the substrate fails before the joint. The best shear strengths are achieved by designing the junctions with cyanoacrylate adhesive, by selecting appropriately the surface and operating conditions, for example by white sheet applying a pressure during curing of the joint.

The use of hybrid joints no increase shear strength, but instead provides a low dispersion of results, being remarkable for the galvanized surface, which is the having worst reproducibility when performed bonded joints.

The hybrid joints leading to increased deformation before rupture. The joints witch adhesives give brittle fracture and the mechanics joints give ductile fracture. Hybrid joint provides ductility at the joint. Hybrid joint can also give brittle fracture, this happens when the shear strength of the adhesive is three times the shear strength of the mechanical joint.

The hybrid joints improve stiffness of joint, especially seen a significant increase in hybrid joints bonding with flexible adhesives, can be said that for all the adhesives, the hybrid junction stiffness is higher.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.- ANTECEDENTES

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- El reto de unir todo con todo.

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

En un expendedor de unos grandes almacenes se puede encontrar infinidad de productos para un mismo sistema de unión: madera, papel, metal, cerámica, plástico, vidrio y sus correspondientes combinaciones; madera con vidrio, cerámica con metal o plástico con papel. Algunos de estos adhesivos se venden como universales, es decir, que el fabricante lo recomienda como solución eficaz para cualquier sistema de unión. La existencia de esta gran oferta de diferentes tipos de adhesivos, nos indica que no existe una solución ideal para cualquier sistema de unión, sino que los requerimientos funcionales y económicos de cada tipo de ensamblaje van a requerir una solución adhesiva diferente en cada caso.

1.2.- Las uniones.

Las formas de unión de dos piezas independientes se dividen en tres grandes grupos (Fig. 1): mecánicas, soldadas y adhesivas, o una combinación de las anteriores, uniones

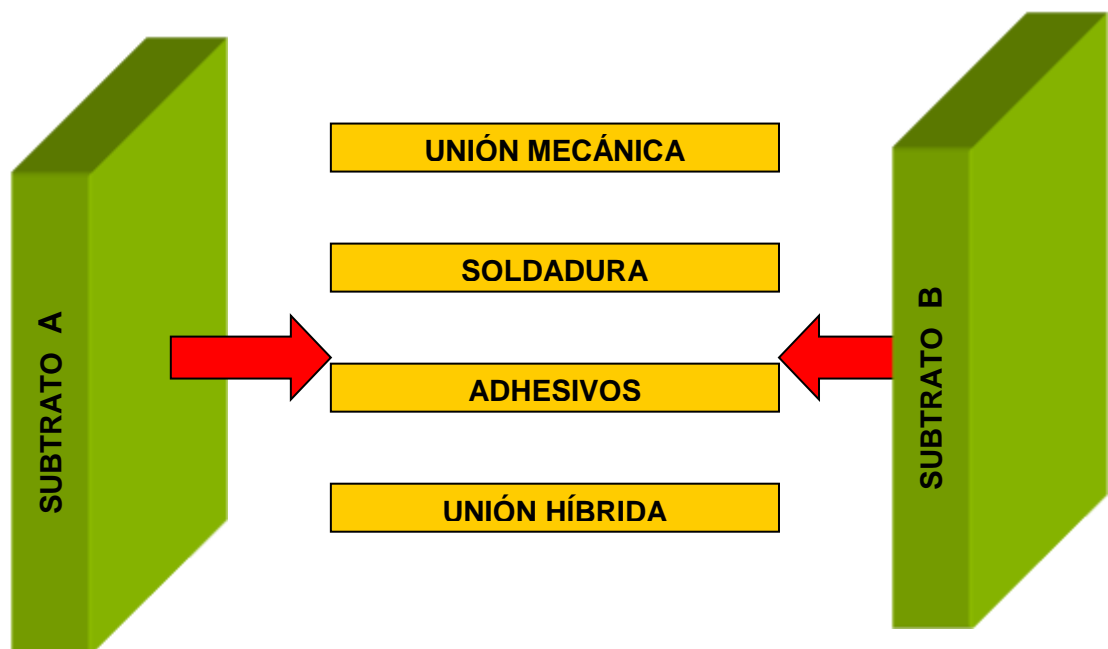


Figura 1. Tipos de uniones.

mixtas. Las uniones mecánicas (atornillado, roblonado, remachado o cosido, etc.) han sido las más empleadas, para todo tipo de materiales, hasta principios del siglo XX. Durante ese siglo la soldadura de los materiales metálicos alcanzó un nivel tan sorprendente, que de ser un proceso residual, se transformó en el sistema más importante de unión desde el punto de vista de los materiales, tecnologías y procesos desarrollados. Relegando a los otros sistemas de unión a un segundo plano. Siendo actualmente, y con mucha diferencia, la técnica de unión más importante para los metales.

El desarrollo de los polímeros sintéticos durante la segunda mitad del siglo XX, junto con la necesidad de resolver los problemas de unión de estos materiales, unida a la aparición de nuevos adhesivos, con una gran versatilidad de formulaciones y por tanto de diferentes aplicaciones, ha conducido a un desarrollo espectacular de los mismos en los últimos años. El principal cambio no ha sido únicamente la aparición de nuevas formulaciones y aplicaciones, sino el cambio de mentalidad que ha supuesto el diseño de nuevos componentes, o el rediseño de estructuras tradicionales para que su unión adhesiva sea más eficiente. De mantenerse un ritmo similar en cuanto al desarrollo de nuevos productos y su implicación en los diferentes procesos de fabricación, los adhesivos pueden llegar a convertirse en el sistema de unión más importante del siglo XXI.

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

Por tanto, el empleo de unos u otros métodos dependerá de muchos factores, entre los que cabe destacar el tipo de sustrato a unir, las prestaciones que se requieren para la unión, el coste de la misma, las aplicaciones previstas, etc.

1.3.- Uniones mecánicas.

1.3.1.- Técnicas de unión mediante dispositivos accesorios.

1.3.1.1.- Puntas.

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

ser tenaces para no partirse fácilmente y, cuando se considere conveniente, ser remachadas.

Las puntas están constituidas por dos partes, *tija* y *cabeza*. La tija suele ser cilíndrica, de superficie lisa, acanalada o rugosa, aunque hay puntas de tija plano o piramidal. Atendiendo al *tipo de cabeza*, pueden clasificarse como: *de cabeza plana*, *de punta perdida*, *de cabeza ancha* –para fijar placas en trabajos de construcción, pizarras y placas asfaltadas-, *de acero templado*, *entorchadas* –un híbrido entre la punta y el tornillo-, tachuelas y clavos de tapicero, escarpías- puntas que se curvan, de forma que, además de unir, permiten colgar objetos- *de pata* –para fijar chambranas y ventanas en obras de mampostería- y *de caballete* –puntas curvadas, aguzadas en ambos extremos, usados para unir entramados o alambres a los postes y para unir entramados o alambres a los postes y para unir cables sobre mampostería-.

1.3.1.2.- Roblonado y remachado.

Cuando se pretende unir partes metálicas de manera más permanente que mediante los pernos y, a la vez, no se requiere dotar de estanqueidad al conjunto –o se le dota de estanqueidad mediante medios auxiliares, se recurre al remachado. Un roblón es un tornillo sin rosca, una pieza cilíndrica dotada de cabeza, llamada cabeza de asiento, que se recalca directamente en el cilindro y su forma determina el nombre del roblón. La unión mediante roblones se realiza a través de perforaciones practicadas en las piezas a unir de forma que el roblón actúa como un tornillo pasante; la diferencia estriba en que el roblón no se rosca a la última pieza a unir, ni se sujeta mediante una tuerca, sino que la parte de roblón que sobresale de la estructura se remacha hasta formar una segunda cabeza que impide que el roblón se suelte.

Hace algunos años el remachado se empleaba, de forma generalizada, en lo que se denominaba *calderería pesada* –estructuras metálicas para edificios y puentes, etc.-, en la construcción naval y aeronáutica, en ferrocarriles, etc. Aunque en la actualidad existen métodos alternativos para realizar uniones de gran envergadura, el remachado sigue siendo una opción utilizada en construcción naval y aeronáutica.

1.3.1.3.- Tornillos.

Los tornillos son el método de montaje ideal cuando tiene que ser posible el desmontaje de la unión con frecuencia y fácilmente, y suelen ser muy fiables. Sin embargo, en determinadas circunstancias pueden aflojarse y es preciso fijarlos.

Para poder emplear tornillos o remaches, es preciso taladrar agujeros, debilitando las piezas. Cuando el montaje está sometido a carga, la tensión se concentra cerca de los taladros. A veces, esto puede provocar la fatiga prematura del material (véase la figura anterior). En consecuencia, si se utiliza este tipo de fijaciones es preciso aumentar el espesor del material para lograr la estabilidad necesaria. Además, los taladros para pernos o remaches incrementan el peligro de corrosión. Por este motivo, suele ser

necesario proporcionar una protección al sustrato o un sellado adicional, lo cual suele ser caro y complicado. Si se ponen en contacto metales diferentes, pueden producirse fenómenos de corrosión galvánica y dilatación diferencial.

El paso evolutivo lógico de la punta es el *tornillo*. La unión realizada mediante puntas adolece de falta de rigidez y, además el material tiende a envejecer, relajando la presión que ejerce sobre la punta, por lo que el conjunto unido mediante puntas se colapsa o separa. Un resalte en hélice, llamado *fileteado*, permite superar estos déficit. Si además la tija, en lugar de cilíndrica, se hace cónica, ejerce el efecto adicional de incrementar la presión sobre el material según avanza a través de él.

El remachado de puntas –empleado como método de seguridad y afianzamiento de uniones-, por su parte, se sustituye por el *tornillo pasante*: mediante un taladro efectuado en el material, el tornillo lo atraviesa, enroscándose su fileteado mediante una *tuerca*, elemento metálico cuya superficie interior está fileteada de forma compatible con el tornillo. Al conjunto se le denomina *perno*.

Un elemento adicional de fijación es la arandela, que permite roscar la tuerca sin dañar el material base, ya que la tuerca gira sobre la arandela. Cuando la arandela colabora en la fijación y no sólo favorece el roscado adopta diversas formas: helicoidal –arandela GROWER- o troncocónica –arandela BELEVILLE-. Además de aumentar la superficie de contacto sobre el material unido, las arandelas impiden que se afloje la tuerca, ya sea por su geometría o porque mantienen una tensión constante entre la tuerca y la base.

Los tornillos pueden clasificarse según el tipo de cabeza, al igual que las puntas, o más específica y comúnmente por el tipo de fileteado. Por lo que respecta a las tuercas, es de destacar la *almenada* –que dispone de ranuras que permiten alojar un pasador de seguridad- y la *ciega* –que termina en un casquete esférico que protege la rosca y asegura su estanqueidad.

Fileteado. Al ser el fileteado o rosca el elemento diferenciador del tornillo, una de las formas de clasificarlo y determinarlo es caracterizar el tipo de rosca que posee. Dada la antigüedad del tornillo como elemento de unión, existen elementos del mismo que han permanecido inamovibles desde su origen. Los primitivos gremios artesanos determinaban el fileteado de los tornillos que usaban como un marchamo diferenciador, debido a lo cual además de la rosca normalizada ISO, todavía están en uso roscas específicas tales como la rosca inglesa o WHITWORTH en conducciones de gas, la rosca THURY o suiza en relojería, la rosca GRIGGS en grifería.

1.3.1.4.- Otros dispositivos de unión mecánica.

Hay una gran variedad de dispositivos que permiten unir partes en un todo. Los más habituales son las abrazaderas y los racores. Las abrazaderas son dispositivos que constan de una pletina y un tornillo que permite fijarlas sobre las piezas a unir, generalmente tubulares. Los racores son dispositivos, fileteados interiormente, que unen

tubos roscados en sus extremos, pudiendo ser rígidos o flexibles, de acuerdo con la finalidad que posean.

1.3.2.- Técnicas de unión mediante ensamblaje.

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

Los tipos de ensamblaje más habituales son los siguientes: ensamblaje a tope, que en realidad es el simple contacto entre piezas reforzado mediante adhesivo o puntas; ensamblaje de caja y espiga; de cola de milano; ensamblaje recto de media madera – caracterizado por tener espigas más finas y numerosas que el de caja y espiga-; machihembrado –ensamblaje en el que una lengüeta tallada en la dimensión mayor de una tabla se inserta en la ranura o hembra labrada en la adyacente.

1.3.3.- Técnicas de unión mediante engarzado.

El término engarce engloba todos los procedimientos de unión mecánica que se realizan mediante la deformación plástica de al menos uno de los componentes a ensamblar.

Es una técnica adecuada para la unión de productos con recubrimiento metálico que soporten la deformación generada en los pliegues.

Esta técnica de unión se puede combinar fácilmente con el pegado.

Permite obtener una junta estanca mediante la adición de masilla, adhesivo o una junta.

En la medida de lo posible, el engarce debe diseñarse de forma que los cantos no queden expuestos (Fig. 2) (por razones estéticas y protección contra la corrosión).

Sin embargo, el engarce queda limitado a geometrías sencillas, lo que excluye su utilización en esquinas.

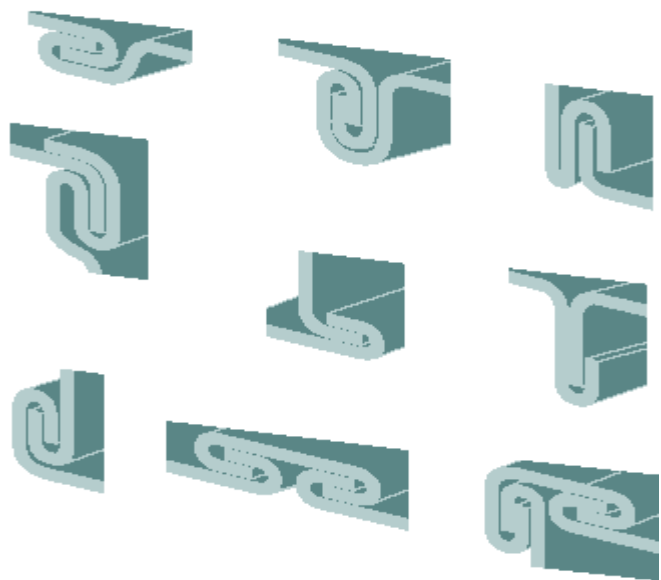


Figura 2. Diseños de engarce para evitar que los cantos queden expuestos.

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

1.3.4.- Técnicas de unión mediante recalcado o clinchado.

Es un método de unión de chapas y perfiles sin aportación de material, que se realiza en frío. Consiste en crear una deformación que afecta a ambas chapas (Fig. 3), de manera que esta deformación es la que las mantiene unidas.

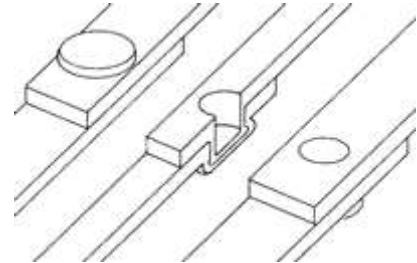


Figura 3. Deformaciones producidas en las chapas unidas mediante recalcado.

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

En el clinchado un punzón empuja a las dos chapas hasta un agujero de la máquina de forma que se produce una gran deformación permanente en las dos chapas (Fig. 4). Las deformaciones producidas impiden que las chapas unidas se separen.

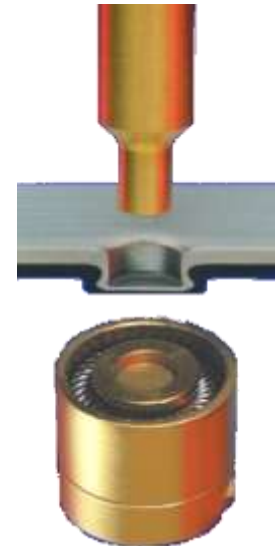


Figura 4. Método de realización de la unión por clinchado.

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

La característica de este sistema es que el mismo metal a unir provee la unión sin generación de calor, ruido o agregado de otros componentes.

La energía requerida para accionar las herramientas de CLINCHADO puede ser eléctrica, hidráulica, o neumática, existiendo modelos de mano para aplicaciones de chapa fina.

1.4.- Uniones soldadas.

Etimológicamente, *soldar* significa consolidar; la soldadura ideal sería aquella que produjera una continuidad absoluta entre las partes unidas, de forma que fuera indiscernible la frontera entre ellas. Lo más simple sería aproximar en vacío dos superficies pulidas con precisión atómica, de forma que los electrones de ambas caras se intercambiaran generando nuevos enlaces. El proceso que más se aproxima a esta situación es el de *difusión atómica*.

En la práctica se puede definir la soldadura como la operación que permite unir partes en una sola pieza, asegurando la continuidad entre ellas mediante calentamiento y/o presión

con o sin el empleo de un material de aportación que disponga de características físicas comparables con el procedimiento específico utilizado. La soldadura se considera realizada cuando se verifica la interpenetración granular entre partes, directamente o mediante un material de aportación.

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

1.5.- Uniones con adhesivos.

1.5.1.- Ideas generales.

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

Con el desarrollo de la química orgánica, los adhesivos experimentaron un avance extraordinario, basado en la aplicación de polímeros a la unión química de elementos destinados a trabajar como un todo. La resistencia de las uniones así realizadas alcanza valores que permiten utilizar las piezas adheridas como elementos estructurales. En todo caso, no debe olvidarse que el cemento Pórtland o aluminoso se utiliza con gran profusión como adhesivo entre piezas estructurales o auxiliares. En estos casos, la adherencia suele ser física; hay una ocupación de las rugosidades y poros, inherentes a estos materiales, que permite la trabazón o fijación del conjunto.

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

Atendiendo al mecanismo de unión, los adhesivos pueden ser químicos, físicos o físico-químicos. La unión física consiste en la trabazón de elementos mediante una sustancia que ocupa los intersticios e irregularidades del material. La unión química se debe a la interacción entre las moléculas de adhesivo y las de sustrato, generalmente por fuerzas de Van Der Waals.

1.5.2.- Principales ventajas de los adhesivos.

La unión adhesiva amplía el ámbito de producción ofreciendo muchas ventajas, entre las que se encuentran las siguientes:

- **Distribución uniforme de tensión:** se eliminan las concentraciones de tensión debidas a los taladros.
- **Ausencia de cambios estructurales:** las propiedades de los materiales no se ven afectadas, como puede ocurrir con las soldaduras.
- **No se produce deformación del sustrato:** como las piezas no se calientan, como ocurre con la soldadura, resulta fácil montar componentes de masas y medidas diferentes.
- **Combinación de materiales diferentes:** permite que los diseñadores elijan y combinen materiales para poder aprovechar al máximo las propiedades de cada uno.
- **Sellado de uniones:** los adhesivos actúan también como selladores. Los montajes atornillados y remachados suelen precisar un sellado, con el consiguiente aumento de coste y trabajo.
- **Aislamiento:** es posible unir metales con diferentes propiedades electroquímicas. Se evita la corrosión, la erosión por fricción y la corrosión por rozamiento.
- **Reducción del número de componentes:** dejan de ser necesarios los pasadores, tornillos, remaches, abrazaderas, etc.
- **Mejora del aspecto del producto:** las uniones adhesivas son más lisas. Después de la unión las juntas quedan ocultas, a diferencia de las soldaduras. Esta ventaja da a los diseñadores muchas oportunidades para mejorar el aspecto del producto.

1.6.- Uniones híbridas.

Una unión híbrida es la combinación de una técnica convencional de unión (uniones mecánicas, soldaduras) con unión adhesiva. Con este método se pretende aprovechar las ventajas que ofrecen ambas técnicas de unión, mayor rigidez de las estructuras, mayor área de transferencia de esfuerzos, sellado frente a la corrosión, etc., salvando sus inconvenientes, sensibilidad a esfuerzos de pelado, problemas de envejecimiento, limitada resistencia al calor, necesidad de un utillaje caro durante el proceso de curado del adhesivo, etc. La técnica convencional de unión que forma parte de la unión híbrida

soportará los esfuerzos aplicados, sin que ocurra el fallo global de la unión si por alguna circunstancia falla el adhesivo.

En las uniones híbridas de adhesivo con soldadura por resistencia se ha comprobado que los elementos fabricados por este método resisten más carga de rotura a cortadura, aumentan la vida a fatiga y la resistencia a corrosión, si se comparan con estructuras equivalentes unidas sólo con puntos de soldadura.

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

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

Los estados tensionales a los que quedan sometidas dos placas que se unen mediante soldadura y mediante adhesivo son similares (Fig. 5), es decir en ambos casos las tensiones a lo largo de toda la longitud de unión son uniformes, tienen un valor constante. Sin embargo cuando se trata de uniones con remaches las tensiones a lo largo de la unión son variables (Fig. 5).

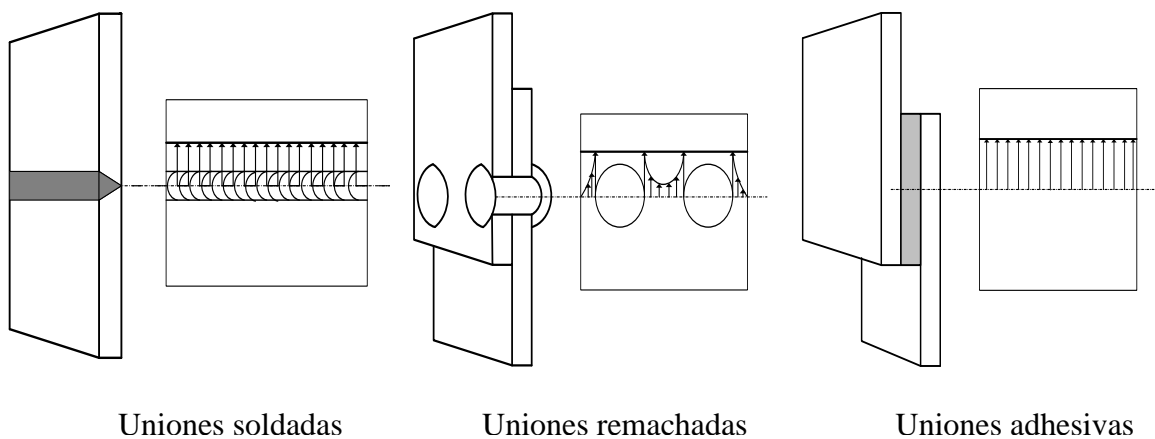


Figura 5. Distribución de tensiones en diferentes tipos de unión.

2.- UNIONES ROBLONADAS Y REMACHADAS.

2.1.- Introducción.

Uniones roblonadas son aquellas que para unir se emplea un cilindro recto de diámetro mayor de 8 mm (Fig. 6) y se remacha mediante uno o varios golpes sobre el cilindro en caliente hasta que queda ajustado al diámetro del agujero y haciendo presión sobre las superficies de los materiales a unir (Fig. 6). Se usan para uniones sometidas a grandes cargas.

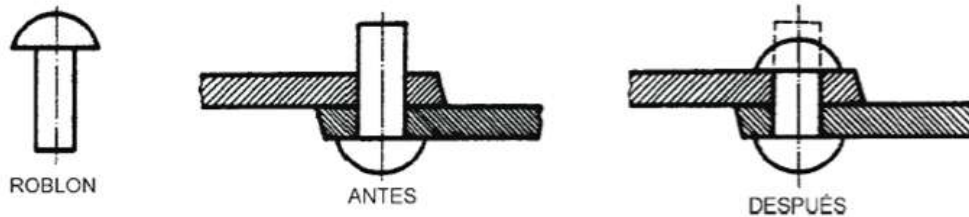


Figura 6. Proceso de remachado.

Uniones remachadas, son las uniones realizadas en frío con remaches de pequeños diámetros, inferiores siempre a 8 mm, y estos pueden ser de acero o de aleaciones ligeras. Se usan en costuras de chapa delgada.

Las dimensiones fundamentales en una unión remachada son las que se muestran en la Fig. 7.

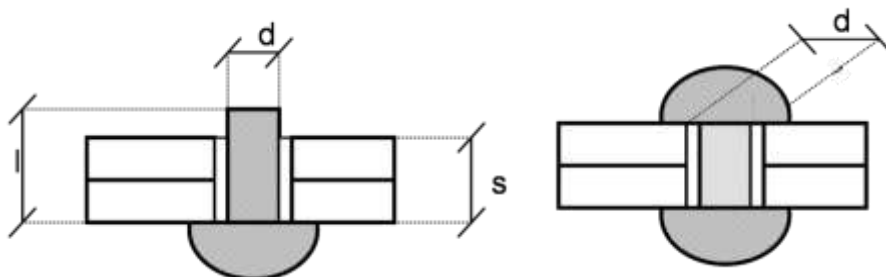


Figura 7. Dimensiones fundamentales en una unión remachada.

Las formas de trabajo más comunes de estas uniones son:

- A cortadura.
- A tracción.

2.2.- Uniones remachadas trabajando a cortadura.

2.2.1.- Introducción.

Para calcular la resistencia de estas uniones hay que comprobar los diferentes tipos de fallo:

- Fallo por cortadura.
- Fallo por aplastamiento.

- Fallo por rotura de la chapa tracción (Fig. 8).
- Fallo por cortadura de la chapa (laceración).

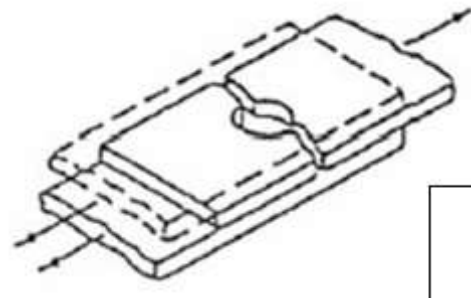


Figura 8. Fallo por tracción en uniones remachadas.

2.2.2.- Fallo por cortadura.

En el caso de que la tensión cortante a la que está sometido el remache sea superior a la tensión cortante máxima admisible por este, la unión romperá por la sección del remache sometida a cortadura (Fig. 9). En este caso la resistencia de la unión aumentaría si aumenta el diámetro del remache o si aumenta el número de estos, o la disposición de los mismos (Fig. 10).

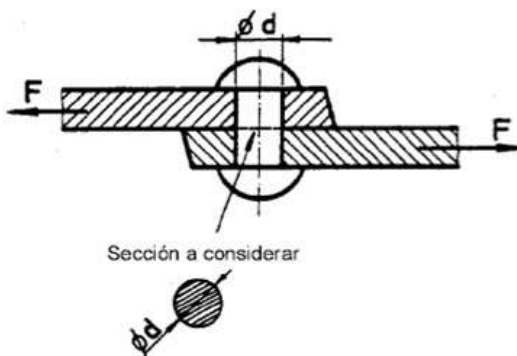


Figura 9. Roblón trabajando a simple cortadura.

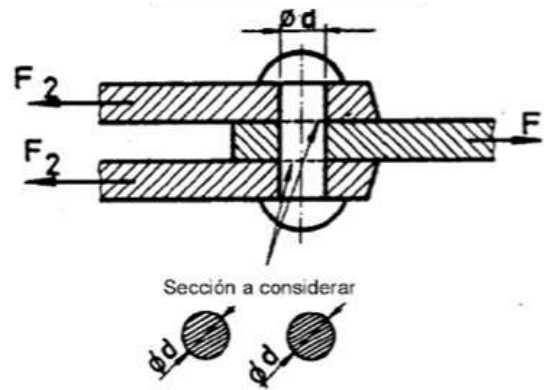


Figura 10. Roblón trabajando a doble cortadura.

Para calcular el número de remaches que se necesitan, se considera que el reparto de tensiones cortantes es uniforme sobre la sección recta, y se utiliza la siguiente expresión:

$$n_{\tau} = \frac{P}{S_r \tau_{adm}}$$

Donde:

n_{τ} : Número de remaches trabajando a simple cortadura.

P : Carga a tracción que se aplica a las placas en una unión a solape simple.

τ_{adm} : Tensión admisible a cortadura del material del remache.

S_r : Sección resistente del remache.

2.2.3.- Fallo por aplastamiento.

Este tipo de fallo puede producirse por dos motivos, uno porque el remache sea aplastado por la placa, otro porque el remache aplaste al material de la placa en la zona de contacto común. Las tensiones que se producen en esta zona son muy complejas sin embargo para su cálculo se simplifica considerando que el esfuerzo es uniforme en el área proyectada de la espiga del remache sobre la placa.

Si las chapas de la unión fueran de distinto espesor, el fallo por aplastamiento se origina primero en la de menor espesor. Si son iguales puede fallar cualquiera de ellas.

Para calcular el número de remaches necesarios se utiliza la siguiente expresión:

$$n_c = \frac{P}{d e \sigma_{c adm}}$$

Donde cada valor significa lo siguiente:

d: diámetro del agujero.

e: menor espesor de las chapas a unir.

$\sigma_{c adm}$: tensión admisible a compresión.

n_c : número de remaches.

2.2.4.- Fallo por rotura de la chapa a tracción.

Las secciones de las placas donde están las costuras remachadas son secciones debilitadas por los agujeros y por tanto, al entrar las placas en carga, podría producirse el fallo. La norma de ensayos para uniones desestima aquellos ensayos donde se produce la rotura de las placas; es por este motivo que no se incide más en este tipo de rotura.

2.2.5.- Fallo por cortadura de la chapa (laceración).

Este fallo se puede producir en la parte de la chapa situada detrás del remache. Puede evitarse aumentando la superficie que trabaja a cortadura, dando las suficientes distancias frontales y laterales desde el centro del taladro a los bordes de la chapa. Las distancias mínimas vienen descritas en la normativa correspondiente.

2.3.- Uniones remachadas trabajando a tracción.

Para este cálculo se considera que trabaja a tracción sólo el elemento de unión, despreciando el efecto de pretensado que éste pudiera ejercer sobre los elementos que une.

Además se considera que la rigidez de los elementos a unir es lo suficientemente grande frente a la del elemento de unión como para despreciar la flexión que provoque el

remache. En caso contrario, habría que realizar el cálculo del elemento a unir como una placa circular con una carga puntual centrada y apoyada sobre cuatro puntos.

El cálculo se hace utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{P}{S_r} \leq \sigma_{t adm}$$

Siendo:

P: sollicitación a la que está sometido el remache.

S_r: sección resistente del remache.

$\sigma_{t adm}$: tensión admisible a tracción (del remache).

2.4.- Normativa sobre resistencia de cálculo de remaches y roblones (Norma Básica de la Edificación para Estructuras de Acero -NBE-EA- y Eurocódigo 3 -EC-3-).

2.4.1.- Resistencia a aplastamiento.

Según la norma de Estructuras de Acero de 1995 (EA-95).

$$B_{u,a} = K \cdot \sigma_u \cdot d \cdot e$$

Donde:

B_{u,a} : sollicitación de agotamiento por aplastamiento.

K = 2, para remaches ordinarios.

K = 2.5, para remaches calibrados.

K = 3, para remaches de alta resistencia.

σ_u : tensión de límite elástico del acero de la chapa.

d : diámetro del remache.

e : espesor de la chapa.

Según EC-3.

$$B_{u,a} = 2.5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{e}{\gamma_{Mb}}$$

Donde:

α : es el menor de $\left(\frac{t_1}{3a}, \frac{s}{3a}, \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$

t₁ : distancia al borde frontal.

a : diámetro del agujero.

s : distancia entre remaches en la dirección de la carga.

f_{ub} : tensión de rotura del acero del remache.

f_u : tensión de rotura del acero de la chapa.

γ_{Mb} : coeficiente parcial de seguridad (para remaches es igual a 1.25).

Comentarios sobre aplastamiento:

- 1) La norma EC-3 considera distancias entre remaches y bordes, tensión de rotura del remache y chapa, e introduce para todas las uniones el coeficiente γ_{Mb} .
- 2) La norma EA-95 es más conservadora que la norma EC-3 (para $a=1$), incluso en el caso de remaches de alta resistencia.

2.4.2.- Resistencia a cortante.

Según la norma **EA-95**.

$$B_{u,c} = K \cdot \sigma_t \cdot A \cdot n$$

Donde:

$B_{u,c}$: sollicitación de agotamiento a cortante.

$K= 0.65$, para remaches ordinarios.

$K= 0.80$, para remaches calibrados.

σ_t : tensión de límite elástico del aceros del remache.

A : área de la sección de la caña del remache.

n : número de secciones transversales que resisten el esfuerzo cortante.

Según la norma **EC-3**.

La resistencia a cortante por cada plano de corte (en nuestro caso un solo plano de corte).

Donde:

$$B_{u,c} = 0.6 \cdot f_{ur} \cdot \frac{A_0}{\gamma_{Mr}}$$

A_0 : área del agujero.

γ_{Mr} : 1.25.

f_{ur} : tensión de rotura del acero del remache.

2.4.3.- Resistencia a tracción.

Según la norma **EA-95**

$$B_{u,t} = 0.25 \cdot \sigma_t \cdot A_0$$

Donde:

A_0 : Área del agujero.

Según la norma **EC-3**

La sollicitación de agotamiento es la siguiente: $B_{u,t} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_0}{\gamma_{Mr}}$

Comentarios sobre resistencia a tracción:

- 1) El Eurocódigo no recomienda usar roblones aislados en uniones a solape.

3.- UNIONES ATORNILLADAS.

3.1.- Introducción.

El tornillo de agua inventado por Arquímedes (287-212 AC) condujo al desarrollo de los elementos roscados que hoy son comunes a todas las tecnologías de

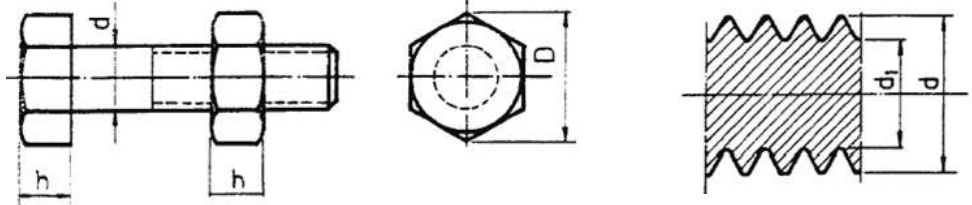


Figura 11. Dimensiones fundamentales de un tornillo.

(Fig. 11). En

la actualidad, los montajes roscados (Fig. 12) son las piezas desmontables más importantes que se utilizan en la construcción, instalación y reparación de maquinaria.

Las causas principales de fallo de un montaje roscado son:

- La relajación de la tensión.
- El autoaflojamiento.

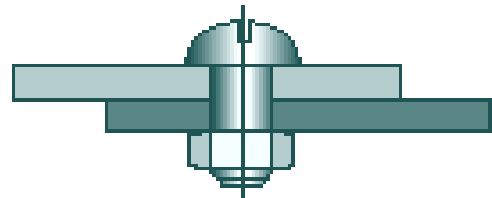


Figura 12. Unión realizada mediante tornillo.

3.2.- Relajación (Fig. 13).

Un montaje roscado “se relaja” cuando se produce un cambio permanente de la longitud axial del tornillo, cuando se relaja el propio sustrato, como en las juntas de sellado, o cuando cambia la temperatura. Esto reduce la tensión del tornillo y reduce además la fuerza de sujeción residual.

Los cambios de longitud permanentes pueden producirse por:

- *Asentamiento*. Las caras rugosas de las piezas contiguas (p.ej. tuercas, arandelas) se suavizan bajo la presión ejercida por el tornillo.
- *Deformación permanente*. La presión superficial en la cara de apoyo del tornillo o tuerca excede la resistencia a la compresión del material de la pieza tensionada.

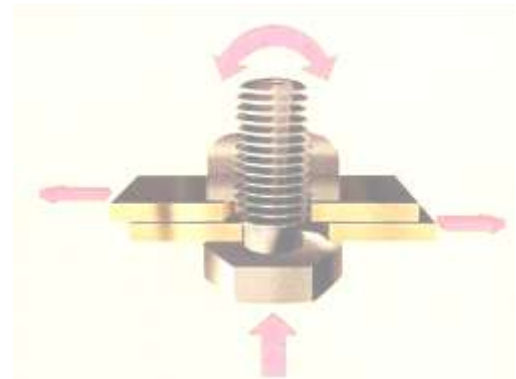


Figura 13. Esfuerzos que producen relajación y autoaflojamiento en unión atornillada.

Si puede aumentarse la elasticidad del montaje de modo que pueda compensarse el grado esperado de asentamiento y deformación permanente, puede evitarse en gran medida la disminución de la fuerza de pretensado. Esto es posible con:

- tornillos con una relación entre longitud y diámetro alta.
- tornillos y tuercas con reborde en cabeza, así como arandelas endurecidas y revenidas que reducen la presión superficial y, por tanto asentamiento sobre las superficies de apoyo.
- tornillos y tuercas con arandela elástica embutida en cabeza o con arandelas de apoyo cóncavas.
- arandelas cónicas de resorte o muelles cóncavos.

3.3.- Autoaflojamiento.

3.3.1.- Motivos del autoaflojamiento.

Después del apriete, la carga de sujeción se mantiene por la precarga del tornillo. Esto ocurre porque el tornillo se ha estirado como un muelle y la tensión actúa tirando de la tuerca hacia la cabeza y comprimiendo así los elementos sujetos. Una vez retirada la fuerza de apriete, la tensión actúa aflojando la tuerca del tornillo. La fricción de las roscas y bajo la cabeza del tornillo y de la tuerca se oponen a esta fuerza y mantienen la tensión del tornillo. Este sistema se representa matemáticamente de la manera siguiente:

$$T_L = \frac{F_v \cdot d \cdot \mu_{th}}{2 \cdot \cos \rho} + \frac{F_v \cdot d_h \cdot \mu_h}{2} - F_v \cdot d \cdot \tan(\phi/2)$$

Donde:

T_L : par resultante en el tornillo después del apriete.

B_F : tensión del tornillo.

D : diámetro medio de la rosca.

V_d : diámetro efectivo de la cabeza.

ϕ : ángulo helicoidal de la rosca.

ρ : semiángulo del flanco de la rosca (30° para roscas ISO).

μ_{th} : coeficiente de fricción de la rosca.

μ_h : coeficiente de fricción entre la cabeza del tornillo y la brida, suponiendo que la tuerca no se mueva.

Si el sistema que se sujeta está sometido a cargas alternantes o a vibración, disminuye el efecto de bloqueo provocado por los componentes de fricción, por lo que la tuerca gira sobre la rosca liberando la tensión. Vibraciones pueden ser longitudinales, transversales o combinadas. Las vibraciones transversales debidas a cargas horizontales alternantes son mucho más perjudiciales y pueden aflojar rápidamente un elemento roscado normal sin tratar. Las fuerzas longitudinales debidas a las cargas axiales también producen aflojamiento, aunque en menor grado.

3.3.2.- Formas de evitar el autoaflojamiento.

Las medidas siguientes pueden evitar el aflojamiento incontrolado de tornillos cargados correctamente:

- El uso de tornillos de alta resistencia a la tracción permite mayores fuerzas de pretensado, que son suficientes para evitar el movimiento relativo.
- Un diseño que aumente la relación l/d (l = longitud del tornillo, d = diámetro del tornillo) aumentará la elasticidad del montaje. (Históricamente, se ha considerado óptima una relación $l/d > 6$).
- La fricción se puede aumentar modificando el acabado superficial y la estructura de las superficies de apoyo del tornillo y de la tuerca.
- Al aplicar adhesivo, se elimina el grado de libertad de los movimientos laterales debido al hecho de que las holguras se llenan por completo y, al mismo tiempo, la fricción de la rosca aumenta por la conexión interfacial una vez que el adhesivo ha curado.
- Al crear una conexión firme (es decir, tornillos integrados en la pieza, puntos de soldadura), puede limitarse el deslizamiento de la rosca.

3.4.- Tipos y métodos de fijación de roscas.

3.4.1.- Método de asentamiento.

El método de asentamiento aumenta la elasticidad del montaje y compensa así el asentamiento del mismo. De este modo, se retiene en gran medida la fuerza de pretensado y se evita la relajación del montaje roscado. Sin embargo el método de asentamiento no puede evitar el autoaflojamiento del montaje roscado si se fuerzan movimientos relativos entre las piezas tensionadas. Ejemplos del método de asentamiento son las arandelas cónicas de resorte o los muelles cóncavos de gran rigidez. Otros elementos, como por ejemplo, las arandelas de resorte, elásticas, dentadas y de tipo ventilador, tienen un efecto de bloqueo inadecuado. Estos elementos no son apropiados para fijar tornillos de calidad 8.8 (grado 5 de su equivalente de EE.UU.) o superior.

3.4.2.- Dispositivos de prevención del desprendimiento (del tipo de par residual).

Los dispositivos de prevención del desprendimiento, permiten un aflojamiento o relajación parcial, pero evitan que se separe el montaje roscado. Ejemplos: tuercas almenadas, retenedores de alambre, tornillos con insertos de metal o plástico en la rosca. Estas técnicas suelen evitar la pérdida de la fijación, pero no son efectivas para mantener la carga de apriete.

3.4.3.- Dispositivos para evitar el autoaflojamiento.

Los dispositivos para evitar el autoaflojamiento impiden que los montajes roscados se aflojen por sí solos. Se basan en alguno de los siguientes métodos:

- tornillos y tuercas con dientes de enclavamiento
- tornillos de cabeza estriada
- adhesivos

3.4.4.- Elección del tornillo correcto.

Para una carga de sujeción requerida, F, el diseñador debe elegir el elemento apropiado. La carga de sujeción se relaciona con el esfuerzo, S, que sufre el tornillo por medio de la siguiente ecuación.

$$S = F / A$$

Donde A es el área de la sección transversal del tornillo o, lo que es más habitual, la suma de las áreas de los tornillos utilizados para obtener la carga de sujeción. Si el material del tornillo es un requisito previo, se conoce el valor óptimo de S (suele utilizarse el 75% del límite elástico) y por tanto puede calcularse A. El tamaño y número de los tornillos podrá entonces determinarse con la ecuación de tensión de par.

$$T = K \cdot d \cdot F$$

El par de apriete creará un esfuerzo de cizallamiento por torsión en el tornillo. Si éste supera la resistencia cizalla del tornillo, deberá aumentarse el número de tornillos reduciendo así la resistencia exigida al elemento roscado individual. Este proceso puede invertirse si las necesidades espaciales requieren la configuración de tornillos de antemano, de modo que las ecuaciones anteriores determinarán qué material deberá utilizarse para los elementos roscados.

En la práctica, el valor K depende de la aplicación y deberá determinarse por medios empíricos en cada situación. La ecuación anterior y la figura anterior se pueden utilizar sólo como orientación, midiéndose el valor real por medios experimentales.

3.5.- Cálculo resistente de tornillos.

3.5.1.- Introducción.

Los tornillos se clasifican según la norma EA-95 en función de su calidad y diámetro de la espiga en tres clases:

- Clase T: tornillos ordinarios.
- Clase TC: tornillos calibrados.
- Clase TR: tornillos de alta resistencia.

A continuación se detalla el cálculo resistente de tornillos de alta resistencia.

La resistencia de las uniones en las que se emplean tornillos de alta resistencia, se debe al aprovechamiento de las fuerzas de rozamiento desarrolladas al apretar fuertemente los diversos tornillos. Estas contrarrestan la acción de las fuerzas exteriores, que tienden a separar las piezas.

En el remachado se produce una distribución de tensiones más irregular a lo largo de la sección, mientras que en las uniones de tornillos de alta resistencia, esta distribución es mucho más uniforme sin presentar en las proximidades del agujero elevados puntos de tensión.

La fuerza de apretadura origina en la espiga del tornillo; un esfuerzo de tracción muy elevado, el cual comprime las piezas a unir dando lugar a esfuerzos de deslizamiento que se oponen al resbalamiento de ambas superficies (Fig. 14).

La magnitud de las fuerzas que se pueden transmitir dependen fundamentalmente de:

- 1º) La intensidad de la fuerza de tracción en el cuerpo del tornillo.
- 2º) El coeficiente de rozamiento que se haya conseguido.

Es de destacar que en este tipo de uniones, si están bien realizadas; los tornillos no trabajan a cortadura y por consiguiente no es preciso calcularlas para estas sollicitaciones.

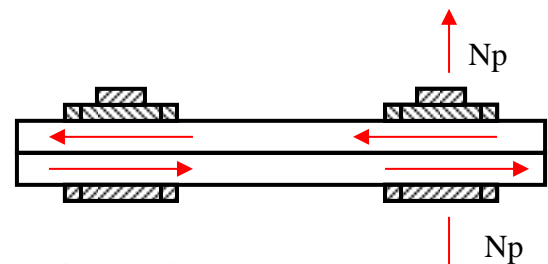


Figura 14. Tornillos de alta resistencia. Fuerzas de rozamiento creadas por el apriete del tornillo.

La distribución de tensiones para tornillos y remaches se representa en la Fig. 15.

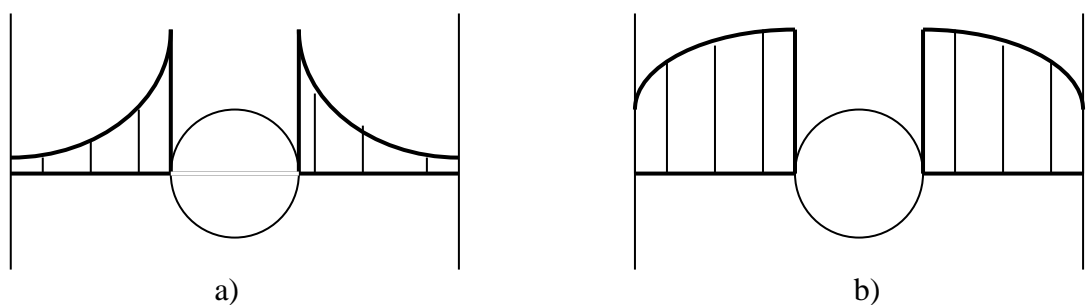


Figura 15. Distribución de tensiones: a) Remaches. b) Tornillos.

3.5.2.- Cálculo de tornillos trabajando a cortadura (Fig. 16).

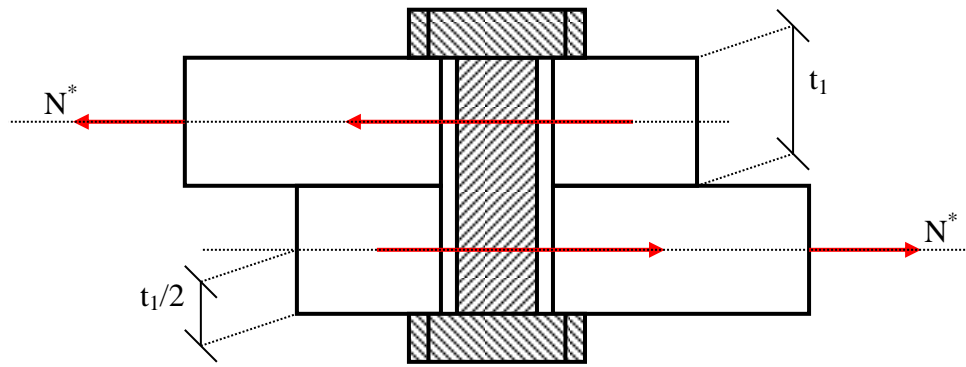


Figura 16. Esquema general unión atornillada trabajando a cortadura.

El cálculo de las uniones atornilladas es similar al descrito para las uniones remachadas, con la excepción que en el cálculo a cortadura, si los tornillos son ordinarios, se toma para el cálculo de la sección resistente el diámetro de la espiga "d" (Fig. 17).

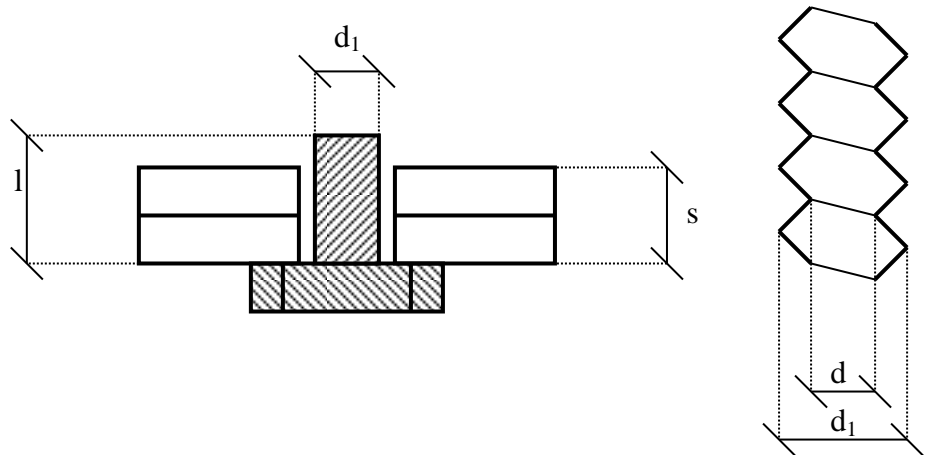


Figura 17. Dimensiones fundamentales de unión atornillada. Para el cálculo a cortadura se toma la sección "d". Para el cálculo a tracción, se toma la sección d1.

3.5.3.- Cálculo de tornillos trabajando a tracción.

El cálculo es igual que el realizado para los remaches, teniendo en cuenta que la sección resistente es la de la parte roscada.

La ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$\sigma_t = \frac{P}{S_r} \leq \sigma_{t adm}$$

Siendo:

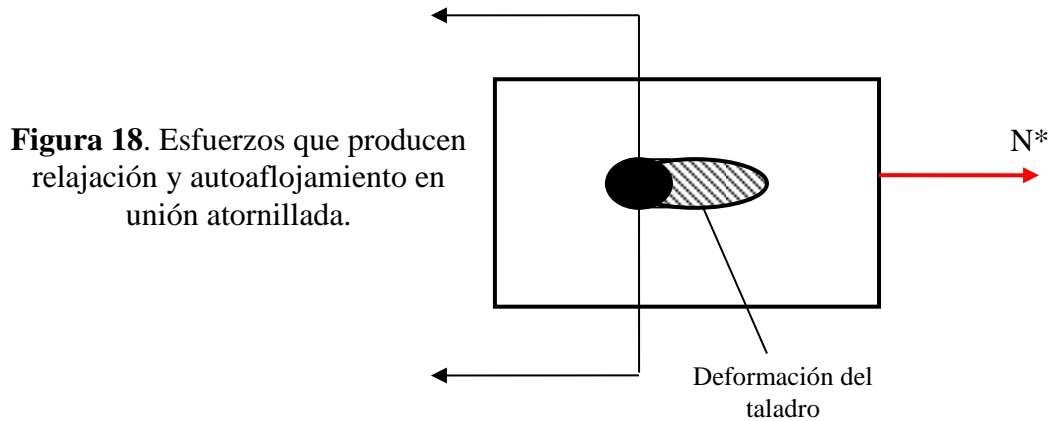
P: sollicitación a la que está sometido el remache.

Sr: sección resistente del remache.

$\sigma_{t adm}$: tensión admisible a tracción (del remache).

3.6.- Normativa sobre resistencia de cálculo de tornillos (Norma NBE-EA y Eurocódigo 3 (EC-3)).

3.6.1.- Resistencia a aplastamiento (Fig. 18).



Según EA-95.

$$B_{u,a} = K \cdot \sigma_u \cdot d \cdot e$$

Donde:

$B_{u,a}$: sollicitación de agotamiento por aplastamiento.

$K = 2$, para tornillos ordinarios.

$K = 2.5$, para tornillos calibrados.

$K = 3$, para tornillos de alta resistencia.

σ_u : tensión de límite elástico del acero de la chapa.

d : diámetro del tornillo.

e : espesor de la chapa.

Según EC-3.

$$B_{u,a} = 2.5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{e}{\gamma_{Mb}}$$

Donde:

α : es el menor de $\left(\frac{t_1}{3a}, \frac{s}{3a}, \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$

t_1 : distancia al borde frontal.

a : diámetro del agujero.

s : distancia entre tornillos en la dirección de la carga.

f_{ub} : tensión de rotura del acero del tornillo.

f_u : tensión de rotura del acero de la chapa.

γ_{Mb} : coeficiente parcial de seguridad (para tornillos es igual a 1.25).

Comentarios sobre aplastamiento:

- 3) La norma EC-3 considera distancias entre tornillos y borde, tensión de rotura del tornillo y chapa, e introduce para todas las uniones el coeficiente γ_{Mb} .
- 4) La norma EA-95 es más conservadora que la norma EC-3 (para $a=1$), incluso en el caso de tornillos de alta resistencia.

3.6.2.- Resistencia a cortante.

Norma **EA-95**.

$$B_{u,c} = K \cdot \sigma_t \cdot A \cdot n$$

Donde:

$B_{u,c}$: sollicitación de agotamiento a cortante.

$K = 0.65$, para tornillos ordinarios.

$K = 0.80$, para tornillos calibrados.

σ_t : tensión de límite elástico del aceros del tornillo.

A : área de la sección de la caña del tornillo.

n : número de secciones transversales que resisten el esfuerzo cortante.

Según la norma **EC-3** se contemplan dos casos posibles que son los siguientes:

- 1) El plano de corte pasa por la parte roscada del tornillo.

$$B_{u,c} = K \cdot f_{ub} \cdot A_r \frac{n}{\gamma_{Mb}}$$

Donde:

$K = 0.6$ para grados de resistencia 5.6, 5.6 8.8.

$K = 0.5$ para grados de resistencia 4.8, 5.8, 6.8 y 10.9.

A_r = Área resistente a tracción (del tornillo).

- 2) El plano de corte pasa por la parte no roscada del tornillo.

$$B_{u,a} = 0.5 \cdot f_{ub} \cdot A \frac{n}{\gamma_{Mb}}$$

Donde:

A : Área de la sección de la caña del tornillo.

El fallo tiene lugar por el menor de los valores entre $B_{u,c}$, y $B_{u,a}$.

Comentarios sobre resistencia a cortante:

- 1) La norma EA-95 no contempla los tornillos de alta resistencia trabajando a cortadura.

- 2) La norma EA-95 no contempla que el plano de corte pase por la parte roscada y, por tanto, obliga a la colocación de arandelas.
- 3) En el caso de tornillos calibrados y de calidades 4.6 o 5.6 (únicas mencionadas en la norma EA-95) ambas normativas coinciden en el valor de agotamiento, cuyo valor en tal caso es el siguiente:

$$\left(0.8 \cdot \sigma_t = 0.6 \frac{f_{ub}}{1.25} \right)$$

3.6.3.- Resistencia a tracción.

Según la norma **EA-95**

$$B_{u,t} = 0.8 \cdot \sigma_t \cdot A_r$$

Donde:

A_r : Área resistente a tracción (del tornillo).

Según la norma **EC-3**

La sollicitación de agotamiento es la mínima entre la de tracción del tornillo ($B_{u,t}$) y la de punzonamiento de la placa ($B_{u,z}$).

$$B_{u,t} = 0.9 \cdot f_{ub} \frac{A_r}{\gamma_{Mb}}$$

$$B_{u,z} = 0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot e_p \frac{f_u}{\gamma_{Mb}}$$

Donde:

d_m : media de la dimensión entre caras y entre vértices de la cabeza del tornillo o la tuerca, tomándose la menor de ambas.

e_p : espesor de la chapa bajo la cabeza del tornillo o la tuerca.

Comentarios sobre resistencia a tracción:

- 2) En las uniones a solape simple de elementos planos con un solo tornillo, éste se debe proveer de arandelas bajo la cabeza y bajo la tuerca para evitar el fallo por arrancamiento.

4.- UNIONES POR RECALCADO O CLINCHADO.

4.1.- Definición.

El recalado es un método de unión de chapas y perfiles sin aportación de material, que se realiza en frío. Consiste en crear una deformación que afecta a ambas chapas de manera que esta deformación es la que las mantiene unidas (Fig. 19).

El clinchado permite unir las chapas y los perfiles por deformación en dos espesores o más, según aplicación, tengan o no tratamientos de superficie. Este método permite unir las chapas aunque sus superficies estén lacadas, pintadas, plastificadas o metalizadas.

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

Con este método se obtiene una unión de alta calidad en cuanto a su aspecto, resistencia y repetitividad.

La característica de este sistema es que el mismo metal a unir provee la unión sin generación de calor, ruido o agregado de otros componentes.

La energía requerida para accionar las herramientas de CLINCHADO puede ser eléctrica, hidráulica, o neumática, existiendo modelos de mano para aplicaciones de chapa fina.

4.2.- Tipos de Clinchado.

Hay dos tipos básicos de clinchado según sea la forma de la impronta: redonda o rectangular. En ambos casos la función del equipo es usar el punzón para forzar el acero a través de las distintas capas, seguida de una expansión del material por debajo de la punta del punzón, de manera que no pueda volver.

En el clinchado redondo y en algunos rectangulares, el punzón no desgarrar el metal de manera que el área de acero en la zona de unión no disminuya, como ocurre con otro tipo de fijaciones.

Clinchado rectangular:

El clinchado *rectangular* (Fig. 20) es el más antiguo, este fuerza la capa superior a través de rajaduras en la capa inferior, seguido de una presión que produce el desplazamiento lateral

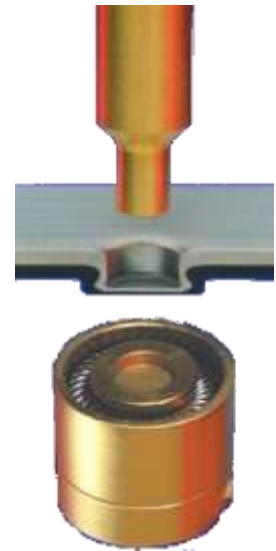


Figura 19.
Procedimiento de ejecución de recalado.

y por lo tanto el mecanismo de trabado. La acción de corte del punzón en este tipo de unión reduce la fuerza necesaria para ejecutar el proceso, permitiendo a los fabricantes producir herramientas de mano menos pesadas. Este método se utiliza para los metales que tienen ductilidad, como por ejemplo el aluminio duro, el acero inoxidable, etc., y también se utiliza cuando las chapas a unir son de espesor muy diferente o cuando la ductilidad entre las chapas es muy grande o cuando son muchas las capas a unir.

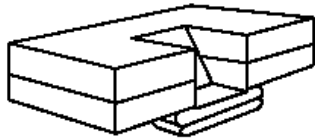


Figura 20. Detalle de la unión recalcada rectangular.

Con este tipo de clinchado se puede lograr una buena resistencia a la rotación relativa entre capas, por lo que es recomendable en situaciones donde se utilizara una única unión.

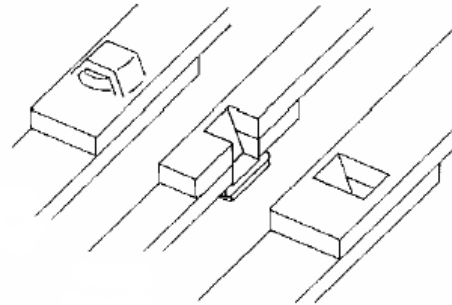


Figura 21. Aspecto de cara superior, interior y exterior de unión recalcada rectangular.

Se debe tener especial cuidado con la orientación del rectángulo (Fig. 21) de la impronta ya que la mayor capacidad de resistencia al corte está dada en forma perpendicular al lado largo del rectángulo.

Clinchado redondo:

El método de clinchado circular no produce ningún agujero, sino que simplemente deforma ambas chapas de forma que la chapa inferior queda trabada en la superior en un anillo circular (Fig. 22). Esta unión tiene la ventaja de que es más resistente y tiene buen aspecto exterior.

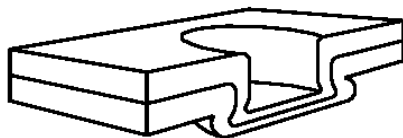


Figura 22. Detalle de la unión recalcada redonda.

Como su nombre lo sugiere se caracteriza por tener una impronta redonda del lado donde actúa el punzón, y un botón redondo del lado opuesto. En este tipo de clinchado la traba se produce en los 360° de la circunferencia (Fig. 23).

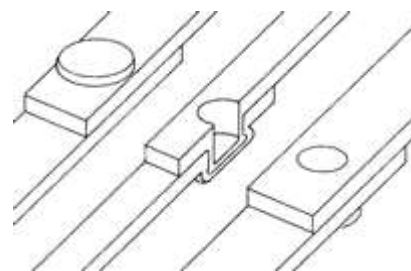


Figura 23. Aspecto de cara superior, interior y exterior de unión recalcada redonda.

Esta unión es impermeable al paso del agua y su resistencia ante cargas cíclicas, como a los grandes vientos es excelente.

Actualmente en el mercado hay herramientas de mano apropiadas en tamaño y precio para el armado de paneles y muchos montajes.

4.3.- Materiales a unir.

Son muchos los materiales en los que se puede realizar la unión por clinchado, como por ejemplo en chapas de acero, en acero inoxidable, en aleaciones de cobre, en aluminio, en zinc, etc. Este proceso requiere el uso de metales dúctiles.

La mayoría de los plásticos son difíciles de unir por este método porque tienden a recuperar su forma original después de ser unidos. Aunque en estos materiales que no se pueden unir directamente, existe la posibilidad de colocarlos entre dos chapas de metal y después unirlos.

4.4.- Proceso de ejecución.

El clinchado es un método simple y de bajo coste, efectivo para unir chapas. No requiere ningún remache, ni tornillo, ni otros métodos de unión. Tampoco requiere ningún sistema complejo de alta potencia ni requiere enfriamientos, los cuales son necesarios en las instalaciones de soldadura. La causa es que los equipos de clinchado generalmente están formados por un simple compresor de aire o se suministran del sistema general.

El proceso de ejecución consta de tres etapas (Fig. 24), la nº 1, consiste en el apoyo de las dos partes del dispositivo sobre las chapas a unir, la nº 2 es el doblado de ambas chapas mediante la presión de un punzón, y en la nº 3 se produce una expansión lateral en la zona de la unión que ayuda a fijar ambas chapas impidiendo su separación. Véanse las tres etapas en la siguiente figura:

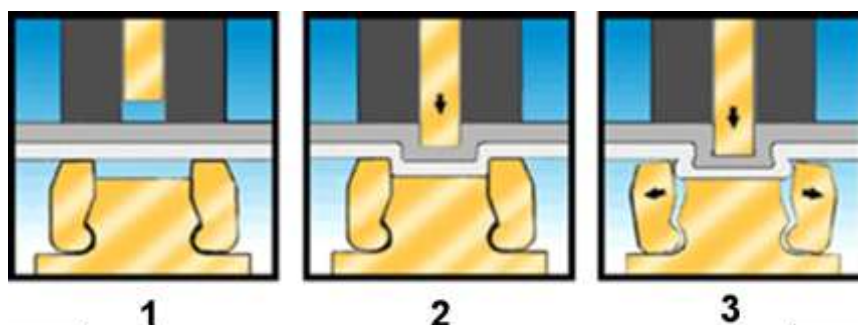


Figura 24. Proceso de ejecución del clinchado: 1. Apoyo 2. Doblado de chapas 3. Expansión lateral.

4.5.- Antecedentes y aplicaciones.

El clinchado se utiliza desde hace varias décadas en la industria automotriz y de electrodomésticos como un sustituto del engrapado, los tornillos, remaches, y la soldadura.

En el año 1978 hay constancia de sus primeras aplicaciones en Europa en la industria de chapa blanca para electrodomésticos.

En el año 1982 se introduce en el mercado una herramienta de mano desarrollada específicamente para el acero de construcción, habiendo evolucionado al día de hoy en distintos modelos para la fabricación de paneles, estructuras o montaje en obra.

En 1998, el Comité de Evaluación del ICBO (International Conference of Building Officials) según el acta AC137 de este Organismo, dispuso aceptar formalmente el sistema de clinchado, como método aprobado de uniones a realizarse en el acero de construcción.

Por sectores las aplicaciones más importantes son las siguientes:

- **Sector de la construcción:** Marcos de puertas y ventanas, elementos de suelos y techos, canalones, bandejas de cables, paredes de paneles, colgadores de lámparas de acero, tubos de ventilación, alumbrado, puertas de garajes, buzones, etc.
- **Electrodomésticos y sistemas de aire acondicionado:** Refrigeradores, lavadoras, secadoras, hornos microondas, hornos de cocina, calderas de calefacción, placas solares, aparatos de aire acondicionado, intercambiadores de calor.
- **Automoción (Fig. 25):** Parachoques frontales y traseros, capó delantero y laterales de aluminio, partes de aluminio en el cuerpo, mecanismos y soportes del limpiaparabrisas, mecanismos de las ventanas, air bags, asientos,

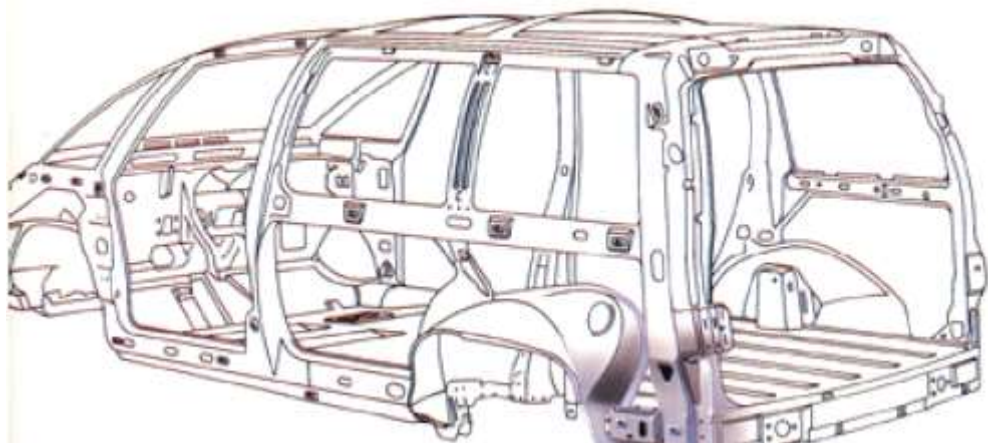


Figura 25. Aplicación del clinchado en automoción.

soportes de espejos, intercambiador de calor, aire acondicionado, pedales, mecanismos de cierre.

- **Refrigeración:** Congeladores, colectores de enfriamiento, máquinas de ventilación, marcos de ventanilla.
- **Equipamiento eléctrico y electrónico:** cajas de ordenadores, contactores, cabinas, bandejas de cables.
- **Muebles metálicos (Fig. 26):** de cocinas, cajoneras de calidad, estanterías.



Figura 26. Aplicación del clinchado en muebles metálicos.

4.6.- Ventajas de las uniones con clinchado:

- 1) Es una unión simple y se pueden realizar inspecciones con métodos no destructivos en cualquier instante.
- 2) No necesita remaches ni tornillos ni otros medios de unión adicionales. No necesitan chequeos los lotes individuales de uniones como a menudo describe la norma ISO 9000 o los requerimientos del código de construcción. Sólo estos factores a menudo representan ahorros que permiten la amortización de una instalación de clinchado en pocos meses.
- 3) Pueden evitarse los dispositivos de clasificación, orientación y alimentación para realizar las uniones. No necesita de costosos mecanismos de montaje o sistemas de sujeción para su ejecución. Tales dispositivos son fuentes continuas de problemas, lo cual significa que la técnica del clinchado requiere instalaciones más simples y mejor realizables. Esto ha sido de vital importancia particularmente en la industria de la automoción, electrodomésticos y otros sectores de alto ratio de producción, tales como la fabricación de paneles industriales.
- 4) Poco tiempo de ejecución. Comparado con el remachado o atornillado, que puede tardarse entre 5-10 segundos por ciclo, esto representa una gran diferencia en el coste de la mano de obra con respecto al remachado o al atornillado en montajes manuales o semiautomáticos.
- 5) Posibilidad de unir chapas prepintadas, esmaltadas, galvanizadas o materiales sensibles al calor sin preparación complicada y sin tener que hacer nada después del montaje.

- 6) Las uniones son fuertes, de gran resistencia a fatiga y buena resistencia a la corrosión, en esta última mejor que con las uniones soldadas.
- 7) Posibilidad de unir materiales que son difíciles de soldar entre sí. Permitiendo más oportunidades de combinación estructural, de forma que se pueden crear elementos decorativos o elementos de diferentes materiales para desarrollar su función de forma óptima.
- 8) Posibilidad de manejar espesores de chapas desde 0,1 mm hasta 10 mm.
- 9) Posibilidad de unir tres o más capas de material, incluso si no tienen el mismo espesor, tales como paneles de láminas y perfiles sin ningún riesgo de quemado durante el proceso de unión.
- 10) Posibilidad de incluir capas intermedias que actúen por ejemplo como aislante acústico en estructuras. El clinchado también se puede combinar con adhesivos, sellantes y capas de material amortiguadoras de vibraciones.
- 11) La placa interior no tiene cabeza por lo que se evitan riesgos de choque con las zonas de acoplamiento.
- 12) Menor riesgo de hacerse heridas en las manos y menos daños secundarios por la superficie de la cara opuesta por no haber ningún tornillo saliente.
- 13) Es una unión integrada, lo cual significa que no hay grandes saltos, ni deformación de la chapa ni elementos salientes.
- 14) Los operarios no necesitan largo ni costoso entrenamiento. De hecho el uso de una máquina manual de clinchado es tan fácil como usar una herramienta mecánica estándar, tales como taladradoras, lijadoras, etc.
- 15) Como elemento primario se requiere solo un compresor de aire pequeño, o se puede conectar a la red general de aire de la fábrica, en comparación con una instalación compleja y costosa de transformador, de un sistema de corriente eléctrica elevada, y de sistemas de enfriamiento y ventilación.
- 16) No tiene campos electromagnéticos grandes que pueden ser dañinos para los operarios de los equipos donde se usan corrientes elevadas. El principal inconveniente al que se expone el operario es al sonido del ambiente y a la seguridad del compresor de aire.
- 17) Su ejecución es ergonómica y es respetuosa con el medio ambiente. Esto proporciona un aumento de productividad sin arriesgar la salud.
- 18) No se produce calor, ni chispas, ni humos.

19) El clinchado no produce ninguna tensión térmica en las piezas cuando se realiza la unión, y además tiene muy buen comportamiento en situaciones de fatiga térmica o de fuego.

20) La vida de las herramientas es muy larga, del orden de 200.000 uniones sin reponer.

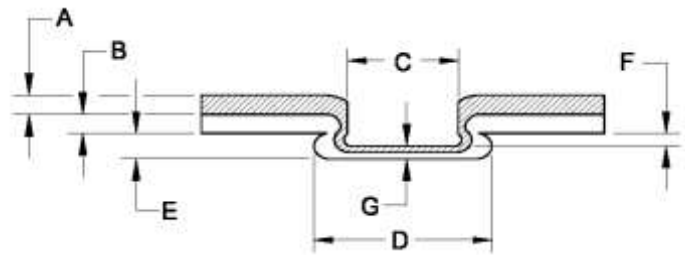
4.7.- Limitaciones

Los factores que limitan el método de clinchado son principalmente el espesor de las chapas a unir, y la distancia al extremo del material. El espesor máximo que se suele poder unir es entre 6 y 8 mm, pero las distancias mínimas entre la unión y el borde de la chapa pueden variar entre 1,5 y 6 mm.

4.8.- Parámetros clave en las uniones con clinchado.

Los parámetros que definen las uniones realizadas con clinchado son los que se muestran en la Fig. 27.

Figura 27. Parámetros fundamentales en las uniones clinchadas.



Cuyo significado es el siguiente:

- A: Espesor del material de la chapa superior
- B: Espesor del material de la chapa inferior
- C: Tamaño de la unión (Diámetro del punzón)
- D: Diámetro de la cabeza de la unión
- E: Altura de la cabeza
- F: Profundidad que entra la chapa superior dentro de la inferior
- G: Espesor de la cabeza de la unión

4.9.- Ensayos no destructivos de las uniones con clinchado.

El método para determinar si la unión está bien hecha o no es muy simple y además es un ensayo no destructivo.

Consiste en medir el diámetro del botón que ha quedado después de la unión. Si el diámetro está dentro de la tolerancia permitida, la unión se da por válida, si no la unión no es aceptable.

Para agilizar el procedimiento se usa un calibre “pasa - no pasa” preparado para tal fin.

El calibre pasa - no pasa consta de dos bocas (Fig. 28), una que tiene la tolerancia máxima y otra con la tolerancia mínima. Se comparan las dos bocas con el diámetro del botón y se aplica el criterio que se indica en la siguiente figura.

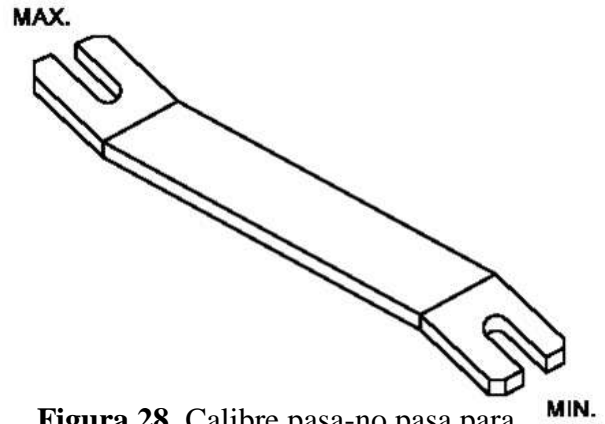


Figura 28. Calibre pasa-no pasa para medir la calidad de la unión clinchada.

Si el lado MAX. no pasa por el botón este no es aceptable (Fig. 29a), y si el lado MIN. entra con bastante holgura (Fig. 29b) entonces tampoco es aceptable la unión realizada. En el resto de los casos la unión será aceptada.

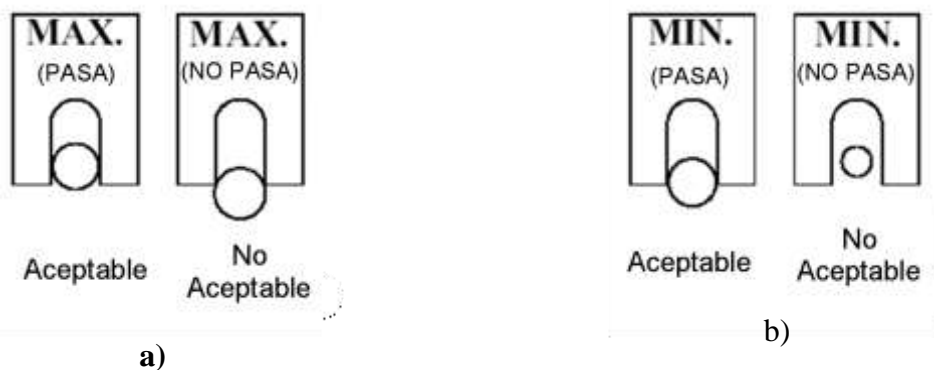


Figura 29. Criterio de aceptación o rechazo de una unión clinchada: a) Condición para el lado MAX. b) Condición para el lado MIN.

4.10.- Tensión de rotura de las uniones clinchadas.

4.10.1.- Factores que influyen en la tensión de rotura de la unión.

La tensión de rotura depende principalmente de cuatro factores.

- 1) El tipo de material. Las uniones de acero tienen mayor resistencia que las de aluminio.
- 2) El espesor del material. Una unión de dos chapas de 2 mm es más resistente que una unión de dos chapas de 1 mm.
- 3) El tamaño del punto del clinchado. Un diámetro de punto de 8 mm tiene mayor tensión de rotura que un diámetro de 5 mm.
- 4) Las condiciones superficiales de la chapa. Generalmente una superficie limpia proporciona una unión más resistente que una superficie engrasada o sucia. Sin embargo, en el acero estos efectos son relativamente menores, mientras que pueden ser muy importantes en aluminio.

El modo típico de fallo del clinchado es por desgarramiento de la chapa alrededor de la unión, habiéndose notado también que este sistema se comporta de manera excelente en situaciones de cargas cíclicas.

En las uniones de chapas con un espesor menor o igual a 0,89 mm la tensión de fluencia del acero es muy cercana a la resistencia estructural del clinchado, y por lo tanto, comparable a otros tipos de uniones. Para espesores de chapa mayores, tales como 1,24 mm / 1,60 mm / etc., se deberá aumentar el tamaño del diámetro del clinchado de manera que se puedan alcanzar los valores de resistencia del atornillado.

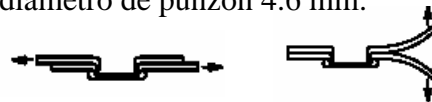
Para quien utiliza actualmente tornillos autoperforantes, la norma es utilizar un clinchado por cada tornillo en chapas de espesor hasta 1,24 mm y 4 clinchados por cada 3 tornillos para espesores mayores, siempre y cuando se esté utilizando el modelo de herramienta liviano y portátil.

En caso de utilizarse equipos más pesados (suspendidos del techo de una fábrica), la regla de diseño es un clinchado por tornillo.

Los valores estructurales que se obtienen con la unión por clinchado son apropiados para los espesores de chapa que se utilizan en la construcción con acero estructural.

4.10.2.- *Valores aproximados de tensiones estáticas con clinchado en acero suave para diámetro del punzón C=4,6 mm. (Tab. 1).*

Tabla 1. Valores de las fuerzas cortantes y de pelado que son capaces de soportar las uniones clinchadas con diámetro de punzón 4.6 mm.



| A | D | Fuerza a Cortante | Fuerza a Pelado |
|------|-----|-------------------|-----------------|
| Mm | mm | N | N |
| 0.6 | 6.3 | 1178 | 222 |
| 0.75 | 6.7 | 1601 | 311 |
| 1 | 6.9 | 1734 | 400 |

A: Espesor del material de la chapa superior

D: Diámetro de la cabeza de la unión

4.10.3.- *Valores aproximados para diámetro del punzón C=5.5 mm, para unir chapas de distinto espesor y en algunos casos de distinto material. (Tab. 2)*

Hay tres factores que tienen mucha influencia en la fuerza máxima a cortante y en la fuerza de pelado, estos son: el **espesor de las chapas** a unir, también influye cual se pone en la parte superior y la que se pone en la inferior, la **dureza** de las mismas, y el **tipo de material**, esto hace que los resultados obtenidos sean muy variados, según se muestra en los siguientes ejemplos.

Tabla 2. Valores de las fuerzas cortantes y de pelado que son capaces de soportar las uniones clinchadas con diámetro de punzón 5.5 mm.

| Chapa superior | | | Chapa inferior | | | Fuerza a Cortante | Fuerza a Pelado |
|----------------|-------|------------|----------------|-------|------------|-------------------|-----------------|
| Espesor | Tipo | Dureza | Espesor | Tipo | Dureza | | |
| mm | | Rockwell B | mm | | Rockwell B | N | N |
| 1.2 | Galv | B 42/45 | 0.8 | PP | B 36/46 | 2691 | 512 |
| 2.3 | Galv | B 66/68 | 2.3 | Galv | B 66/68 | 3692 | 1579 |
| 1 | Acero | B 56 | 1 | Acero | B 56 | 2713 | 689 |
| 1.4 | Acero | B 57 | 1 | Acero | B 56 | 3447 | 712 |
| 2.8 | HSLA | B 88 | 3.3 | HSLA | B 87 | 3714 | 756 |
| 3.3 | HSLA | B 87 | 2.8 | HSLA | B 88 | 5471 | 934 |

Galv: Aceros galvanizados.

HSLA (High Strength Low Alloy): Aceros de baja aleación y alta resistencia.

PP: Polipropileno.

4.11.- Consideraciones a ser tenidas en cuenta para realizar uniones con clinchado.

- A mayor tamaño del clinchado mayor es la capacidad estructural de la unión.
- Para obtener mayor tamaño del clinchado se necesitan equipos de mayor tamaño, limitándose la capacidad de acceso de la herramienta al punto a ser unido.
- El equipo de clinchado necesita tener acceso de ambos lados de la unión. Esto significa que no es un proceso ciego, y que los perfiles cerrados y situaciones de acceso complicado requerirán cambios en el diseño.
- Se pueden efectuar uniones entre 2 materiales iguales o distintos con espesor total de elementos a unir entre 0,1 mm hasta 10 mm.
- Es un método de unión ideal para el acero galvanizado o prepintado ya que no daña el recubrimiento.
- Después de cientos de miles de clinchados es necesario cambiar el punzón y/o la matriz debido al desgaste en los mismos, producido entre otras razones por el zinc que se le adhiere y perjudica el encastre punzón / matriz.
- No produce protuberancias como lo hacen las cabezas de los tornillos o remaches, obteniéndose un apoyo de la placa sobre superficies lisas más plano.
- Se elimina la necesidad de comprar, almacenar y transportar tornillos, así como el riesgo de perforar lo que no corresponde.

- No genera fatiga térmica en las piezas a unir, lo que constituye una característica muy importante en situaciones de fuego.
- El control de calidad de la unión es no destructivo, simple y fiable, consistiendo en medir los diámetros de la impronta superior e inferior, y el espesor de los elementos unidos en el centro de la impronta.

5.- SOLDADURA

5.1.- Introducción.

Soldadura, en ingeniería, es el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas de soldadura durante la primera mitad del siglo XX, ésta sustituyó al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es una técnica fundamental en la industria del motor, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier producto hecho con metales.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles.

Existen muchos métodos de unión por soldadura en función de las superficies a unir, del procedimiento empleado, y de los medios disponibles en general. Uno de los métodos más utilizados en las uniones híbridas combinados con adhesivos es la soldadura por resistencia.

5.2.-Soldadura por resistencia.

La soldadura por resistencia es una de las técnicas de soldadura más antiguas y ofrece un gran número de ventajas sobre otras, incluyendo rapidez y eficiencia energética. Se llama así porque emplea la resistencia propia de los materiales al paso de una corriente eléctrica para generar el calor necesario. Es una soldadura de tipo autógeno ya que en la

unión entre las piezas no intervienen materiales ajenos a ellas. En todos los procesos de soldeo por resistencia se hace pasar una corriente eléctrica que produce un calentamiento

localizado de las chapas metálicas hasta la temperatura de forja y se aplica un esfuerzo entre ellas para que se produzca la soldadura. De entre todos ellos, destaca especialmente la soldadura por puntos (Fig. 30).

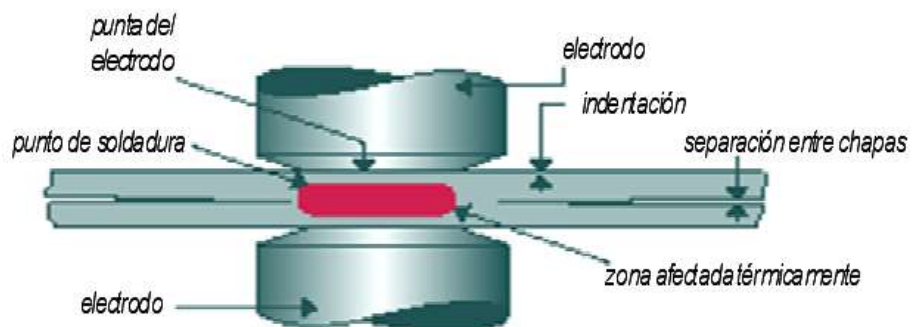


Figura 30. Esquema de resistencia por puntos.

La soldadura por resistencia con todas sus variantes ocupa un puesto importante en la historia de la producción industrial en serie, la variedad de piezas fabricadas por este proceso es extensísima. El empleo más conocido de la soldadura por resistencia es el que se lleva a cabo en la construcción de las carrocerías de los automóviles.

El soldeo por puntos es el proceso de soldadura por resistencia más utilizado en la unión de piezas formadas con chapas y láminas de acero de espesores pequeños o medianos. La soldadura por resistencia se fundamenta en la generación de una unión íntima por efecto de la energía térmica y mecánica. Durante el proceso, una corriente eléctrica fluye directamente desde un electrodo a otro atravesando las láminas a ser soldadas, a su paso encuentra una serie de resistencias que disipan energía en forma de calor. Según la Ley de Joule, el calor producido es directamente proporcional al valor de la resistencia y aumenta con el cuadrado de los valores de la intensidad.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

En esta relación Q es el calor producido, I la corriente que fluye en la zona de soldadura, R la resistencia total y t la duración total del flujo de corriente. Ajustando correctamente los parámetros, se forma un núcleo de material fluido que se denomina lenteja de soldadura. Las piezas se mantienen prensadas en todo momento por los propios electrodos ya que la unión íntima sólo se verifica por la aplicación de un esfuerzo adecuado de forja.

5.3.- Defectología de la soldadura por puntos.

Los defectos más comunes en soldadura por resistencia son:

- Grado de indentación: huella excesiva o escasa.
- Desgaste prematuro de los electrodos.
- Electrodo contaminado.
- Puntos quemados.
- Proyecciones de metal fundido.
- Sobrecalentamiento.
- Bajas propiedades mecánicas.

5.4.- Ensayos para determinar la calidad de la unión.

5.4.1.- Generalidades.

Normalmente, los requerimientos de calidad están basados en las normas y dependen mucho de la aplicación.

El diámetro nominal del punto debe ser $5\sqrt{t}$, donde t es el espesor de la chapa (si se trata de una unión disimilar se toma como referencia la chapa más delgada), y el diámetro mínimo aceptable suele ser el 80% de este valor. Este criterio es común para todos los materiales. Normalmente, tiene lugar la fractura por el punto aunque no es probable que

tenga lugar en materiales gruesos o en ensayos bajo cargas de cizalla o torsión. La fractura de la intercara puede ser un indicativo de defectos en el punto o de fragilidad en la zona de la soldadura.

A continuación, se describen brevemente los factores de calidad más básicos pero hay que tener en cuenta que existen más (Metalografía, dureza, porosidad interna, ensayos de fatiga y de impacto, etc.).

5.4.2.- Apariencia visual.

La indentación de la superficie debe estar limitada al 10 o al 20% del espesor de las chapas. Deben evitarse proyecciones, roturas, zonas quemadas y picaduras en la parte superficial así como una distorsión sustancial de los componentes.

5.4.3.- Resistencia estática.

La resistencia estática de la unión depende de los materiales implicados y del tamaño del punto. Los requerimientos mínimos para algunas combinaciones de materiales están especificados en normas y en procedimientos específicos de empresas.

Los ensayos destructivos post-soldadura son las técnicas más comúnmente utilizadas para asegurar la calidad de la soldadura. Los más empleados son el desabotonado mediante cincel o mediante pelado para la posterior medida del diámetro de la lenteja. Otros ensayos destructivos tipo son el de tensión de cizalladura, el de tensión transversal, a fatiga, a torsión, a impacto y macrográficas de la sección de soldadura.

5.4.4.-Tamaño del punto y modo de fractura.

El diámetro de la zona fundida es el principal criterio de calidad para los puntos de soldadura. Éste se corresponde, aproximadamente, con el diámetro del botón arrancado durante un ensayo destructivo.

Cuando hay un pequeño porcentaje de chatarra asociado a los ensayos destructivos periódicos, los ensayos no destructivos representan una alternativa atractiva. Los más destacados son el ensayo de desabotonado mediante cincel en su versión no destructiva y el ensayo de ultrasonidos.

5.5.- Aplicaciones de la soldadura por resistencia.

La principal aplicación de la soldadura por resistencia por puntos es la soldadura de alta rapidez de piezas formadas por chapas de metal. El proceso se puede acomodar a un amplio abanico de materiales y espesores. Los espesores más comúnmente utilizados están entre 0,5 y 5mm. Entre los materiales que pueden ser soldados por puntos resistivos destacan:

- Acero de bajo contenido en carbono: son fácilmente soldables. En el caso de los aceros con contenidos en carbono o en compuestos de aleación más altos, hay que ajustar los parámetros con cuidado ya que las extremadamente altas velocidades de enfriamiento que se dan durante el proceso pueden producir dureza elevada y fragilización en la zona de la unión.
- Aceros recubiertos: los aceros recubiertos con zinc, estaño, aluminio y otras aleaciones pueden ser satisfactoriamente soldados. Es importante tener en cuenta que la vida del electrodo es más corta que la de los aceros desnudos, debido a la interacción entre el recubrimiento y el electrodo de cobre.
- Aceros inoxidables: la mayor parte de los aceros inoxidables son soldables por puntos, pero puede darse la fragilización del punto en algunos materiales como resultado del crecimiento de grano (aceros ferríticos con alto contenido en cromo) o del endurecimiento (aceros martensíticos). Se necesitan altos esfuerzos de soldadura.
- Níquel y sus aleaciones: la alta resistencia al calor que tienen estos materiales implica la necesidad de utilizar elevados esfuerzos durante el proceso.
- Aluminio y sus aleaciones: se requieren altas intensidades y tiempos de soldadura cortos. Las condiciones superficiales de las chapas juegan un papel fundamental en la correcta formación de la unión. También hay que tener en cuenta que el deterioro de los electrodos es rápido.
- Cobre y sus aleaciones: la soldadura de materiales de elevada conductividad es difícil. Habitualmente, se usan electrodos de tungsteno o molibdeno e incluso material de aporte.

Otros materiales soldables por resistencia por puntos son el titanio, el plomo y algunos metales refractarios. Las uniones disimilares sólo son posibles si hay compatibilidad metalúrgica.

6.- ADHESIVOS.

6.1.-Definición.

Un adhesivo es un material que permite la unión entre dos superficies o sustratos, en el que actúan dos fuerzas esenciales, la adhesión y la cohesión (Fig. 31): la *adhesión* es la fuerza de unión que se produce entre el adhesivo y el sustrato y la *cohesión* es la resistencia ejercida en el interior del adhesivo.

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

La capacidad de retener materiales juntos no es, una propiedad intrínseca de una sustancia sino que, más bien, depende del contexto en el que se usa la sustancia. Dos hechos básicos importantes sobre los materiales adhesivos son que:

- una sustancia llamada adhesivo no desempeña su función independientemente del contexto de su uso.
- no existe un adhesivo que sujete “cualquier cosa a cualquier cosa” con igual utilidad.

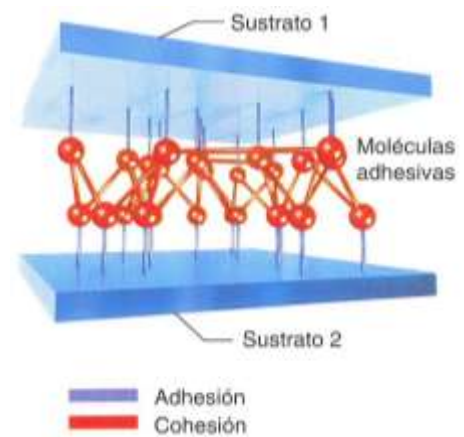


Figura 31. Esquema de las fuerzas esenciales que actúan entre dos sustratos unidos con adhesivo

A principios del siglo XX Budgett comprobó que la resistencia de dos superficies unidas por presión y muy limpias era muy débil, frente a la obtenida cuando se interponían entre ambas superficies capas delgadas de aceite o agua, donde la resistencia de la unión era mucho mayor. En todos los casos la rotura tenía lugar en la capa de líquido y nunca por la interfase líquido-sólido, demostrando que la resistencia de la unión era debida a las fuerzas de cohesión del líquido. Este simple ensayo que se puede repetir con dos pequeñas chapas pulidas nos muestra la naturaleza inherente de una unión adhesiva.

La adhesión depende de tres factores: *mecánico* (rugosidad y acabado superficial), *físico* (humectación del sustrato) y *químico* (naturaleza y afinidad que existe entre el sustrato y el adhesivo).

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

El curado puede consistir en una reacción de polimerización, parcial o total del adhesivo, o en la eliminación del disolvente o emulsionante, del adhesivo ya polimerizado, que lo mantenía en estado fluido. Hasta que el curado no se completa, la unión adhesiva se debe manejar con precaución para evitar su deterioro.

6.2.- Fundamentos.

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

Entre las cintas adhesivas por presión, que requieren la sola presión del índice para hacer su función, y el mundo de la alta tecnología de los adhesivos estructurales aeroespaciales que requieren la ayuda de una tecnología complementaria para su uso apropiado, existe un amplio espectro de adhesivos de varias formas y funciones. Lo mismo se puede decir de los sellantes, los cuales cubren el rango desde las simples cintas de sellado hasta la alta tecnología de los productos sellantes/adhesivos que se usan en el aislamiento de los cristales de ventanas de capas múltiples.

Tal variedad de materiales sólo es un problema serio para aquellos que, dándose cuenta de las ventajas del uso de la tecnología de los adhesivos y sellantes, desean emplear la tecnología en sus productos. Esta, sin embargo, no es la única complicación. Los adhesivos, por ejemplo, normalmente no van bien en un diseño que simplemente sustituye los medios mecánicos de sujeción por el pegado con adhesivo. Por lo tanto, los presuntos usuarios deben también estar familiarizados con los métodos de diseño para el uso de los adhesivos, los cuales son, en general, diferentes de los utilizados para las uniones mecánicas. Además, la forma de trabajo inicial y la durabilidad de la unión realizada con adhesivo, en las estructura en servicio, dependen mucho del método de preparación de las superficies y de la severidad de las condiciones de servicio. La estructura y la química de la región superficial de las partes a unir y su comportamiento al ambiente de servicio son muy importantes para realizar bien su funcionamiento en servicio.

Finalmente, muchos adhesivos y sellantes se deben curar, esto es, pasar de un producto relativamente líquido, de bajo peso molecular, y sin capacidad de sustentación de carga, en el cual se aplican, a una forma en estado sólido, de alto peso molecular y capaz de sostener cargas sin deslizarse ni romperse. La forma más común de realizar este curado, en el caso de los adhesivos, es mediante la aplicación de calor y presión. Los métodos necesarios para la aplicación de calor y presión son altamente dependientes de la

geometría (y tamaño) de las piezas a unir y pueden tener un gran impacto en la fabricación.

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

La reparabilidad puede ser también un factor a considerar, como se explica mas adelante. Además, si una unión realizada con adhesivo forma parte de una gran estructura, entonces se deben tener en cuenta las mismas consideraciones hechas para el cálculo de la gran estructura.

Por varias razones, y a pesar de que se hayan pensado cuidadosamente los procesos de control, las estructuras fallarán ocasionalmente antes de llegar a su carga prevista o antes de terminar su vida de servicio estimada. Por esto, la capacidad para hacer el análisis de fallos –para determinar las causas de fallo y para saber cómo corregirlas- es una importante consideración a tener en cuenta.

La tensión de rotura de una unión pegada viene determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de la unión, por el alcance del contacto entre caras (número, alcance, tipo y distribución de valores), la presencia de tensiones internas, la geometría de la unión, y las formas de aplicar las cargas mecánicas. La tensión de rotura también está influenciada por las propiedades mecánicas de alguna capa del contorno (regiones internas o interfases) que están presentes que constituyen la unión o que se forman en el adhesivo durante la fabricación de la unión. Raramente se produce una curva de tensión uniforme en una unión adhesiva por la aplicación de una fuerza externa, y la fractura se inicia cuando las tensiones locales exceden el límite de rotura local. Esto no está reconocido en la expresión usual de la tensión de rotura –un promedio que se determina dividiendo la fuerza aplicada entre el área de la junta-. Las tensiones locales, las cuales pueden ser muchas veces el promedio de tensiones y que determinan la fuerza actual que la junta puede soportar, no se conocen. El diseñador debe por tanto compensar o minimizar sus efectos.

Las tensiones se producen también en una unión por las diferencias de expansión térmica entre el adhesivo y el adherente, o durante el curado o en servicio, y por la disminución de volumen del adhesivo cuando pasa del estado líquido al sólido. Una unión diseñada o procesada inadecuadamente puede contener tantas tensiones internas que tiene poca o ninguna capacidad para soportar una carga externa. Tales uniones pueden fallar durante la manipulación normal.

6.3.- Historia.

Los adhesivos son productos orgánicos naturales o sintéticos, los cuales son utilizados por gran variedad de animales en aplicaciones tales como telas de araña (Fig. 33),

capullos de orugas (Fig. 32), huevos de insectos adheridos sobre hojas o ramas, agrupaciones de huevos de peces y anfibios, nidos de pájaros, etc.

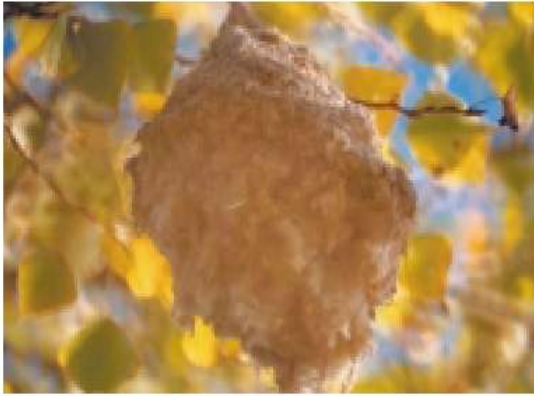


Figura 32. Capullo de orugas sujeto por adhesivo natural.



Figura 33. Tela de araña sujeta por adhesivo natural.

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

Con la aparición de las primeras civilizaciones, la utilización de los adhesivos fue ampliándose. Así, los ojos de marfil de las estatuas babilónicas estaban unidos con betún natural. En Egipto esculturas de 3300 años de antigüedad están hechas de láminas de madera chapada sobre tablas de sicómoro, donde el adhesivo procedía de la cocción de huesos de animales. También se utilizó goma de árbol de la acacia para ensamblaje y sellado de estructuras. La unión de las hojas de papiro se realizaba con almidones.

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

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

A finales del siglo XVII se funda en Holanda la primera planta industrial para la producción de colas animales. En el año 1800 comienza la fabricación comercial de cola de caseína en Alemania y Suiza. En 1823 el caucho natural empieza a utilizarse comercialmente como adhesivo. En 1840 comienzan a usarse los sellos de correos que emplean adhesivos con base almidón. En esas mismas fechas se descubre la vulcanización (curado del caucho natural por acción del azufre) que además de mejorar

las propiedades mecánicas y durabilidad del caucho, permitía la unión de caucho y metal, desarrollándose los adhesivos en base de látex hacia 1897.

La madera contrachapada fue desarrollada hacia 1900, donde se utilizaban adhesivos para unir varias capas de madera. En 1910 se desarrolló el fenol formaldehído, que fue el primer adhesivo sintético. Durante la 1ª Guerra Mundial se utilizaron adhesivos de origen animal y natural (albúmina, leche) para unir las estructuras de fuselajes y alas de los aviones realizadas en madera. En 1929 se patentó el adhesivo de dos componentes de curado en frío, fabricado con resinas fenólicas.

Durante la 2ª Guerra Mundial los aviones habían pasado de construirse de madera a utilizar aleaciones metálicas, principalmente de aluminio, y los adhesivos de origen natural fueron sustituidos por los sintéticos como los de urea-formaldehído, y los vinil-fenólicos para las uniones de madera con metales. Aunque las uniones metal-metal se hacían por remachado.

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

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

6.4.- Adhesión y Cohesión.

6.4.1.- Definiciones.

La adhesión es, la suma de las fuerzas físicas y mecánicas de atracción y adsorción. La máxima adhesión se consigue cuando el adhesivo está en contacto íntimo con las zonas a unir (Fig. 34). Este es el motivo por el que el adhesivo debe penetrar totalmente en la rugosidad superficial y mojar toda la superficie.

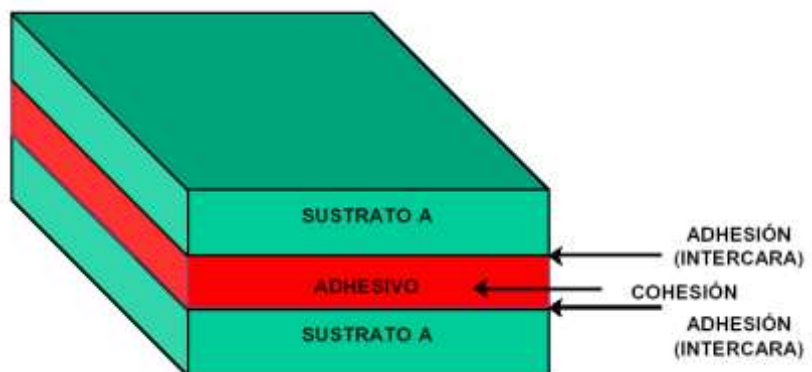


Figura 34. Esquema general de fuerzas de adhesión y cohesión.

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

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

6.4.2.- Partes que componen la unión.

En la Fig. 35 se muestra un ensamblaje unido mediante un adhesivo ideal. La terminología, tal como se define en ASTM D907-89, tiene el siguiente significado:

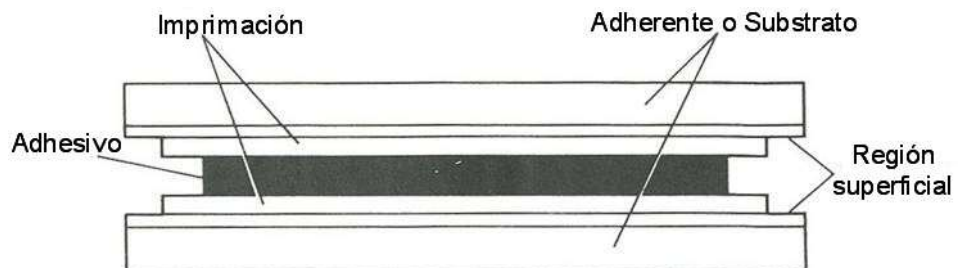


Figura 35. Partes de una unión con adhesivo.

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

6.4.3.- Tipos de fallos de la unión.

La resistencia de la unión adhesiva se evalúa realizando un ensayo de rotura de la unión. El fallo puede ocurrir según tres posibles modos (Fig. 36):

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

Cuando se diseña una unión adhesiva se pretende que la rotura no sea en ningún caso

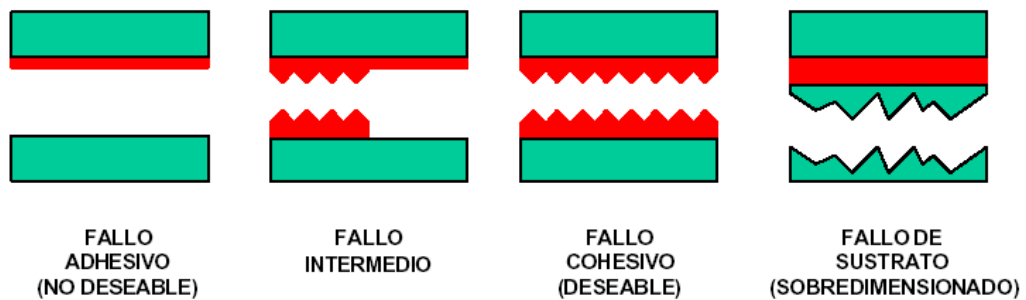


Figura 36. Tipos de fallos de una unión con adhesivo.

adhesiva, es decir, que la separación nunca se produzca en la interfase sustrato-adhesivo. Los modos de rotura adhesiva no son nunca predecibles, puesto que la magnitud de la fuerza de adhesión, depende de un gran número de factores rara vez controlables en su totalidad.

Por el contrario, sí se pueden conocer las características mecánicas del adhesivo y por tanto, se pueden predecir las cargas a la rotura en modo cohesivo bajo diferentes tipos de esfuerzos.

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

6.5.- Mecanismos de actuación del adhesivo.

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

1.- Modelo mecánico: La adhesión se debe al anclaje del adhesivo en los poros y oquedades superficiales del sustrato, por lo que el aumento de rugosidad superficial y la presencia de oquedades mejoran la adhesión.

El hielo en un vaso es un ejemplo común de adhesión por enclavamiento mecánico.

2.- Modelo de la difusión: La adhesión la produce la migración de las cadenas poliméricas entre las dos superficies en contacto. Si el adhesivo y adherente son polímeros miscibles, esto mejorará la difusión y por tanto la adhesión.

3.- Modelo termodinámico: La adhesión está causada por la formación de enlaces secundarios (fuerzas de Van del Waals, enlaces de hidrógeno) entre adhesivo y

sustrato. La adhesión aumentará al mejorar la mojabilidad, ya que si se producen muchos enlaces secundarios la fuerza de enlace será mayor.

6.6.- Adhesión estructural.

Adhesivo estructural es el que se emplea en la unión de estructuras bajo carga.

La adhesión estructural es una técnica de montaje aceptada junto a métodos tradicionales como el atornillado, el remachado y la soldadura.

La resistencia conseguida depende de las propiedades mecánicas del sustrato, de la naturaleza del adhesivo y del tipo de cargas. Los requerimientos de la unión y las condiciones de servicio pueden ser muy diferentes según sean estructuras de aviación, automoción o construcción.

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

Además, el adhesivo puede sellar al mismo tiempo que une, eliminando así la corrosión que puede producirse en una unión fijada mecánicamente. El adhesivo facilita la unión de superficies de formas irregulares, para obtener un montaje de menor peso con apenas algún cambio de las dimensiones o geometría de la pieza.

Por supuesto, es necesario evaluar algunos factores adicionales cuando se contempla el uso de adhesivos. Por ejemplo, el adhesivo debe ser adecuado para los sustratos, compatible con los métodos de producción, transmitir las cargas de trabajo previstas y resistir los ambientes a que estará expuesto. También es preciso considerar la preparación de las superficies, los métodos de aplicación y los sistemas de curado, así como el tiempo y el coste de estos aspectos de la unión.

6.7.- Diseño de uniones adhesivas.

6.7.1.- Ideas generales.

El diseño de la unión con adhesivos debe ser tal que aumente la capacidad del adhesivo de distribuir las cargas de la manera más uniforme posible por toda la superficie de unión.

Existen ciertas zonas que son focos de concentración de tensiones, tales como fallos y discontinuidades en la región de la unión, incluyendo los bordes. Las cargas que se dirigen fuera del plano de la unión tienden a ser concentradas en áreas muy pequeñas, de tal forma que las tensiones locales pueden ser varias veces superiores a las tensiones aplicadas.

La rotación de juntas o la deformación bajo una tensión aplicada puede cambiar la magnitud y dirección de las tensiones locales en la superficie de la unión. Los adhesivos muestran su menor capacidad de soportar carga cuando se someten a fuerzas de pelado.

Para grandes superficies, normalmente hay muy poco para elegir en diseño de juntas. Sin embargo para pequeñas superficies de unión existen muchas posibilidades para configuración de juntas y distribución de cargas. La regla general en diseño de juntas es *maximizar el área de afianzamiento y poner en la medida de lo posible la carga en cortadura, mientras se minimizan las fuerzas de pelado y compresión.*

Una cuestión importante a la hora de diseñar una unión es pensar en cómo se va a realizar el programa de ensayos de la unión. Inicialmente se deben hacer ensayos para elegir el adhesivo y los componentes adecuados. Posteriormente se realizan ensayos para predecir la vida y las características de la unión.

Los ensayos más rápidos y los más baratos son los ensayos destructivos que someten a una tensión rápida la unión hasta su rotura, aunque su valor de predicción no es muy alto, porque el fallo de la unión en numerosas ocasiones es debida a sollicitaciones de cargas bajas pero continuas en el tiempo, o sollicitaciones bajas pero cíclicas, o condiciones ambientales muy desfavorables que también hacen que la unión se degrade y falle.

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

La resistencia y durabilidad de una unión adhesiva vienen determinadas principalmente por los parámetros siguientes:

- adhesivo.
- sustrato.
- medio operativo.
- diseño de la unión.
- carga.

Las propiedades físicas y químicas de un adhesivo definen la fuerza de adhesión y la fuerza de cohesión de una unión adhesiva. La durabilidad también depende mucho de la naturaleza del adhesivo. Las diferentes tecnologías adhesivas permiten elegir diferentes niveles de resistencias y módulos de Young, así como las mejores propiedades de adhesión.

Los sustratos y su acabado superficial suelen ser los criterios principales para elegir el adhesivo óptimo o el diseño de la unión, pero la rigidez del componente y las propiedades mecánicas de los materiales son también criterios muy importantes.

El medio operativo de la unión, temperatura, productos químicos (disolventes), humedad, etc., influye directamente en la elección del adhesivo. El medio operativo más las cargas aplicadas son los parámetros más importantes en lo que se refiere a la durabilidad.

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

6.7.2.- Cargas y tensiones resultantes.

Las cargas que actúan sobre una unión adhesiva producen varios tipos de tensiones (Fig. 37), las tensiones se expresan normalmente en N/mm^2 . En el caso de las cargas de compresión (Fig. 37c), la distribución de tensiones sobre la línea de unión es muy uniforme. Así, todas las zonas de la línea de unión soportan la misma carga y, para calcular las tensiones, simplemente se calcula el cociente entre fuerzas incidentes y área de unión. En la práctica, las cargas de tracción y compresión puras son muy poco habituales y es más frecuente encontrar cargas de cizallamiento (Fig.37b), desgarro (Fig. 37e) y pelado (Fig. 37d). La distribución de tensiones, es decir, la repartición de los esfuerzos en la línea de unión, es menos uniforme y su cálculo es más complicado. Las tensiones de cizallamiento se distribuyen sobre la unión de manera que aparecen concentraciones. Los extremos deben resistir tensiones mayores que el centro. Si se aplica una carga de desgarro o pelado a una unión, la mayor parte de la tensión se concentra en un extremo.

6.7.3.- Diseño de la unión adhesiva.

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

- **Minimizar la carga de pelado y de desgarro**

Si se observan las curvas de distribución de tensiones de la figura adjunta, se puede ver que las fuerzas de pelado y de desgarro deben eliminarse en la medida de lo posible. Dependiendo de cómo actúen las fuerzas de pelado se puede diseñar un tipo de solución adecuado (Fig. 38).

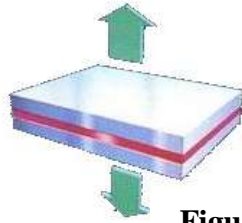


Figura 37a. Tracción

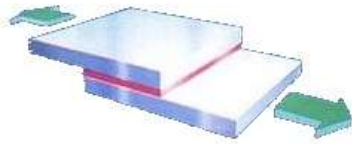
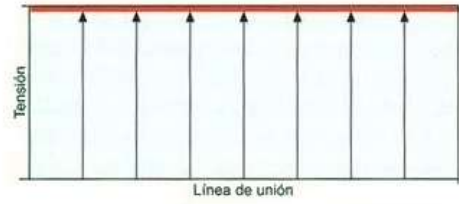


Figura 37b. Cizallamiento

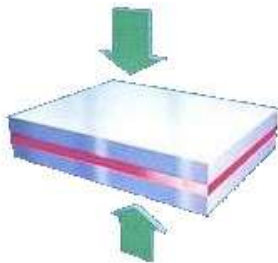
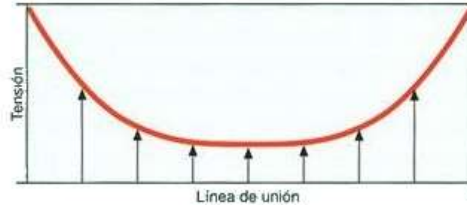


Figura 37c. Compresión

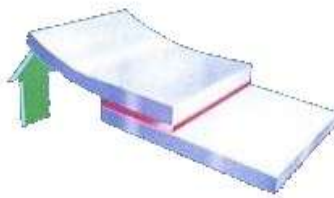
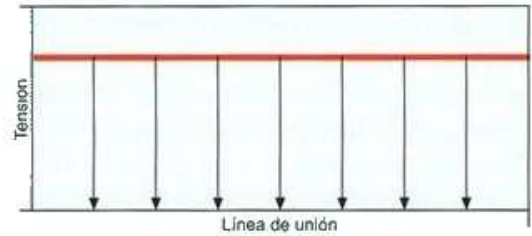


Figura 37d. Pelado

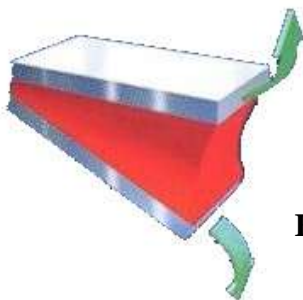
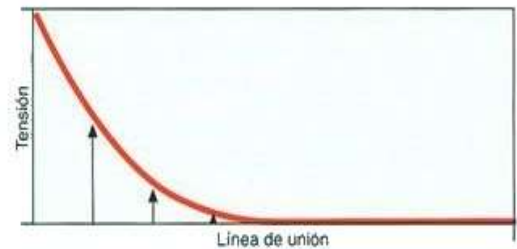


Figura 37e. Desgarro

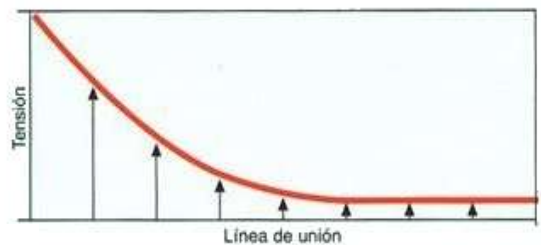


Figura 37. Tipos de cargas más frecuentes y tensiones que se producen a lo largo de la línea de unión.

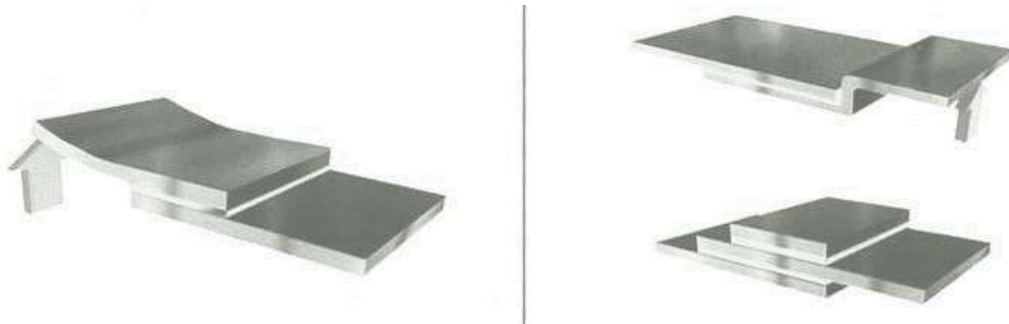


Figura 38a. Diseños para minimizar las cargas de pelado.



Figura 38b. Diseños para minimizar las cargas de desgarro.

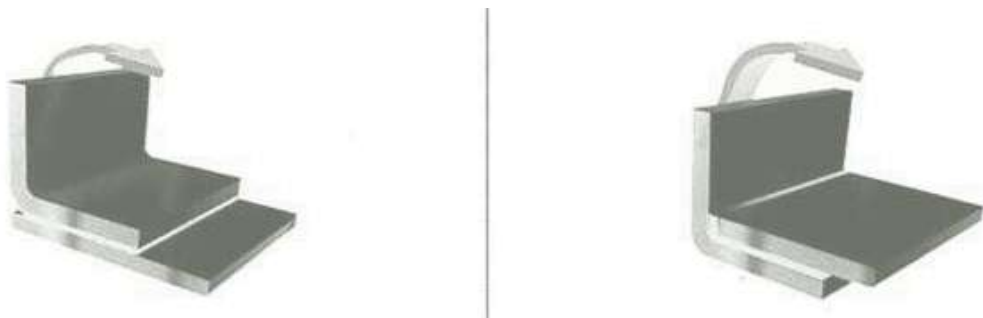


Figura 38c. Diseño para minimizar las cargas conjuntas de pelado y desgarro.

Figura 38. Diseños típicos de unión para minimizar las cargas de pelado y desgarro.

- **Maximizar el área de unión**

Otra manera sencilla pero muy importante de mejorar una junta adhesiva o, simplemente, de realizar un diseño adecuado para la unión adhesiva es **aumentar el área de unión** (Fig. 39). Si el área de unión es demasiado pequeña, suele inducirse una tensión de pelado o desgarro excesiva. La rigidez de los componentes y del adhesivo afecta a la carga de rotura de una unión. En general,

cuanto más rígido sea el componente, menos afectará la geometría de la junta a la resistencia de la unión.



Figura 39a. Diseño para maximizar el área de la unión en caso de cargas de tracción en ejes macizos.



Figura 39b. Diseño para maximizar el área de la unión en caso de uniones en ángulo.



Figura 39c. Diseño para maximizar el área de la unión en caso de cargas de tracción y torsión.

Figura 39. Diseños típicos de unión para maximizar el área de la unión.

6.8.- Cálculo de uniones adhesivas.

6.8.1.- Introducción.

La tensión de rotura de una unión con adhesivo viene determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de la unión, por el mecanismo de unión entre adhesivos y

adherente, por la presencia de tensiones internas, por la geometría de la unión, y por las formas de aplicar las cargas mecánicas. La tensión de rotura también puede estar influenciada por las propiedades mecánicas de alguna capa externa o interfase que está presente, que constituye la unión o que se forma en el adhesivo durante la fabricación de la unión.

Raramente se produce una curva de tensión uniforme en una unión adhesiva por la aplicación de una fuerza externa, y la fractura se inicia cuando las tensiones locales exceden el límite de rotura local. Esto no está reconocido en la expresión usual de la tensión de rotura –un promedio que se determina dividiendo la fuerza aplicada entre el área de la junta. Las tensiones locales, las cuales pueden ser muchas veces el promedio de tensiones y que determinan la fuerza actual que la junta puede soportar, no se conocen sus valores. El diseñador debe por tanto compensar o minimizar sus efectos.

Las tensiones se producen también en una unión por las diferencias de expansión térmica entre el adhesivo y el adherente, o durante el curado o en servicio, y por la disminución de volumen del adhesivo cuando pasa del estado líquido al sólido. Una unión diseñada o procesada inadecuadamente puede contener tantas tensiones internas que le quede poca o ninguna capacidad para soportar una carga externa. Tales uniones pueden fallar durante la manipulación normal.

6.8.2.- Cargas externas.

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

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

6.8.3.- Uniones a solape.

Supóngase una unión a solape como la mostrada en la Fig. 40, cuyas dimensiones son las que se muestran, y se va a someter a una fuerza F , según se indica.

Por el hecho de someter a la unión a la carga citada se producen dos tipos de tensiones (Fig. 41), las generadas directamente por la aplicación de la carga F , y las generadas por el momento flector resultante por el hecho de que las cargas no actúan en la misma línea (están descentradas).

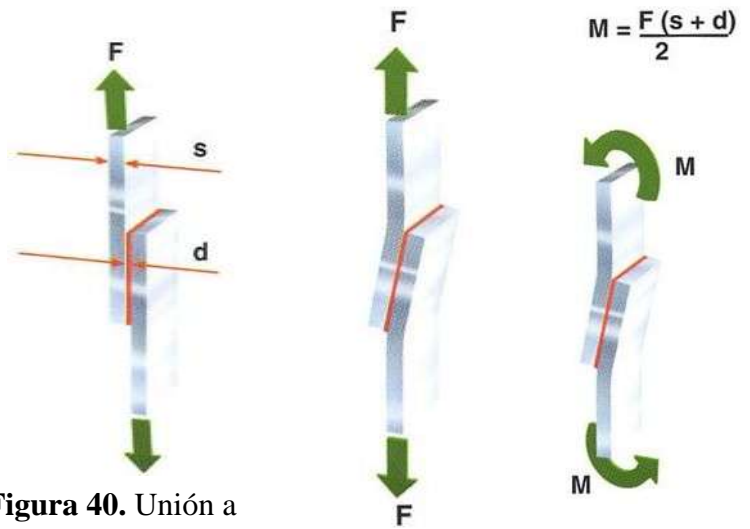


Figura 40. Unión a solape. Dimensiones fundamentales.

Figura 41. Unión a solape. Tipos de tensiones generadas durante el proceso de carga.

Las uniones solapadas son probablemente las que más comúnmente se usan para el ensayo de las uniones con adhesivos. Cuando se cargan bajo tensiones cortantes, desarrollan una curva de tensión no uniforme a lo largo del solape (Fig. 42).

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

Las excentricidades en las cargas, las cuales son características de uniones de solape simple, se traducen en cargas de flexión sobre la unión. Si el momento de flexión es bastante grande, el adherente flexa y carga el final de la unión en *tensión normal* a la línea de unión.

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

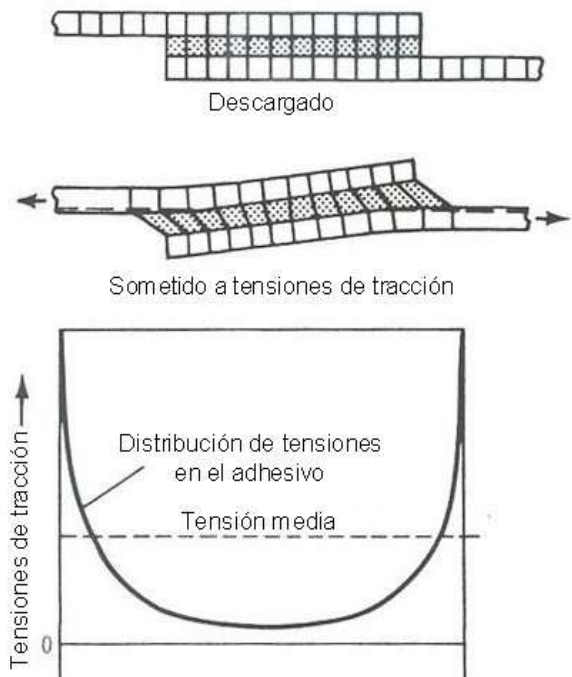


Figura 42. Unión a solape descargada y en tensión. Curva de tensiones cortantes en la unión a solape.

- 1) *La tensión de rotura media disminuye con el aumento de la longitud de la solapa, pero es independiente del ancho de la misma.*

- 2) La tensión de rotura media aumenta con la longitud del solape, pero alcanza un valor límite cuando la longitud se hace muy grande.
- 3) Las tensiones de rotura de uniones solapadas simples no son proporcionales al área de la sección de la unión. O lo que es lo mismo, las tensiones de las uniones de igual área construidas de materiales idénticos, no son necesariamente las mismas.
- 4) Las tensiones de las uniones solapadas simples son proporcionales al área de la unión sólo cuando la longitud de la solapa es constante, esto es, sólo si el área varía cuando hay cambio en el ancho de la solapa. Así, una unión que mide 25 mm de ancho por 125 mm de longitud es más débil que una unión que mide 125 mm de ancho por 25 mm de longitud.

6.8.4.- Modificaciones para mejorar la tensión de rotura de la unión.

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

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

Un remache u otro medio de sujeción mecánico (fijador) cerca del extremo de la solapa, puede también moderar los efectos de las tensiones en la unión.

6.8.5.- Optimización de las uniones solapadas.

Para conseguir el mejor comportamiento de una unión solapada (Fig.43), frente a las cargas que actúan sobre ella, se pueden seguir los siguientes criterios:



Figura 43. Unión a solape simple.
Diseño normal sin optimizar.

1) **Evitar las fuerzas excéntricas (Fig. 44):** hay varias razones por las que una unión solapada simple puede no presentar una distribución uniforme de tensiones de cizallamiento. Una razón es que las fuerzas excéntricas que actúan sobre la unión producen un momento de flexión. Este momento de flexión induce tensiones de tracción adicionales, especialmente en los extremos de la unión. Hay varias posibilidades para minimizar la influencia negativa del momento de flexión provocado por las fuerzas excéntricas que actúan sobre la línea de unión. En las siguientes figuras se muestra de forma gráfica como solucionar mediante el diseño el problema de las fuerzas excéntricas:

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

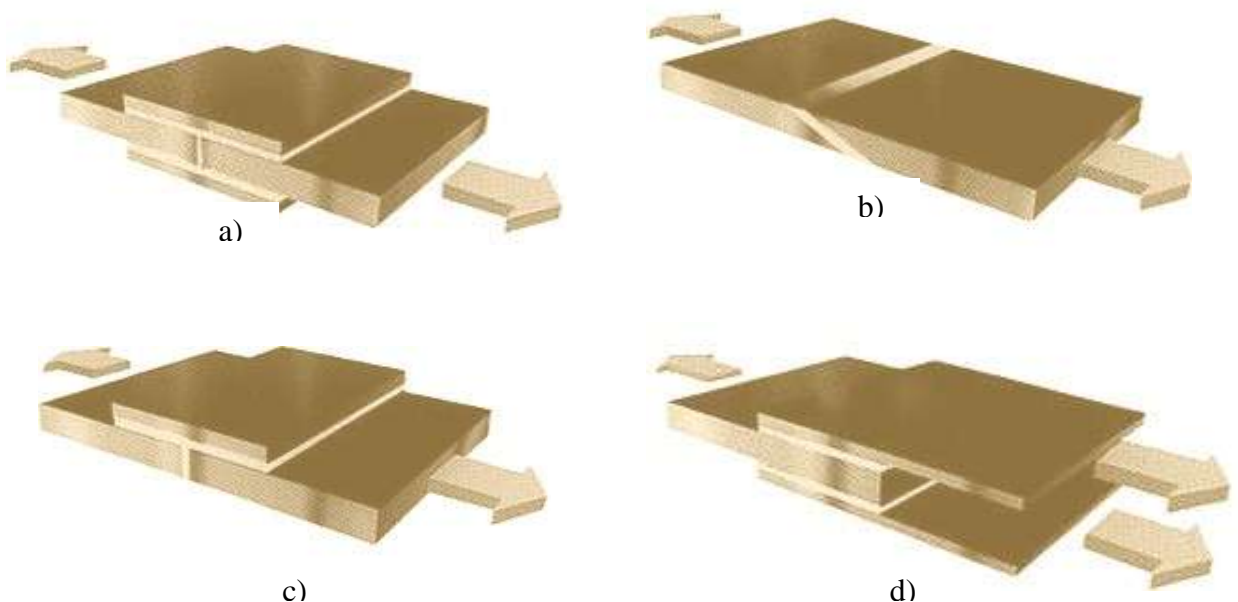


Figura 44. Diferentes diseños para minimizar el problema de las fuerzas excéntricas en las uniones solapadas. a) Cubierta doble. b) Unión en bisel. c) Con placa de cubierta simple. d) Unión a solape doble.

2) **Optimizar el solape de la junta:** esto no significa simplemente aumentar la longitud de la junta al máximo, porque la carga de rotura no aumenta proporcionalmente con la longitud de la junta o área de unión (Fig. 47). En la curva de distribución de tensiones de cizallamiento (Fig. 46), se puede ver que los extremos de la unión están sometidos a más tensión que el centro de la misma. Si se aumenta mucho la longitud de solape, puede que la carga de rotura apenas sufra cambio alguno. Esto conlleva a que la junta comienza a romperse por el extremo del solape sometido a la concentración de tensión, al superarse la fuerza adhesiva o cohesiva del adhesivo.

En la Fig. 46 se ve como el valor medio de la tensión de cizallamiento se reduce aumentando la longitud de solape, provocando esto un aumento no proporcional de la carga de rotura.

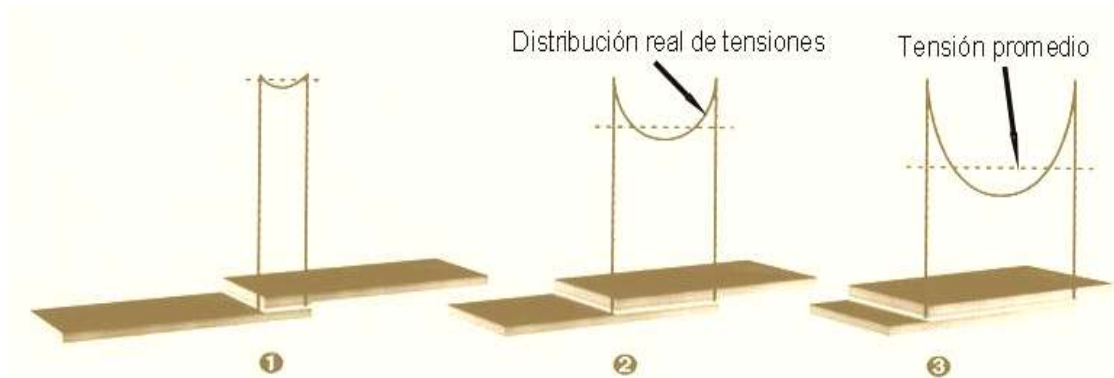


Figura 46. Distribución de tensiones en uniones con diferente longitud de solape. 1) Longitud de solape pequeña: tensión promedio alta. 2) Longitud de solape mediana: tensión promedio con valor intermedio. 3) Longitud de solape grande: tensión promedio baja.

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

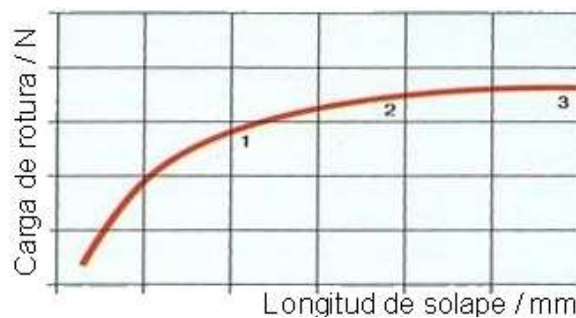


Figura 47. Carga máxima de rotura en función de la longitud de solape. Un aumento de la longitud de solape no produce un aumento proporcional en la carga máxima de rotura sino inferior.

3) Aumentar el espesor

de la línea de unión: con una línea de unión de mayor espesor, la junta soporta mejor las tensiones de cizallamiento. El espesor adicional propaga la deformación de cizallamiento a través de un volumen mayor, lo que produce menos deformación unitaria en el adhesivo y, por tanto, menor concentración de tensiones. Esto es parecido a utilizar un adhesivo de módulo más bajo; en ambos casos la junta soporta mejor la carga.

6.9.- Unión adhesiva de sustratos de plástico.

6.9.1.- Ideas generales.

El término "plástico" comprende muchos materiales sintéticos. Hay muchas maneras de clasificar los plásticos. La más simple es una clasificación general en tres tipos básicos:

- termoestables.
- termoplásticos.
- elastómeros.

Sin embargo, esta sencilla clasificación es inadecuada para definir propiedades de montaje. Las diversas estructuras químicas de los distintos sustratos de plástico y las propiedades físicas resultantes son los factores decisivos en la ingeniería de los adhesivos.

Igual que con todos los materiales que van a unirse por medios adhesivos, es preciso cumplir dos condiciones previas, que son las siguientes:

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

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

Los sustratos plásticos suelen presentar el problema de que las propiedades del material base no se correspondan con las propiedades superficiales. Las razones pueden ser la composición del sustrato plástico y/o el proceso de fabricación. Una capa superficial débil producirá una unión de baja resistencia, con independencia del adhesivo elegido.

6.9.2.- Agrietamiento por tensión de los termoplásticos.

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

- 1) Deben existir ciertas tensiones en el sustrato. En la mayoría de las piezas de plástico, están presentes en forma de tensiones residuales causadas por la transformación o se producen por efecto de fuerzas externas.
- 2) Sobre la pieza debe actuar un medio de peso molecular bajo (p.ej. acetona, alcohol).

6.9.3.- Métodos para prevenir el agrietamiento.

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

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

6.9.4.- Resumen de recursos disponible para unir sustratos de plástico.

Cuando se producen al mismo tiempo varios efectos superficiales no deseados, el tratamiento mecánico superficial ha demostrado ser la solución más completa y eficaz. Este método cambia la estructura superficial de manera favorable a la unión adhesiva, y la superficie de unión efectiva aumenta debido al incremento de rugosidad.

En casos en los que resulta difícil o imposible unir plásticos, se utilizan métodos de pretratamiento superficial físico y químico para mejorar el contacto del adhesivo con la superficie.

6.10.- Durabilidad de las uniones adhesivas.

Al seleccionar un adhesivo para una aplicación determinada, una de las consideraciones más importantes es el ambiente al que se someterá la unión adhesiva. Por supuesto, la fuerza que actúa sobre la unión adhesiva debe ser capaz de soportar la carga máxima esperada (sin excesiva deformación permanente) y de resistir la fatiga o las tensiones cíclicas. Las tensiones cíclicas, en especial las lentas, son mucho más perjudiciales para una unión adhesiva que una tensión continua. El adhesivo elegido para una aplicación determinada debe ser capaz de resistir estas cargas y tensiones, no sólo al comienzo, sino también después de una exposición sostenida a los factores ambientales más severos que incidirán durante la vida de la unión adhesiva. El calor y la humedad suelen ser los factores ambientales más perjudiciales para la mayoría de las uniones adhesivas.

Las tensiones debidas a una dilatación térmica diferencial entre materiales distintos con muy diferentes coeficientes de dilatación, p.ej. en una unión adhesiva de plástico y metal,

requieren adhesivos de módulo bajo (no frágiles) para que su comportamiento sea óptimo. Otros factores que afectan a la durabilidad de la unión son los disolventes y la luz ultravioleta. Se debe elegir siempre un adhesivo que sea resistente a estos factores; no es válido revestir la unión adhesiva con alguna capa "protectora" que pueda agrietarse o volverse permeable a los disolventes o a la humedad.

Una vez que el adhesivo ha curado completamente y por tanto adquirido sus características físico-químicas definitivas, se verá sometida a una serie de agentes externos que pueden modificar sus propiedades. El medio puede debilitar la junta adhesiva y provocar el fallo frente a esfuerzos mecánicos más débiles que los previstos.

Por ello, es necesario caracterizar las propiedades físico-químicas de cada adhesivo y su variación frente a los agentes externos a los que pueda verse sometida. Esto es lo que se conoce como "durabilidad del adhesivo".

Los valores de resistencia ambiental se dan siempre en relación a la resistencia definitiva que se logra en la junta adhesiva. Normalmente se emplean ensayos normalizados (a tracción, desgarro, etc.) y se observa la pérdida de la resistencia inicial en porcentaje, tras exponer la probeta al agente concreto durante un número determinado de horas. Las gráficas resultantes nos dan una idea de la degradación de la unión adhesiva bajo tales condiciones.

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

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

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

1. Efecto de las temperaturas bajas.
2. Resistencia al calor.
3. Envejecimiento a temperatura.

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

Los elastómeros pierden sus características viscoelásticas por debajo de su temperatura de transición vítrea, la cual suele estar varias decenas de grados bajo cero. A tales temperaturas se vuelven rígidos, pasando a tener un comportamiento vítreo, con módulos

elásticos mucho mayores y elongaciones a la rotura muy inferiores. En condiciones de frío extremo las juntas elásticas podrán sufrir roturas por efecto de los esfuerzos producidos por las piezas que están sellando sobre la propia junta elástica, dando lugar a la fugas.

Se entiende por **resistencia al calor** la resistencia que presenta el adhesivo frente a altas temperaturas puntuales. El efecto de tales temperaturas es la disminución de la viscosidad del material polimérico durante un cierto tiempo.

Los materiales termoplásticos se reblandecen enormemente por encima de su temperatura de transición vítrea, llegando a un estado fluido por encima de la temperatura de reblandecimiento. El efecto del calor sobre estos materiales es muy drástico, aunque puede ser reversible, por debajo de la temperatura de descomposición. A altas temperaturas presentan un porcentaje muy bajo de su poder adhesivo inicial.

Los materiales termoestables, por el contrario, presentan sólo ligeras modificaciones de su reología por encima de la temperatura de transición vítrea, no llegando en ningún momento a un estado fluido. A temperaturas excesivamente altas pueden descomponerse de forma irreversible. Los materiales elastómeros presentan un comportamiento similar, aunque conservando sus propiedades elásticas cerca de la temperatura de descomposición.

El envejecimiento a temperatura (Fig. 48) es el efecto que se produce por la exposición de la junta adhesiva a una elevada temperatura de forma constante. El comportamiento de los adhesivos sometidos a alta temperatura durante períodos largos de tiempo (Fig. 49), es muy diferente al debido a su exposición a altas temperaturas puntuales.

En general, los compuestos orgánicos sometidos a temperaturas altas por debajo de la

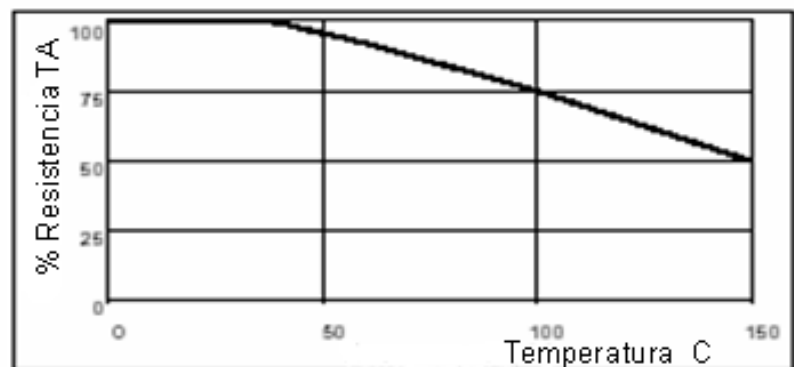


Figura 48. Resistencia al calor de un adhesivo anaeróbico.

temperatura de degradación sufren fenómenos de oxidación progresiva. Los esfuerzos mecánicos, la luz ultravioleta y la presencia de agentes oxidantes aceleran estos procesos que pueden terminar por degradar completamente la junta adhesiva, incluso por debajo de la temperatura de descomposición del material. Este efecto se observa especialmente en materiales termoplásticos, sobre todo cuando se hallan a temperaturas de comportamiento viscoelástico.

Sin embargo, algunos materiales, fundamentalmente duroplásticos, pueden presentar fenómenos de postcurado que modifican sus propiedades mecánicas y mejoran su resistencia a la temperatura como consecuencia del incremento del grado de reticulación. Estos fenómenos se aprovechan en ocasiones para mejorar las características de ciertas adhesiones.

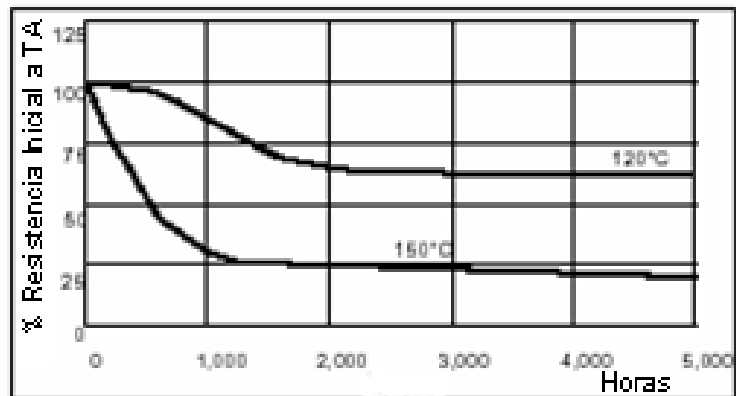


Figura 49. Envejecimiento por temperatura de un adhesivo anaeróbico.

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

Cuando el agua accede a la interfase adhesiva compite con el adhesivo curado por adsorberse e incluso combinarse con el sustrato. El agua tiende a desplazar la resina curada allí donde existen enlaces secundarios produciendo tensiones sobre los menos numerosos enlaces químicos de la interfase y dando lugar a fenómenos de adsorción.

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

- 1) La absorción de agua por el adhesivo.
- 2) La adsorción de agua en la interfase por desplazamiento del adhesivo.

En el caso de uniones metal-metal, la única posibilidad de acceso de la humedad es a través del adhesivo. Sin embargo, los metales son materiales de alta energía superficial y tienden a combinarse con el agua, desplazando la junta adhesiva. En los materiales compuestos la humedad puede ser absorbida por la resina superficial y ser difundida hacia la interfase.

La absorción de la humedad por parte del adhesivo no causa el deterioro de la junta adhesiva por pérdida de la resistencia del material polímero, sino porque es capaz de aportar a la interfase una mayor concentración de agua. Por este motivo, los adhesivos que presentan mejores durabilidades frente a ambientes húmedos son aquellos en los cuáles el agua es virtualmente insoluble.

Existen multitud de **fluidos** (gases y líquidos) que tienen también un efecto negativo sobre la junta adhesiva. La mayoría de ellos basan su influencia en la modificación de las

propiedades del propio material adhesivo. Como en el caso de otros agentes externos, el efecto de los fluidos sobre la durabilidad de una adhesión se mide en relación con la resistencia máxima del adhesivo. Los ensayos se realizan también a lo largo del tiempo. De un modo general se puede hablar de dos tipos de defectos:

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

6.11.- Tipos de adhesivos.

6.11.1.- Introducción.

Probablemente haya tantas formas de clasificar adhesivos como adhesivos hay: por química, por uso, por métodos de aplicación, por métodos de curado, por reactividad, por su comercialización, por su reología, por su tiempo de vida, por sus aplicaciones, por su origen, y otros. A veces es incluso difícil determinar qué es un adhesivo, dependiendo del uso. Tal es así que los autores de los muchos manuales disponibles, no han llegado a un acuerdo en un método racional para clasificar todos los adhesivos.

Las clasificaciones más amplias están basadas en las necesidades por las que se hacen, y después se modifican a medida que se van realizando. Estas dan lugar a tres clases principales de adhesivos: *estructurales*, *laminados*, y *sensibles a la presión*. Los adhesivos sensibles a la presión usualmente se agrupan separadamente a causa de su característica única, incluso cuando su uso puede situarlos en una de las otras dos clases. Las características más importantes de cada uno de ellos son las siguientes:

- *Adhesivos estructurales*. Las cargas pueden ser grandes, y el área de unión requerida es pequeña comparada con el área superficial total (chapa del chasis del automóvil, ensamblaje de aviones, muebles).
- *Adhesivos laminados*. Las cargas son normalmente pequeñas y la zona de unión abarca una gran parte de la superficie (contrachapado, aglomerado, etiquetado, calcomanías).
- *Adhesivos sensibles a la presión*. Su uso puede ser estructural o laminar, pero la fácil aplicación y la rápida formación de la unión de los PSA es su ventaja principal. Normalmente las cargas son pequeñas, y a menudo las uniones que produce son temporales.

Otras clasificaciones de adhesivos podrían ser las siguientes:

- *Adhesivos híbridos*: Epoxi, siliconas, polímeros de alta temperatura.
- *Adhesivos rígidos y flexibles*: Los adhesivos rígidos son aquellos que al someterlos a un estado de cargas en aumento progresivo, estos se deforman igual

que lo hace el sustrato. Adhesivo flexible es aquel que se deforma más que el sustrato. Los adhesivos flexibles se comportan como flexibles con todos los sustratos, pero los adhesivos rígidos sólo se comportan como totalmente rígidos cuando se trata de sustratos que no tienen presencia de capas de pintura protectoras sobre la superficie metálica.

- *Polímeros de termosecado*: Epoxi, fenólicos, poliésteres, acrílicos.
- *Gomas de termosecado*: Uretanos polieter, uretanos poliésteres.
- *Adhesivos termoplásticos*: Poliamida, poliéster.
- *Elastómeros*: Neopreno, goma de nitrilo, bloques de polímero de estireno-butadieno.
- *Poliolefinas*: Gomas naturales, polibutadieno, polipropileno.
- *Adhesivos naturales*: Caseína, pegamento oculto, pegamento de pescado, pegamento vegetal.

6.11.2.-Adhesivos termocurados.

Los adhesivos termocurados están disponibles en principio en tres formas distintas: *líquido, pastoso y sólido*.

Los adhesivos de termocurado están también disponibles en láminas de varios espesores. Las láminas son flexibles y se pueden cortar o punzonar con la forma de una junta particular.

6.11.3.- Adhesivos termoplásticos.

Como indica su nombre, se ablandan hasta fundir con la temperatura, por lo que tienen poca resistencia al calor y a la fluencia, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones de sellado. Su resistencia al despegue es entre buena y moderada.

Los adhesivos termoplásticos están en general disponibles en las mismas formas que los de termocurado, con la posible excepción de los pastosos. La forma líquida puede ser una solución y/o dispersión del polímero termoplástico base y otros ingredientes, componentes en un medio volátil, o pueden ser 100% sistemas sólidos conteniendo líquido monómero, prepolímero, y catalizador, para lo cual se adiciona un acelerador que induce la polimerización al sólido, polímeros de altos peso molecular.

Los adhesivos termoplásticos están también disponibles en forma sólida (primariamente, en soporte o no de lámina); en forma granular; y en barras de materiales extruidos, flexible, acordonados enrollados en carretes apropiados para las aplicaciones

automáticas. La activación por calor se usa cuando los adherentes no son permeables y son capaces de resistir las temperaturas requeridas. En aquellos compuestos que contienen resinas de termocurado, el calor cura la resina. Estas técnicas de activación se usan como sustratos de unión, uno o ambos de los cuales se revisten con un adhesivo de base disolvente apropiado que se ha secado pasando a un estado sin necesidad de ser golpeado.

Hay adhesivos termoplásticos que no contienen ninguna resina reactiva al calor y que se calientan para adherirse a la unión en estado líquido. Estos son especialmente apropiados para su uso con maquinaria de alta velocidad.

6.11.4.- Adhesivos elastómeros.

Vulcanizados o con enlaces cruzados, dan mejores valores de resiliencia, presentan menos fluencia y tienen una resistencia al calor superior a los termoplásticos; por otro lado, tienen una resistencia muy grande a flexión, superior a todos.

6.11.5.- Adhesivos termoestables.

Están formados por polímeros que experimentan, por curado, una transformación física y química irreversible que los hace infusibles e insolubles. Tienen buena resistencia a la fluencia, alto módulo de elasticidad y gran resistencia a la temperatura. Su fragilidad depende, entre otras cosas, de la estructura molecular del monómero; sin embargo, se pueden conseguir comportamientos mecánicos diferentes, ajustando las composiciones y condiciones de curado.

6.11.6.- Adhesivos de procedencia animal.

Son adhesivos preparados a partir de colágeno de los mamíferos, proteína principal del cuero, huesos y tendones. Cuando el colágeno de las proteínas, insoluble en agua, se trata con ácidos, álcalis o agua caliente, se convierte lentamente en un material soluble. Si la proteína original es bastante pura y la transformación se hace por procesos lentos, el producto de alto peso molecular se llama gelatina y puede emplearse con fines comestibles y fotográficos. El material de peso molecular más bajo, producido por un tratamiento más enérgico de fuentes de colágeno menos tratables, es normalmente de color más oscuro y está más impurificado; a este producto se le llama *cola animal*. La composición química del colágeno obtenido a partir de una gran variedad de mamíferos varía muy poco. La *cola de caseína* se prepara disolviendo caseína, una fosfoproteína obtenida de la leche, en un disolvente acuoso alcalino. La caseína se obtiene de la leche desnatada por precipitación con ácido sulfúrico, clorhídrico o láctico.

6.11.7.- Adhesivos vegetales.

Son aquellos solubles o dispersables en agua, que son producidos o extraídos de materias primas naturales por procesos relativamente simples. Los almidones que

constituyen la principal fuente de adhesivos pueden extraerse de raíces, tubérculos y médulas de las plantas. Las principales fuentes de almidón son: maíz, patatas, boniatos, y arroz. Los adhesivos proteínicos de origen vegetal, como la cola de soja, tienen propiedades similares a los adhesivos de origen animal. Especial interés tiene el grupo de las gomas naturales como el caucho, el agar-agar o la goma arábiga.

6.11.8.- Adhesivos orgánicos sintéticos.

Son los obtenidos industrialmente mediante síntesis orgánica. Dentro del grupo de los termoestables están los adhesivos de *urea-formaldehído*, los de *fenol-formaldehído* o las resinas epoxi. Dentro del grupo de los termoplásticos utilizados como adhesivos termofusibles se encuentran el *polietileno*, las *poliamidas* y los *poliésteres*. Dentro del grupo de los elastómeros están el *estireno-butadieno* o la *silicona*.

6.11.9.- Adhesivos anaeróbicos.

Los adhesivos anaeróbicos son líquidos monoméricos de un sólo componente que curan por polimerización de radicales libres con la eliminación de oxígeno. Estos materiales se envasan en contacto con aire para mantener su forma monomérica.

Los adhesivos y selladores anaeróbicos son sustancias que no reaccionan en presencia de oxígeno (aire), pero que polimerizan en ausencia de aire y en presencia de iones metálicos. Estos productos tienen numerosas aplicaciones en aquellos montajes en los que el esfuerzo dominante sea de cortadura. En general adolecen de resistencia a la tracción, al impacto y al pelado, propiedades necesarias para su uso con fines estructurales. Existen, no obstante, ciertas formulaciones anaeróbicas en base a metacrilatos de uretano, los cuáles contienen segmentos "rígidos" y "flexibles" en sus moléculas y que tienen aplicaciones como adhesivos estructurales.

Los adhesivos anaeróbicos son ideales para su uso en montajes metálicos. La superficie de los metales, rica en iones, favorece la generación de radicales libres en su reacción con los peróxidos presentes en la formulación del adhesivo. No obstante, los sustratos metálicos presentan diferentes niveles de actividad, que se pueden clasificar en los dos siguientes grupos:

1. *Superficies activas* como acero, latón, bronce, cobre, hierro, etc.
2. *Superficies pasivas* como aceros de alta aleación, aluminio, níquel, zinc, estaño, plata, oro, capas de óxido, capas de cromado, revestimientos anódicos, acero inoxidable, etc.

Cuando las superficies de los sustratos metálicos son *pasivas* se puede emplear un agente químico que supla la ausencia de iones desencadenantes de la reacción de polimerización. Este agente se denomina "*activador*". Los tiempos de curado son elevados con metales pasivados. La corrosión y suciedad superficiales evitan el contacto de los iones con el adhesivo anaeróbico, inhibiendo la reacción.

Los sustratos no metálicos (plásticos, cerámicas, madera, vidrio, etc.) también requieren activación.

Los adhesivos anaeróbicos pueden curar también por efecto del calor. Así tras calentar la línea de unión durante 3 a 5 minutos se observa un inicio del proceso de curado. La polimerización completa se puede conseguir calentando entre 120 C y 150 C durante 30 min. Existen además formulaciones de adhesivos anaeróbicos que, una vez curado el adhesivo, incrementan su reticulación por efecto del calor mejorando la resistencia mecánica.

6.11.10.- Adhesivos de curado UV.

Reaccionan al exponerlos a la luz ultravioleta. Es importante que la luz ultravioleta alcance toda la superficie de unión. Para ello, al menos uno de los sustratos debe ser transparente a la longitud de onda de luz ultravioleta correspondiente. Las características más importantes de esta familia de adhesivos son un curado muy rápido, capacidad de relleno de holguras y adhesión a muchos sustratos.

- La polimerización-reticulación inducida por la luz se empleaba ya hace más de 4000 años en la preparación de momias. Pero no fue hasta finales del siglo XIX cuando Niepce tuvo la brillante idea de emplear el mismo asfalto sensible a la luz como material imagen para obtener la primera fotografía permanente. Un adhesivo de curado UV contiene una sustancia química denominada fotoiniciador. Cuando el fotoiniciador se expone a la luz UV reacciona para generar radicales libres. Los radicales libres causan la polimerización de los monómeros en el sistema adhesivo.

6.11.11.- Cianoacrilatos. (Comúnmente llamados “superglues”).

Los cianoacrilatos, como se denomina a los adhesivos instantáneos, presentan excepcionales características adhesivas. Por ello y por la comodidad de su uso se han convertido en una de las soluciones más comunes a los problemas de ensamblaje entre materiales muy diversos.

Los cianoacrilatos son adhesivos monocomponentes que polimerizan rápidamente cuando son aprisionados en forma de una película fina entre dos sustratos.

En estado fluido los adhesivos en base a cianoacrilato se hallan compuestos por monómeros reactivos, estabilizados en medio ácido débil. La polimerización de los monómeros de cianoacrilato tiene lugar por vía aniónica cuando aparecen centros iniciadores básicos. Esto ocurre en presencia de compuestos débilmente básicos, como aminas, alcoholes o agua. Tales sustancias, en concentración suficiente, generan los núcleos sobre los cuales se van adicionando unidades monómeras, creando cadenas de polímeros y haciendo que el fluido pase a estado sólido.

Casi todos los sustratos poseen humedad adsorbida sobre sus superficies, y esta humedad proporciona iones hidroxilo que servirán como iniciadores de la polimerización aniónica.

Cuando una gota de cianoacrilato es comprimida o extendida entre dos superficies, la fina película resultante entra en íntimo contacto con las trazas de humedad adsorbidas en la superficie de los sustratos, dando lugar a una rápida iniciación de la polimerización. Cuanto más fina es la película de cianoacrilato más rápidamente se produce su curado. Una gota o un cordón de cianoacrilato situado en una superficie normal no ácida permanecerá líquida durante mucho tiempo. Sin embargo, cuando sea extendida o presionada en una fina película, la polimerización tendrá lugar rápidamente.

Los cianoacrilatos no polimerizan tan rápidamente en grandes holguras a no ser que se aplique un activador en la superficie de adhesión o sobre el mismo adhesivo.

Las formulaciones viscosas sólo son efectivas en holguras de hasta 0.1 mm aproximadamente si no se emplea un activador superficial, el cual se debe aplicar sobre una o ambas superficies, mientras que el adhesivo sólo se aplica sobre una de ellas.

Cuando las superficies a adherir son ácidas, es necesario el uso de un activador superficial o de una formulación insensible a la superficie para obtener tiempos de fijación cortos. No obstante, el uso de activadores superficiales no suele ser necesario para la mayoría de los sustratos, los cuales dan lugar a velocidades de fijación suficientemente rápidas para la mayoría de las aplicaciones. El uso de activadores superficiales no da lugar a adhesiones más fuertes, sino únicamente a tiempos de manipulación más cortos.

Entre las ventajas ofrecidas por los cianoacrilatos se encuentran las siguientes:

- Alta resistencia a cortadura, tracción y compresión.
- Curados extremadamente rápidos.
- Sólo son necesarias cantidades pequeñas de adhesivo para formar adhesiones fuertes.
- Adhieren una gran variedad de materiales, incluyendo la mayoría de los plásticos.
- Buena resistencia química.
- Forman adhesiones virtualmente incoloras si se evitan los excesos.

Como el resto de los materiales adhesivos, los cianoacrilatos presentan limitaciones. Estas se pueden resumir en las siguientes:

- Tienen capacidad de relleno de holgura limitada (normalmente 0.2mm).
- Resistencia pobre al impacto y al pelado sobre sustratos rígidos con la excepción de los cianoacrilatos tenaces.
- Resistencia pobre a la humedad sobre sustratos metálicos, mejorada únicamente por los cianoacrilatos tenaces.
- Las formulaciones de cianoacrilatos tenaces soportan hasta los 120 C en algunos casos. La temperatura máxima a la que pueden ser expuestos es de 80 C. Las

exposiciones prolongadas a temperaturas superiores conducen a la pérdida progresiva de la resistencia.

- El "blooming" o empañamiento causado por la volatilidad del monómero.
- No adhieren sustratos vítreos.

Por su rapidez y comodidad de uso, los cianoacrilatos son adhesivos ideales para procesos automatizados de ensamblaje. Su carácter monocomponente permite que puedan ser aplicados mediante sencillos sistemas de dosificación, los cuales pueden ser acoplados a las correspondientes estaciones dentro de la cadena de producción. Uno de los sectores de mayor consumo de cianoacrilatos es el de la Automoción. Muchas de las piezas plásticas del habitáculo, así como los cierres y otros elementos se adhieren con estos adhesivos. Como consecuencia de su uso en primeros equipos, el cianoacrilato también se emplea en el mantenimiento y la reparación de muchos de estos elementos, ya sea de forma directa sobre los vehículos o en la fabricación de los accesorios. Otro gran mercado es el de la Electrónica y la Electricidad. Ciertas formulaciones han sido desarrolladas para cubrir las exigencias de estos sectores. Podemos añadir a la lista los fabricantes de desechables médicos, la industria cosmética, la industria militar, etc.

Uno de los usos más curiosos del cianoacrilato es el del desenmascarado de huellas digitales. Los vapores de cianoacrilato polimerizan sobre las huellas que dejan los dedos, formando líneas visibles. Este sistema se emplea asiduamente por muchos departamentos de investigación policial. Una de las aplicaciones que mayor interés está adquiriendo recientemente es el uso del cianoacrilato en el campo de la sutura médica, tanto en cirugía como para cerrar heridas. Los monómeros empleados básicamente son los de butilo o superiores debido a su mayor flexibilidad y menor toxicidad. Estos compuestos fueron empleados durante la guerra del Vietnam pero sólo recientemente han sido aprobados para su uso con fines médicos. Los exploradores llevan asimismo cianoacrilatos para cerrar los cortes producidos en las expediciones.

Curan muy rápidamente cuando se confinan entre superficies. La humedad condensada sobre los sustratos inicia la reacción de curado, que avanza desde las superficies de los sustratos hacia el centro de la unión adhesiva. Los cianoacrilatos son idóneos para unir piezas pequeñas y conseguir una fijación rapidísima. Debido a su limitada capacidad de relleno de holguras, requieren superficies coincidentes. Su adhesión a la mayoría de los sustratos es excelente y la resistencia de la unión al cizallamiento y a la tracción es muy buena. No deben utilizarse en vidrio o en piezas continuamente expuestas al agua.

6.11.12.- Epoxis.

Los epoxis son adhesivos normalmente bicomponentes en forma de resina más activador. Una vez premezclados la polimerización comienza lentamente por lo que deben ser aplicados sobre las piezas a unir y mantener los sustratos en posición hasta alcanzada la resistencia a la manipulación.

En el pasado la mayoría de los epoxis se formulaban como bicomponentes que debían ser mezclados inmediatamente antes de ser empleados y tenían una vida de mezcla limitada. Sin embargo, en la actualidad existen adhesivos epoxi monocomponentes con un agente endurecedor latente que se libera únicamente por reacción a alta temperatura.

Por debajo de la Tg de la mezcla (por debajo de 0 °C) no se produce reacción alguna. Al elevarse la temperatura comienza la policondensación de la resina.

Los epoxis empleados en aplicaciones estructurales deben ser curados a temperaturas altas o a temperatura ambiente con post-curado por calor. La ventaja del post-curado como operación independiente, incluso en el caso de juntas ya curadas con algo de calor, es que puede ser realizado sin el uso de sistemas de sujeción o sistemas de calentamiento con prensas hidráulicas.

Las propiedades de los epoxis son las siguientes:

- Muy alta resistencia a cortadura, tracción y compresión.
- Resistencia a temperaturas de hasta 180 °C (hasta 250 °C en algunas formulaciones).
- Adhieren casi todos los sustratos.
- Muy buena resistencia química.
- Gran capacidad de relleno de holgura.
- Adhesivos muy rígidos. Resistencia a pelado y a impacto en formulaciones flexibles (epoxi-nitrilo).
- Aunque es dieléctrico y aislante térmico, puede ser modificado ser conductor de la electricidad y del calor. Además se pueden adicionar cargas para mejorar las características mecánicas (como fibra de vidrio) o para disminuir la densidad (como microesferas neumáticas).
- Son mecanizables.

Algunas desventajas son:

- Presentan problemas de absorción y difusión de la humedad en su seno.
- Sistemas de alto rendimiento bicomponentes y con necesidad de calor, al menos en la etapa de post-curado.
- Problemas de tiempos de curado, vida de la mezcla y necesidad de temperatura para conseguir un alto grado de reticulación.

Los epoxis se emplean en muchas *aplicaciones*:

- Aditivos para hormigones y elementos de construcción.
- Adhesivos estructurales para la industria aeronáutica.
- Fabricación de materiales compuestos.
- Recubrimientos superficiales.
- Electrónica (circuitos impresos, encapsulación, etc.).
- Imprimaciones.

6.11.13.- Acrílicos.

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

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

1. Sistemas adhesivo más activador.
2. Sistemas bicomponentes.
3. Sistemas bicomponentes sin necesidad de mezcla.

Los diversos ensayos realizados sobre adhesivos acrílicos muestran su excelente durabilidad (resistencia a la fatiga, a agentes medioambientales, propagación de la rotura, efecto de la holgura de adhesión, diseño de la junta, etc.). Presentan además tiempos de manipulación muy cortos.

6.11.14.- Acrílicos modificados.

Curan en ausencia de oxígeno al entrar en contacto con un activador. Estos adhesivos evitan los problemas derivados de la vida útil de los componentes mezclados o del tiempo de aplicación para el proceso de unión, ya que el adhesivo sólo reacciona al entrar en contacto con el activador. La superficie de unión ha de tener un ancho mínimo de 5 mm para impedir el acceso al oxígeno. En comparación con los adhesivos anaeróbicos, son más resistentes a impacto y a pelado y presentan una buena adhesión a muchos sustratos.

6.11.15.- Las siliconas.

Curan típicamente por reacción con la humedad ambiental, aunque también existen fórmulas que pueden curar por exposición a la luz ultravioleta. Las siliconas se distinguen por el subproducto que generan al curar con la humedad (p.ej. curado acetoxi, alcoxi u oxímico). Las siliconas curadas son materiales muy flexibles, con excelente adhesión a muchos sustratos. Su resistencia a la intemperie es excelente, aunque los disolventes no polares las hinchan fácilmente.

Las siliconas monocomponentes presentan tiempos de formación de piel muy cortos, que rondan los 5 minutos en el caso de las acéticas.

Las siliconas bicomponentes presentan tiempos de polimerización mucho más cortos que las monocomponentes, siendo muy empleadas en procesos productivos.

La polimerización de las siliconas da lugar a subproductos de reacción que por lo general son volátiles. Usualmente las siliconas se clasifican de acuerdo con el subproducto que liberan durante el proceso de curado: acéticas, alcoxi, amínicas u oxímicas. Cuando se quieren prevenir los problemas de corrosión se emplean siliconas alcoxi u oxímicas.

Existen además siliconas que curan bajo radiación UV, mediante el uso de fotoiniciadores en la composición. Normalmente se emplean lámparas con emisión UV para fijar el producto sobre los sustratos. A veces se utiliza como sistema de curado dual junto con el curado clásico por humedad.

6.11.16.- Poliuretanos.

Los poliuretanos monocomponentes curan convirtiéndolos en sólidos flexibles cuando se exponen a la humedad ambiental. La humedad reacciona con un complejo de isocianato para producir la polimerización. Esto limita la profundidad de curado a unos 10 mm. El adhesivo curado es sumamente tenaz, puede tener una resistencia cohesiva entre media y alta y es pintable.

Los poliuretanos son polímeros basados en la química del isocianato. A menudo la denominación "poliuretano" es incorrecta, ya que sólo una pequeña fracción de los enlaces son verdaderos grupos uretano. Son el resultado de la reacción de un isocianato con agua, o con un poliol o una amina en el caso de los poliuretanos bicomponentes.

Los isocianatos empleados pertenecen a dos grupos fundamentales: aromáticos (por ejemplo, MDI) y alifáticos (por ejemplo, TDI). Dentro de los aromáticos el MDI se emplea generalmente para poliuretanos de alto módulo, mientras el TDI es especialmente útil para formulaciones de bajo módulo. Los isocianatos alifáticos son en general más estables frente a la radiación UV.

Los poliuretanos normalmente se preparan haciendo reaccionar los isocianatos con polioles para producir pre-polímeros de uretano.

La alta polaridad de los pre-polímeros de uretano proporciona buenas características adhesivas, aunque incrementa apreciablemente la viscosidad del adhesivo, especialmente a bajas temperaturas. Sin embargo, la formulación de los adhesivos de poliuretano no permite incluir promotores de la adhesión, por lo que se debe acudir al uso de imprimaciones para mejorar la durabilidad de las adhesiones.

La combinación entre prepolímeros de uretano e isocianatos genera un olor característico de los poliuretanos. La reacción de curado es relativamente lenta, dando lugar a tiempos de formación de piel de alrededor de una hora.

Los poliuretanos estructurales, de alto módulo, presentan problemas de estabilidad cuando se incorpora a su formulación promotores de la adhesión, lo cual obliga al uso de imprimaciones que contienen isocianatos y silanos, y que ejercen la función de interfase

entre el adhesivo y el sustrato. El uso del imprimador mejora la adhesión sobre vidrio, aluminio y algunos plásticos, además de incrementar enormemente la vida de la adhesión.

Los poliuretanos presentan las siguientes *ventajas*:

- Unen y sellan un amplio rango de sustratos.
- Presentan una buena capacidad de relleno de holguras y excelente capacidad de sellado.
- Permanecen flexibles entre -40 C y 80 C.
- Buena resistencia al agua y buena resistencia a los productos químicos.
- El adhesivo aplicado se puede pintar.
- Producen olores muy suaves debidos al propio prepolímero de uretano.
- Los subproductos generados durante el curado no son olorosos (dióxido de carbono).
- Elongaciones a la rotura de entre el 400% y el 800%.
- Presentan fenómenos de histéresis que pueden aprovecharse en la amortiguación de ruidos, vibraciones, etc.

Algunas *desventajas* son las que siguen:

- Problemas de seguridad e higiene relacionados con los isocianatos, empleados en la elaboración de los poliuretanos.
- Una vez curados, los poliuretanos contienen concentraciones extremadamente bajas de isocianato sin reaccionar.
- Curado lento de los productos monocomponentes.
- Precisan imprimaciones para realizar uniones estructurales.
- Resistencia pobre a la radiación UV.

6.11.17.- Silanos modificados.

Los silanos modificados fueron descubiertos en Japón hace más de dos décadas. Su uso como selladores y adhesivos elásticos ha crecido de forma espectacular hasta llegar a consumos del orden de las siliconas o los poliuretanos y con una tendencia de crecimiento superior a éstos.

Los silanos modificados se basan en poliéteres terminados con grupos siloxanos. La reacción de polimerización sucede a través de los grupos siloxano terminales, iniciada por la humedad ambiental o la adición de segundo componente. Como subproducto de reacción se genera metanol en baja concentración, lo que minimiza los olores. La reacción de curado es, una policondensación.

En los silanos modificados la formación de piel tiene lugar entre los 10 y los 30 minutos posteriores a su aplicación.

A diferencia de los poliuretanos, los silanos modificados permiten incluir agentes promotores de la adhesión en su formulación. Esto, unido con la polaridad del polímero, permite una gran adhesión sobre sustratos muy variados, incluyendo polímeros y vidrio.

Los silanos modificados presentan las siguientes *ventajas*:

- Buena adhesividad sobre una amplia variedad de sustratos.
- Presentan viscosidades bajas antes del curado, lo cual facilita su dosificación.
- Unen y sellan un amplio rango de sustratos incluso muchos materiales plásticos sin necesidad de imprimaciones.
- Presentan una buena capacidad de relleno de holguras y capacidad de sellado.
- Permanecen flexibles entre -40 C y 100 C.
- Buena resistencia al agua.
- Buena resistencia a los productos químicos.
- Buena resistencia a la radiación UV.
- El adhesivo aplicado se puede pintar.
- Producen subproductos de bajo olor (metanol).
- Elongaciones a la rotura de entre el 400% y el 800%.

Algunas *desventajas* son las que siguen:

- Curado lento de los productos monocomponentes.
- Son adhesivos pintables cuando forman piel.
- Después de las 24 horas precisan de los tratamientos habituales para pintar plásticos.

6.12.- Selección de adhesivos.

6.12.1.- Primera aproximación a la elección del adhesivo.

Con frecuencia, la selección del adhesivo más adecuado puede requerir la experiencia de especialistas. Los cuadros de selección que a continuación se muestran (Tab. 3), están concebidos para que el diseñador tenga la posibilidad de escoger sistemáticamente opciones de adhesivos que puedan ser aceptables. Tienen por objeto servir de guía y no sustituyen los ensayos para verificar el comportamiento a largo plazo empleando procesos de producción simulados.

Breve descripción de las familias de adhesivos:

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

Tabla 3. Selección de adhesivos en función de los sustratos a unir.

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

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

6.12.2.- Factores a tener en cuenta para elegir el adhesivo.

6.12.2.1.- Uso.

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

6.12.2.2.- Aplicación.

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

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

6.12.2.3.- Materiales a unir.

Los materiales a unir (adherentes) influyen en la elección del adhesivo con respecto a sus propiedades mecánicas y físicas, así como también se requiere la preparación previa de las superficies a unir. Los materiales flexibles no se pueden unir con los duros, porque el adhesivo se agrieta.

6.12.2.4.- Tipo de unión.

El valor de las propiedades de una unión realizada con adhesivo, depende mucho del tipo de unión realizada y del modo en que actúen las cargas.

Las uniones que proporcionan una mejor distribución uniforme de tensiones entre los adherentes son generalmente más fuertes y más seguras que aquellas que producen concentración de tensiones. Por esta razón, las uniones son mejores cuando trabajan a *cortadura y compresión* que en tracción y pelado. Los adhesivos duros responden mejor en materiales frágiles bajo altas concentraciones de tensiones. El tipo de unión es tan importante que en muchas ocasiones para cada adhesivo se diseña un tipo de unión específica. No es directamente sustituible un tipo de unión mecánica por una unión con adhesivo sin antes modificar la forma de la unión.

6.12.2.5.- Limitaciones del proceso.

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

6.12.2.6.- Requerimientos mecánicos.

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

Los datos de cargas máximas que puede soportar el adhesivo se pueden obtener mediante el ensayo de probetas que se relacionen de alguna forma con el tipo de unión que se va a usar. Dado que es raro que el usuario disponga de estos datos durante la fabricación, éste en muchas ocasiones es obligado a reunir sus propios datos.

6.12.2.7.- Condiciones de servicio.

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

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

En ocasiones tienen efectos negativos la presencia de algunos fluidos, tales como aceites, disolventes, o fluidos hidráulicos.

La vida del diseño bajo condiciones de servicio conocidas es también un factor a tener en cuenta en la selección.

6.12.2.8.- Influencia sobre Componentes Asociados.

Por ejemplo los adhesivos usados en circuitos impresos y aplicaciones eléctricas similares no deben corroer los conductores de cobre ni otros componentes asociados.

6.13.- Preparación de la superficie.

6.13.1.- Ideas generales.

Para realizar una buena unión con adhesivos, en general se requiere realizar una preparación adecuada de las superficies de los sustratos a unir.

Existen varios procesos de pretratamiento, que van desde la simple limpieza mecánica y el desengrase químico, hasta una preparación superficial compleja.

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

Éste es un factor clave, no sólo para la resistencia inicial de una unión adhesiva sino, lo que es aún más importante, para su resistencia a las condiciones ambientales y para su resistencia a largo plazo.

Los métodos de preparación de superficies deben como mínimo, eliminar el aceite, la grasa o cualquier revestimiento cuya fuerza de unión al sustrato pueda ser menor que la de la unión adhesiva. Para muchos materiales metálicos y plásticos se utiliza simplemente la abrasión y/o el frotamiento con disolventes. Sin embargo, en algunos metales estas preparaciones simples de la superficie pueden no ser suficientes.

Un esquema general para realizar tratamientos superficiales podría ser el mostrado en la Fig. 50:

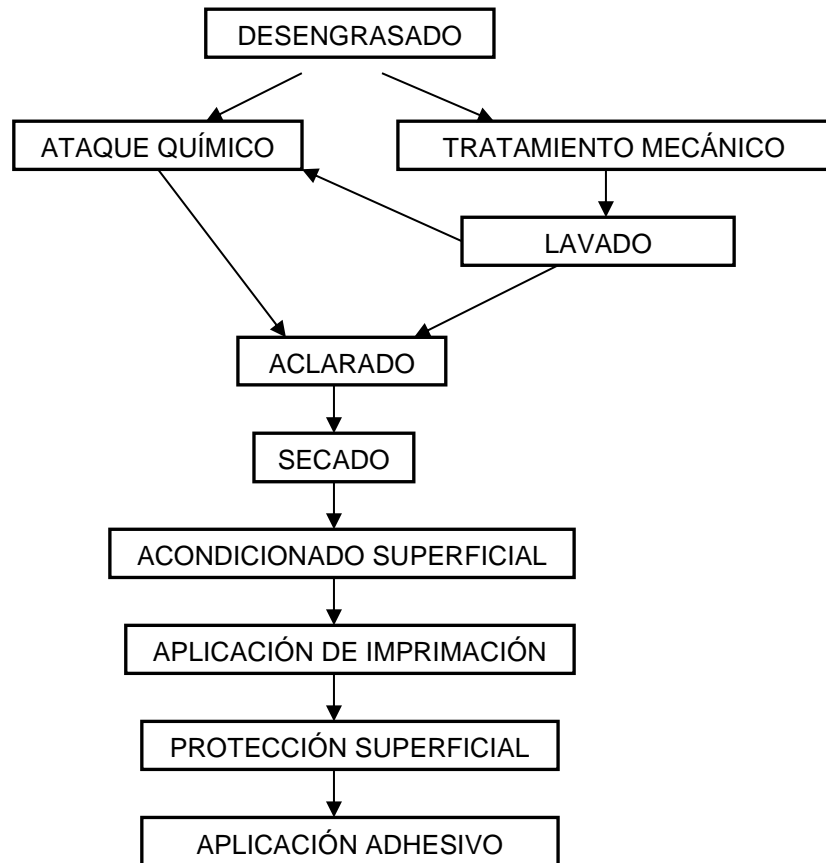


Figura 50. Esquema general para la realización de tratamientos superficiales.

6.13.2.- Preparación de Metales.

Un lavado con disolvente o desengrase con vapor es un tratamiento mínimo preparatorio. Estos tratamientos también son prerequisite para otras muchas preparaciones de superficies. El tratamiento mínimo es normalmente satisfactorio sólo para ensamblajes no críticos o para aquellos que no se van a someter a altas tensiones o a condiciones severas.

La tensión de rotura inicial de la unión no es un indicador suficiente de la durabilidad de una unión en servicio. Las uniones realizadas con metales adherentes mínimamente preparados pueden tener la misma tensión de rotura inicial que aquellos hechos de adherentes similares preparados con el más elaborado tratamiento químico. Las uniones hechas con adherentes mínimamente preparados, sin embargo, son bastante inferiores en durabilidad cuando se exponen a condiciones adversas.

Los *tratamientos químicos* superficiales para metales generalmente consisten en la inmersión de las piezas a desengrasar en una o más soluciones acuosas a temperatura ambiente o a temperatura algo elevada, lavando las piezas en agua para eliminar la solución, y posterior limpieza.

6.13.3.- Tratamientos superficiales más comunes.

Algunos de los tratamientos superficiales más comunes son los siguientes:

- Sin tratamiento (bajo costo, reproducibilidad pobre).
- Enjuagado con disolvente.
- Limpieza con vapor.
- Abrasión mecánica.
- Tratamiento con plasma.
- Granallado o chorreado.
- Conversión química del revestimiento.
- Anodizado con ácido fosfórico (alto coste, buena reproducibilidad).

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

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

El *enjuagado con disolventes* puede eliminar muchos contaminantes orgánicos, pero requiere ventilación y cambio del disolvente según sea necesario para evitar la redeposición de los contaminantes.

La *limpieza con vapor* evita el problema de la redeposición pero está limitado a piezas pequeñas.

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

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

El granallado, seguido de una deposición adecuada de una capa superficial controlada, puede proporcionar una mejora de la superficie, pero es la más cara.

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

sucias también deberán desengrasarse antes del tratamiento mecánico para evitar que las partículas de granalla o abrasivo se limiten a extender la suciedad.

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

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

La *deposición química* de una superficie nueva, tal como las capas de conversión de *romo* o los tratamientos de fosfato de *zinc*, se han usado durante muchos años cuando son importantes la larga vida y la durabilidad de las construcciones metálicas. El *anodizado del aluminio* con ácido fosfórico para ensamblajes de aviación ha llegado a ser un método estándar en esta industria.

Normalmente, una *imprimación* es una especie química reactiva dispersa en un disolvente. Esta solución se pulveriza o se aplica con brocha sobre la superficie del sustrato. Después de evaporarse el disolvente portador, la especie activa permanece.

En función del tipo de imprimación, la superficie puede quedar inmediatamente lista para la unión, como es el caso de las imprimaciones de poliolefinas para cianoacrilatos.

Las imprimaciones superficiales mejoran generalmente la capacidad de unión del sustrato, actuando como puente químico entre éste y el adhesivo.

Otro tratamiento que puede utilizarse es el *decapado*. Para decapar superficies se utilizan productos químicos relativamente agresivos. En función del sustrato, se utilizan productos muy ácidos o alcalinos. El decapado comporta un cambio de la superficie del sustrato porque se añaden grupos reactivos y pueden formarse cavidades de tipo radicular, que dan lugar al enclavamiento mecánico del adhesivo. Los efectos de este tratamiento varían en función del sustrato. Su uso industrial es limitado, porque resulta cada vez más caro realizar la manipulación y el vertido de las soluciones decapantes.

6.13.4.- *Ensayo de mojabilidad.*

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

6.14.- Aplicaciones de los adhesivos.

6.14.1.- Sujeciones mecánicas.

La mejor función de los adhesivos es para las fijaciones mecánicas. A causa de que un adhesivo puede transmitir cargas desde un miembro de la junta a otro, se permite una mejor distribución de tensiones que la obtenida usando sujeciones mecánicas. Así, los adhesivos permiten a menudo fabricar estructuras que son mecánicamente equivalentes o superiores a las de montaje convencional y, además, tienen costo y peso beneficiosos. Por ejemplo, los adhesivos pueden unir desde delgadas secciones de metal hasta grandes secciones, de forma que la fortaleza del relleno de la sección delgada se puede utilizar. Los mecanismos de sujeción convencionales o los reconocidos de soldadura, producen estructuras cuya resistencia está limitada a la de las áreas de la sección delgada que está en contacto con el mecanismo de unión o la soldadura. Además, los adhesivos pueden producir juntas con alta resistencia, rigidez, y precisión dimensional en los metales ligeros, tales como el aluminio y el magnesio, los cuales pueden ser debilitados o distorsionados con la soldadura.

6.14.2.- Sellado y aislamiento.

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

Por otro lado, la conductividad eléctrica y térmica se puede aumentar apreciablemente mediante la adición de rellenos metálicos. Óxidos de relleno, tales como la alúmina, solo incrementan la conductividad térmica. La conductividad eléctrica de los adhesivos, rellenos con láminas de plata, están disponibles con resistividades específicas superiores en 50 veces a la plata maciza.

6.14.3.- Resistencia a la Corrosión y a la Vibración.

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

6.14.4.- Resistencia a fatiga.

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

6.14.5.- Suavización de contornos.

Los adhesivos normalmente no cambian el contorno de las partes que unen. A diferencia de los tornillos, remaches, o cerramientos, los adhesivos dan una pequeña o no visible evidencia externa de su presencia. Se usan para unir las láminas de los aviones, y permiten la fabricación de alas delgadas, fuselajes, estabilizadores, y mayor control de superficies que las estructuras similares unidas convencionalmente y que consecuentemente tienen mejor eficiencia aerodinámica. Estas estructuras también tienen mayor capacidad de soportar carga y mayor resistencia a fatiga que las estructuras unidas convencionalmente. Las palas del rotor de los helicópteros ahora se retienen juntas solo con adhesivos y son mucho más duraderas que sus predecesoras unidas con mecanismos de sujeción mecánicos.

6.14.6.- Aviación y naves espaciales.

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

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

6.14.7.- Aplicaciones eléctricas y electrónicas.

El mercado eléctrico y electrónico utiliza adhesivo como materiales aislantes y conductores para una gran variedad de aplicaciones. La variedad de tipos incluyen epoxis, poliamidas de alta temperatura de fusión, acrílicos, poliamidas, poliuretanos, siliconas, y cianoacrilatos. Los epoxis, son los más usados.

Los usos más propios para adhesivos aislantes eléctricos, o no conductores, son para construcción de baterías, para cintas adhesivas mediante presión, para placas impresas flexibles (PWBs) y otras aplicaciones.

Los adhesivos conductores son generalmente muy caros a causa de que están rellenos con gran cantidad de plata, oro, oro-paladio, u otros rellenos conductores. Las aplicaciones de adhesivos conductores eléctricamente incluyen la unión de hilos conductores, circuitos híbridos, diodos emisores de luz (LED), circuitos integrados (dies), unión de componentes para PWB, y la unión de dispositivos ferroeléctricos. Los adhesivos semiconductores se usan cuando la unión requiere la disipación de cargas electrostáticas, como sucede en varias piezas de los ordenadores.

6.14.8.- Embalaje.

El tipo de adhesivos usados para el embalaje de muchos productos, incluye dextrosas, polivinilos y emulsiones de resinas acrílicas, caseína, silicatos, colas animales, y cementos disolventes.

Las aplicaciones generales de los adhesivos incluyen la laminación de papel y placas, el ensamblaje de cajas y cartón, el sellado de cajas y de cartón, el ensamblaje de cajas rígidas, el pegado de cintas y papel, los sobres, la distribución de correo y las cajas especiales, la manufactura de cigarrillos, la laminación de películas y placas delgadas.

6.14.9.- Aparatos electrodomésticos.

El comercio de aparatos electrodomésticos incluye equipos acabados tales como los frigoríficos, congeladores, cocinas, equipos de aire acondicionado, y pequeños aparatos.

Los adhesivos fundidos por temperatura, se usan para unir bobinas de congeladores dentro del aparato porque el adhesivo aumenta su tensión de rotura rápidamente con el enfriamiento. Estos eliminan el tiempo necesario para fijar los materiales y proporciona una unión temporal que retiene el rollo en su sitio hasta que la espuma aislante se haya inyectado dentro del recinto.

Otro uso de los adhesivos de fusión en caliente es en la unión del aislamiento de fibra de vidrio y la unión de materiales de amortiguamiento de sonido para el interior de los equipos de aire acondicionado y para lavavajillas.

Los poliuretanos y los epoxis se usan para unir metal con metal en ensamblajes de los electrodomésticos y también para unir plástico con plástico. La mayoría de estas piezas de plástico son poliestireno o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).

El uso más extendido de las siliconas ha sido para unir vidrios a metal en la construcción de puertas, y ventanas.

6.14.10.- Mercado del automóvil.

La industria del automóvil usa frecuentemente adhesivos de termosecado tales como epoxis, poliuretanos, anaeróbicos, cianoacrilatos, y acrílicos, así como también los

termoplásticos fundidos en caliente, poliamidas, y cementos de contacto con base agua y plastisoles. El mercado de los adhesivos de automoción está constantemente experimentando cambios y avances tanto en la tecnología como en los trabajos de montaje de automóviles para disminuir el peso de vehículos y mejorar la funcionalidad y la integridad de sus diseños.

El plastisol es probablemente el adhesivo que más se usa en la industria de automoción a causa de su bajo precio y a sus propiedades de resistencia química. Los plastisoles se usan también para las empaquetaduras de los filtros de aire y como agente sellante y afianzador en los filtros hidráulicos, de aceite y de gasoil.

En las uniones de materiales plásticos, tales como los parachoques, y los accesorios externos (faros, pilotos, etc.), se usan los poliuretanos de termosecado de dos componentes, porque sirven además de para sellar, para unir las piezas estructuralmente.

6.14.11.- Aplicaciones en la madera.

El mayor uso de los adhesivos estructurales en la madera es en la producción de aglomerado, contrachapado, fibras recubiertas de poliéster, obleas, placas de fibras, composites, y maderas laminadas. Para hacer pletinas resistentes al agua se usan formaldehído complejos de fenol, urea, y resorcinol-fenol.

La producción de muebles es un área especial en el mercado de los adhesivos estructurales de la madera.

6.14.12.- Aplicaciones en la construcción.

Se utilizan para la construcción de placas de yeso, unidas entre sí con adhesivos de base agua.

Más del 50 % de los productos vendidos en construcción están basados en agua a causa de que el sustrato que más se usa es la madera. Los adhesivos se emplean para disipar o reducir la tensión que pueden producir los cerramientos.

Una de las aplicaciones donde más se usan los adhesivos estructurales, es en la unión de paneles. El adhesivo más usado en estos paneles es un cemento disolvente, un Epoxi, o una emulsión de acetato polivinílico.

Los adhesivos más usados en la construcción de las ventanas son polisulfuros, siliconas, termoplásticos, y poliuretanos.

Las cubiertas de suelos, tales como vinílicas, cerámicas y alfombras, también se unen con adhesivos al subsuelo de concreto, a contrachapado, o a placas rígidas.

6.15.- Limitaciones de los adhesivos.

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

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

La durabilidad de una unión adhesiva está influenciada no solamente por las propiedades del adhesivo sino también por la preparación de las superficies de los materiales a unir. Si las capas superficiales son débiles y susceptibles a la humedad, la unión puede ser débil y susceptible a la humedad.

6.16.-Ventajas y desventajas de los adhesivos.

6.16.1.- Ventajas con respecto a otros medios de unión.

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

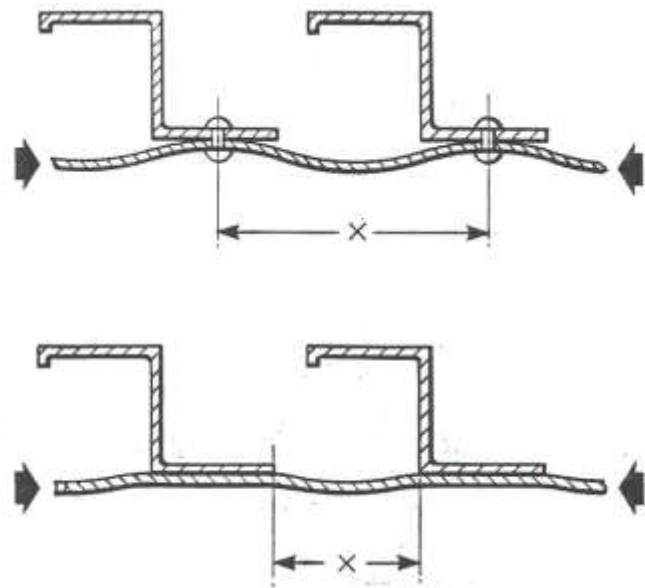


Figura 51. Ventajas de la unión con adhesivos frente a la unión con remache. La unión con adhesivo proporciona mayor rigidez a la estructura.

- Dan mayor rigidez a las estructuras (Fig. 51), de modo que trabajan mejor a pandeo.
- Unen materiales gruesos y delgados de la misma manera.
- Unen lo mismo materiales similares que distintos.
- Minimizan o previenen la corrosión electroquímica entre metales diferentes.
- Resisten la fatiga y las cargas cíclicas.
- Proporciona contornos suaves.
- Sella las uniones, aísla (térmicamente y eléctricamente), y amortigua las vibraciones.
- Frecuentemente el montaje es más rápido y menos caro que los mecanismos de unión convencionales.
- El calor que se requiere para curar el adhesivo es normalmente demasiado pequeño para afectar al estado tensional de las piezas de metal.
- La limpieza de las partes después de unir no es difícil.

6.16.2.- Desventajas con respecto a otros medios de unión.

- Requiere una preparación cuidadosa de las superficies para la adherencia.
- Algunas veces se requieren tiempos relativamente largos para curar el adhesivo.
- El límite superior de la temperatura de servicio es normalmente 175 C, aunque existen adhesivos con límite de uso hasta 370 C.
- Pueden requerirse calor y presión para realizar el ensamblaje.
- Pueden requerirse golpes y fijadores para su ensamblaje.
- Es necesario normalmente un proceso rígido de control.

6.16.3.- Poliuretano.

Ventajas.

- Unen y sellan un amplio rango de sustratos.
- Tienen buena capacidad de rellenar holguras y excelente capacidad de sellado.
- Su resistencia mecánica media permite emplearlos como adhesivos estructurales.
- Mantienen su resistencia hasta deformaciones del 400 % a 800 %.
- Mantienen sus propiedades mecánicas entre -40 C y 80 C.
- Presentan buena resistencia al agua pero se hinchan con disolventes orgánicos.
- Pueden ser pintados con pinturas al agua.
- Soportan bien los impactos.
- Resistentes a fatiga.
- Producen olores muy suaves debidos al propio prepolímero de uretano.
- Presentan fenómenos de histéresis que pueden aprovecharse en la amortiguación de ruidos, vibraciones, etc.

Inconvenientes.

- Se deterioran fácilmente por la radiación UV.

- Problemas de seguridad e higiene relacionados con los isocianatos, empleados en la elaboración de los poliuretanos.
- Curado lento de los productos monocomponentes.
- Precisan imprimaciones para realizar uniones estructurales.

6.16.4.-Silano modificado.

Ventajas.

- Óptima estabilidad frente a los rayos UV.
- Aplicación a multitud de sustratos distintos.
- Sobrepintable, tanto con pinturas acrílicas 2C estándar como en base agua.
- Generalmente, exento de disolventes.
- Inodoro.
- Libre de isocianatos y siliconas.
- Excelente comportamiento a bajas temperaturas.
- Disponible tanto como materiales 1C y 2C.
- Se puede aplicar antes de la soldadura por puntos.
- Excelente adhesión a una gran variedad de sustratos sin necesidad de primer.
- Tienen todas las ventajas propias de los poliuretanos y de las siliconas, pero sin ninguno de sus principales inconvenientes.
- Presentan viscosidades bajas antes del curado, lo cual facilita su dosificación.
- Presentan buena capacidad de relleno de holguras y capacidad de sellado.
- Permanecen flexibles entre -40 C y 100 C .
- Buena resistencia al agua.
- Buena resistencia a los productos químicos.
- Produce subproductos de bajo olor (metanol).
- Elongaciones a la rotura de entre 400 % y 800 %.

Inconvenientes.

- Curado lento de los productos monocomponentes.
- Son adhesivos pintables cuando forman piel. Después de las 24 horas precisan de los tratamientos habituales para pintar plásticos.

6.16.5.- Cianoacrilato.

Ventajas.

- Fácil uso.
- Muy alta velocidad de curado (en segundos).
- Precisan de pequeñas cantidades.
- Son versátiles.

- Forman adhesiones virtualmente incoloras.
- Unión adhesiva resistente a los solventes.

Inconvenientes.

- No tienen capacidad de relleno de holgura.
- Baja resistencia al impacto.
- Ciertas adhesiones son poco resistentes a la humedad.
- Baja resistencia a pelado.
- Baja resistencia a temperaturas elevadas (hasta 80 C).
- Problemas de volatilidad del monómero.

6.16.6.- Epoxi.

Ventajas.

- Adhieren casi todos los substratos.
- Gran relleno de holguras.
- Alta resistencia a cizalla y tracción.
- Adhesivos muy rígidos.
- Conductividades térmica y eléctrica modificables.
- Excelente resistencia química.
- Mecanizables.
- Resistencia a temperaturas de hasta 180 C (250 C en ciertas formulaciones).

Inconvenientes.

- Problemas de absorción y difusión de humedad.
- Necesidad de curado por calor en sistemas de alto rendimiento.
- Tiempos de curado largos.
- Vida limitada de las mezclas (bicomponentes).

6.17.- Procedimientos de unión con adhesivos.

6.17.1.- Métodos de aplicación.

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

Por revestimiento sumergido y pulverización se pueden usar en piezas planas, pero son especialmente apropiados para piezas contorneadas. Un método muy usado para

aplicación de líquidos y adhesivos de delgado espesor es el cepillado. El equipamiento es simple, el desperdicio es mínimo, y las áreas limitadas por las formas contorneadas se pueden revestir sin enmascarar. Sin embargo, usando este método, es difícil lograr espesores de adhesivo uniformes así como altas velocidades de producción.

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

Las películas de adhesivos son relativamente fáciles de aplicar. Se cortan al tamaño adecuado, se sitúan en la zona de la unión, y se golpean en el lugar de las áreas seleccionadas y se ablandan con un disparo de calor o soldando planchas antes del montaje.

Otro método de montaje es unión por contacto. Tales uniones se forman instantáneamente y se terminan con una aplicación breve de presión para asegurar un buen contacto entre las capas de adhesivo.

Las uniones realizadas con un adhesivo líquido de termosecado o con un adhesivo pastoso se hacen con una técnica de montaje húmedo. Normalmente las piezas se deben retener en posición para mezclar o sujetar hasta que el adhesivo líquido ha curado. La misma técnica se usa para los adhesivos termoplásticos de polimerización. Los adhesivos dispersados en disolventes se colocarán encima de la humedad sólo si es posible que se libere el disolvente. Algunas veces, para reducir el tiempo requerido para liberar el disolvente posterior, se ensambla la junta, de esta forma, se consigue que el adhesivo expulse la humedad y se seque parcialmente antes de montar.

6.17.2.- Fijaciones inmediatamente después de la unión.

El adhesivo en particular y la configuración del montaje determinan si es necesaria la fijación y su grado de complejidad. Por ejemplo dos hojas planas unidas con un adhesivo por contacto, puede que no necesite ninguna fijación. Pero un equipo de una cabina compleja o un avión, para ser construido con tolerancias dimensionales muy estrechas, con un adhesivo de curado a temperatura elevada, puede requerir muchas fijaciones relativamente complejas. Frecuentemente, un diseño cuidadoso del producto puede reducir de forma importante la complejidad de las fijaciones y simplificar el método para conseguir las tolerancias dimensionales requeridas.

Durante el curado, la mayoría de los adhesivos necesitan que se mantenga una presión mínima. Para lo cual se pueden usar sujeciones de amarre, o pesos implemente sobrepuestos, o a base de presión con gases. Para las piezas planas, es útil la actuación de una presión plana hidráulica o neumática.

6.17.3.- Curado.

Los parámetros más importantes en relación con el curado de un adhesivo son el *tiempo* y la *temperatura*.

El tipo de los aparatos de calentamiento también determina el tiempo de procesamiento. Por ejemplo, un horno de recirculación de aire forzado transmite calor para un montaje más eficientemente que un horno por circulación gravitatoria de equivalente capacidad calorífica.

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

La misma consideración se aplica cuando se realizan uniones muy grandes, comparadas con la porción del montaje con que está en contacto. La velocidad de calentamiento debe ser adecuada, ni muy lenta ni muy rápida. Si es demasiado lenta hay riesgo de que el adhesivo en estado líquido se salga de la junta, y si es demasiado rápida hay riesgo de que el adhesivo pase al estado sólido antes de haber humedecido completamente la superficie de las piezas.

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

6.18.- Ensayo de uniones adhesivas.

6.18.1.- Ensayos destructivos.

Se pueden usar tres tipos de probetas para el control de calidad mediante ensayos destructivos:

1. Probetas de ensayo estándar (tales como probetas de doble chapa).
2. Probetas representativas de las uniones del montaje.
3. Uniones terminadas.

El primer tipo y el segundo se usan mucho, principalmente por su simplicidad y bajos coste.

La tercera opción es costosa sobre todo cuando el ensamblaje es grande, complejo o caro. Sin embargo, es el método preferido cuando la economía lo permite. Se debe ensayar un número de uniones estadísticamente significativo.

6.18.2.- Ensayos no destructivos.

En la actualidad los métodos de ensayos no destructivos (NDT), aunque no son adecuados para determinar el grado de éxito de las operaciones de unión, pueden indicar problemas potenciales para el uso de las uniones. Estos, generalmente, no proporcionan indicaciones absolutas acerca de la forma de trabajo de las uniones. Los métodos más comunes NDT se describen a continuación.

6.18.3.- Ensayo de carga.

Se trata de ensayar una estructura con el mismo tipo de carga que soportará cuando trabaje en servicio, pero de magnitudes mayores.

Sin embargo las cargas empleadas durante el ensayo no deben ser tan altas que puedan causar deformaciones irreversibles o permanentes en la estructura.

6.18.4.- Golpeando, o ensayo de sonido.

Este método se basa en el principio de que el sólido o las superficies de la unión, cuando se las golpea, emiten un sonido diferente del que emiten las piezas que contienen huecos en su interior. El ensayo se puede realizar basándose en una experiencia individual, con una cuña o, de una forma más objetiva, con instrumentación apropiada.

6.18.5.- Ensayo con ultrasonidos.

El ensayo con ultrasonidos es la técnica de NDT más comúnmente utilizada. Sin embargo hay muchas variaciones de la técnica, todas requieren la acumulación progresiva de una amplia base de datos que correlacione parámetros obtenidos con el equipo de ultrasonidos con los resultados de los ensayos destructivos de uniones de materiales idénticos, geoméricamente, y en la forma de ser procesados.

6.18.6.- Inspección visual.

La inspección visual del exterior de una unión se usa para determinar si una unión contiene una adecuada cantidad de adhesivo y si el aspecto del adhesivo es adecuado, y para comprobar si el estado de curado es pobre. Se debe observar un cordón continuo de adhesivo todo alrededor de la unión.

6.18.7- Extracción de núcleos de ensayo.

Consiste en extraer una porción muy pequeña de las piezas unidas de tal forma que no afecte a la integridad de la estructura. Estas porciones suelen ser discos circulares que luego son ensayados destructivamente a tracción o cortadura. Los agujeros resultantes se rellenan con un material pastoso que luego se endurece para que estéticamente no afecte demasiado a la estructura.

Este método no es estrictamente hablando, no destructivo, a causa de que partes de la zona unida se han destruido. Sin embargo, si se aplica y se usa adecuadamente, este procedimiento no afectaría significativamente a la estructura.

6.18.8.- Resistencia química.

Normalmente se recomiendan productos de alta resistencia mecánica en los casos en que se exige una elevada resistencia química. El espesor de adhesivo en la unión es un factor muy importante en cuanto a la resistencia química de la misma, ya que cuanto menor sea este espesor, menor es la superficie de ataque y por tanto mayor la resistencia.

Se ha comprobado que la resistencia, y por tanto el efecto de sellado de los adhesivos depende de los siguientes factores:

- resistencia del adhesivo al medio químico.
- adhesión del adhesivo al sustrato.
- anchura y longitud de la holgura (es decir, la superficie expuesta a corrosión).
- temperatura y presión de funcionamiento.
- duración de la exposición al medio químico.

6.18.9.- Resistencia a temperatura.

Los adhesivos son materiales orgánicos poliméricos y, por tanto, son sensibles a la temperatura.

Para determinar los valores de resistencia a diferentes temperaturas, las probetas unidas se hacen curar en condiciones normalizadas y se almacenan durante 7 días a temperatura ambiente. Esto garantiza que la mayoría de los adhesivos han curado completamente. Las piezas se calientan a la temperatura especificada y seguidamente se ensayan.

6.18.10.- Envejecimiento a temperatura.

A diferencia del ensayo de resistencia a distintas temperaturas, en este ensayo se investiga la influencia de altas temperaturas durante un periodo de tiempo más largo. El ensayo de resistencia propiamente dicho se ejecuta a 22 C después del envejecimiento a

temperaturas elevadas. Antes del envejecimiento, los adhesivos se curan del mismo modo que para el ensayo de resistencia a temperatura.

En los gráficos, el aumento o disminución relativos de la resistencia se muestra en función del periodo de exposición a una determinada temperatura. La resistencia inicial se fija en el 100%. En algunos adhesivos, el calor conduce a un endurecimiento en la fase inicial del ensayo y, por tanto, a un valor superior al 100%.

6.18.11.- Consideraciones especiales.

Los productos adhesivos no se recomiendan para el uso en sistemas de oxígeno puro y/o ricos en oxígeno, y no conviene emplearlos como un sellador para cloro u otras materias fuertemente oxidantes.

6.19.- Normativa sobre adhesivos.

6.19.1.- Introducción.

Para poder seleccionar un adhesivo y predecir su comportamiento en una aplicación se realizan los correspondientes ensayos normalizados. Dado el elevado número de factores que afectan en el rendimiento de un adhesivo, sólo son comparables entre sí los resultados obtenidos mediante un mismo ensayo normalizado.

Hay muchos métodos estándar para evaluar la resistencia de las uniones adhesivas. Tales métodos permiten predecir el comportamiento de las juntas adhesivas frente a diferentes tipos de esfuerzos o diferentes condiciones de envejecimiento.

Existen normas para evaluar todos los tipos de adhesivos. En el siguiente resumen se incluyen las normas más empleadas para la caracterización de los adhesivos.

6.19.2.- Resumen de normas Americanas. (ASTM).

6.19.2.1.- Cargas uniaxiales sometidas a tracción.

- ASTM D 897-78: Para sustratos en forma de bloque.
- ASTM D 2094-69 Y D 2095-72: Para sustratos en forma de barra o varilla.
- BS 5350, parte C3 1979: Versión en UK de la anterior.

6.19.2.2.- Uniones de placas planas sometidas a cargas de tracción.

- ASTM D 1002-72: Obtención de la resistencia a cizalla en placa plana, mediante un ensayo de adhesión de placas planas de metal.
- ASTM D 2295-72: Ensayo de adhesión de placas planas de metal a temperaturas elevadas.
- ASTM D 2557-72: Como el anterior pero a bajas temperaturas.
- ASTM D 3528-76: Obtención de la resistencia a cizalla en placa plana doble, mediante un ensayo de adhesión de placa plana doble de metal.

- ASTM D 906-S2: Específico para adhesivos empleados en la construcción con contrachapados.
- 6.19.2.3.- Uniones de placa plana sometidas a cargas de compresión.
- ASTM D 4027-81: Especial para la medida del módulo de cizalla y la resistencia del adhesivo. Emplea unos raíles para que sólo se produzcan cargas a cizalla.
- 6.19.2.4.- Cizalla-torsión.
- ASTM D 3658-78: Específico para curado con luz ultravioleta de adhesivos vidrio-metal.
 - ASTM E 229-70: Ensayo basado en un “servilletero” para determinar el módulo de cizalla y la resistencia a cizalla de adhesivos estructurales.
- 6.19.2.5.- Desgarro.
- ASTM D 1062-78: Adhesión metal-metal.
- 6.19.2.6.- Uniones trabajando a pelado.
- ASTM D 3167-76. BS 5350: Parte C9: 1978: Ensayo de rodillo flotante.
 - BS 5350: Parte C14: 1979: Ensayo de pelado a 90° para juntas de material rígido a rígido.
 - ASTM D 903-49. BS 5350: Parte C11: 1979: Ensayo de pelado a 180°.
 - ASTM D 1876-72. BS5350: Parte C12: 1979: Ensayo de pelado en T.
- 6.19.2.7.- Resistencia al impacto.
- ASTM D 950-82: Emplea una junta a cizalla con un bloque en ensayo Charpy.
- 6.19.2.8.- Resistencia a cizalla de disco en compresión.
- ASTM D 2182-78: Determina la resistencia del adhesivo a cizalla en compresión.
- 6.19.2.9.- Resistencia a fluencia.
- ASTM D 1780-72: Junta de placa plana bajo cargas de tracción.
- 6.19.2.10.- Fatiga.
- ASTM D 3166-73: Determina la resistencia del adhesivo a cizalla en compresión.
- 6.19.2.11.- Resistencia medioambiental.
- ASTM D 896-84: Método general para evaluar la resistencia de las juntas frente a agentes químicos.
 - ASTM D 904-57: Método general para evaluar la resistencia de las juntas a la luz artificial y a la luz natural.
 - ASTM D 1151-84: Método general para evaluar la resistencia de las juntas frente a la humedad y la temperatura.

- ASTM D 1183-70: Método general para evaluar la resistencia de las juntas bajo condiciones medioambientales (humedad y temperatura) de envejecimiento cíclicas en el laboratorio.
- ASTM D 1828-70: Método general para evaluar la resistencia de las juntas frente al envejecimiento bajo condiciones medioambientales naturales.
- ASTM D 2918-71: Método general para evaluar el efecto de la tensión junto con la humedad y la temperatura. Emplea un ensayo a pelado.

6.19.2.12.- Untuosidad piezosensible.

- ASTM D 2979-71: Ensayo de la probeta invertida.

6.19.3.- Resumen de normas Europeas.

- UNE-CEN/TR 14548: Guía de los métodos de ensayo y otras normas para los requisitos generales, caracterización y seguridad de los adhesivos estructurales.
- UNE-EN 1464: Determinación de la resistencia al pelado en juntas pegadas de alta resistencia. Método del rodillo móvil.
- UNE-EN 1465: Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos.
- UNE-EN 13887: Guía para la preparación de superficies de metales y de plásticos previamente al encolado con adhesivos.
- UNE-EN 14022: Determinación de la vida útil (vida de trabajo) de adhesivos multicomponentes.
- UNE-EN 14258: Comportamiento mecánico de las juntas pegadas sometidas a condiciones especificadas de temperatura durante periodos de exposición cortos y largos.
- UNE-EN 15190: Métodos de ensayo para evaluar la durabilidad a largo plazo de las estructuras metálicas pegadas.
- UNE-EN 15274: Adhesivo de uso general para uniones estructurales. Requisitos y métodos de ensayo.
- UNE-EN 15336: Determinación del tiempo de rotura de las juntas pegadas bajo carga estática.
- UNE-EN ISO 9653: Métodos de ensayo de la resistencia a la cizalladura por impacto en juntas pegadas.

- UNE-EN ISO 9664: Métodos de ensayo para la resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales.
- UNE-EN ISO 11343: Determinación de la resistencia dinámica al agrietamiento de uniones adhesivas de alta resistencia bajo condiciones de impacto. Método de impacto en cuña.
- UNE-EN ISO 14678: Determinación de la resistencia a la fluencia (descuelgue).

7.- UNIONES HÍBRIDAS.

7.1.- Introducción.

De manera general, la unión híbrida es la combinación de dos o más técnicas de unión para producir juntas con propiedades adicionales a las obtenidas con el empleo de una sola técnica. Bajo esta definición se agrupan una multitud de técnicas, algunas ya asentadas y otras muchas emergentes o en fase de estudio y desarrollo. Los tipos más comunes son aquellos que implican unión adhesiva combinada con remachado, clinchado o bien puntos de soldadura. (Fig. 52).

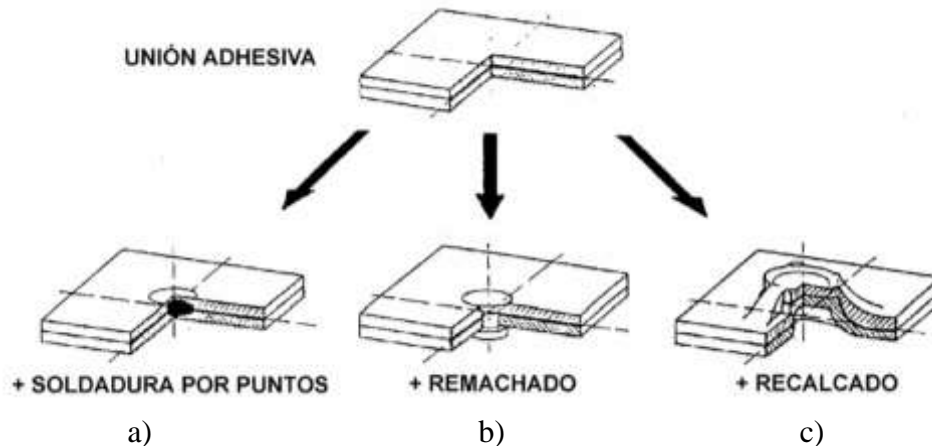


Figura 52. Tipos de uniones mixtas: a) Adhesivo más soldadura. b) Adhesivo más remachado. c) Adhesivo más recalcado.

Con este método se pretende aprovechar las ventajas que ofrecen ambas técnicas de unión, mayor rigidez de las estructuras, mayor área de transferencia de esfuerzos, sellado frente a la corrosión, etc., salvando sus inconvenientes, sensibilidad a esfuerzos de pelado, problemas de envejecimiento, limitada resistencia al calor, necesidad de un utillaje caro durante el proceso de curado del adhesivo, etc. La técnica convencional de unión que forma parte de la unión híbrida soportará los esfuerzos aplicados, sin que ocurra el fallo global de la unión si por alguna circunstancia falla el adhesivo.

Las uniones híbridas soldadura-adhesivo se desarrollaron en la Unión Soviética durante las décadas de los años 1960 y 1970 para la fabricación de aviones de transporte y helicópteros de combate y en EEUU en la década de los 70 se utilizó para la fabricación de carcasas de misiles, posteriormente varias compañías aeronáuticas norteamericanas estudiaron el proceso.

Las uniones híbridas de adhesivo-soldadura por resistencia han sido recientemente estudiadas por algunos grupos de investigación, llegando a la conclusión de que los elementos fabricados por este método resisten más carga de rotura a cortadura, aumentan la vida a fatiga y la resistencia a corrosión, si se comparan con estructuras equivalentes unidas sólo con puntos de soldadura.

Hoy día los adhesivos empleados en el ensamblaje de carrocerías normalmente forman parte de un proceso híbrido de unión. Por ejemplo, las uniones estructurales de la carrocería se obtienen mediante remachado más adhesivo, particularmente en los vehículos íntegros de aluminio como el Jaguar XJ. La técnica híbrida de con soldadura se ha empleado también en el ensamblaje y accesorios de la serie 5 de BMW, en la unión de la parte frontal de aluminio al cuerpo de acero.

Al igual que en el caso de la unión híbrida con soldadura, el beneficio derivado del empleo de adhesivos es menor en los vehículos de acero por lo que su uso es mucho más limitado.

7.2.- Ventajas e inconvenientes de la unión híbrida.

7.2.1- Ventajas.

El remachado y el recalado combinado con unión adhesiva permite disminuir el número de remaches y recalados, aunque no los elimina.

El ahorro en coste y peso son significativos si se comparan estructuras realizadas sólo con uniones mecánicas o soldadura.

Cuando se aplica correctamente, la técnica híbrida proporciona una unión estructuralmente comparable a la conseguida con la unión adhesiva y además, se elimina el complejo y caro utillaje que generalmente se necesita para realizar esta última técnica.

Seguidamente se enumeran una serie de ventajas de la unión híbrida con respecto a la unión mecánica o la soldadura:

- Mayor resistencia a cortadura por tracción (resistencia estática).
- Mayor vida a fatiga.
- Proporcionan estructuras estancas y selladas incluso a los gases, adecuadas para contenedores de gases líquidos.
- Mayor rigidez.
- Mejor resistencia a la corrosión de la unión a solape.
- Menor peso. En los vehículos de transporte esto implica un menor consumo de combustible, y por tanto menor cantidad de gases vertidos a la atmósfera, y como consecuencia es beneficioso para el medio ambiente.
- Proporciona unas superficies interiores y exteriores suaves (sin rugosidad), que mejora la aerodinámica y simplifica el montaje del equipo.
- Se mejora la transferencia de cargas entre las piezas.
- Mejoran las condiciones de carga por medio del diseño de la unión.
- Disminuyen los problemas de corrosión que tiene a veces las uniones mecánicas.
- Aumentan la resistencia a pandeo.

7.2.2.- Inconvenientes.

En la industria aeronáutica cuando se utilizan uniones híbridas con adhesivo y unión mecánica o soldadura es necesario un estricto control de los parámetros de curado del adhesivo. Sin embargo en las aplicaciones de la industria del automóvil los requerimientos y procedimientos que se utilizan son mucho menos estrictos.

La soldadura por resistencia hace fundir el metal en la zona soldada, lo que puede dar lugar a deformaciones cuando las piezas se mantienen sujetas. También en este último caso el metal solidificado en el área de la soldadura es más susceptible de fallo por fatiga.

Otros inconvenientes que se pueden presentar son que durante el proceso de curado de algunos adhesivos se producen contracciones que pueden generar tensiones residuales en la unión (es el caso de ciertos adhesivos epoxi, que cuando se aplican de forma masiva pueden sobrecalentarse debido a la propia reacción de reticulación) y, de hecho a veces se degradan cuando curan en grandes espesores.

Por otro lado, es difícil predecir la vida en servicio de una unión adhesiva, siendo ésta una de las razones por las que no se usan en exclusividad en uniones estructurales de responsabilidad. El método de estimación de la vida en servicio podría hacerse ensayando prototipos bajo condiciones que acelerasen la degradación de la unión. Aun así, no se puede tener la certeza de que estas condiciones vayan a aparecer en la aplicación real.

7.3.- Realización de las uniones híbridas.

7.3.1.- Método de aplicación.

La combinación de unión adhesiva y soldadura o unión mecánica (unión híbrida) es un método de fabricación de equipos donde una capa de adhesivo, bien en pasta o bien en película, se aplica a una de las piezas metálicas que se desean unir. La otra pieza metálica se pone encima formando una unión a solape simple, y el montaje se sujeta con abrazaderas, para mantener las dos partes alineadas. Posteriormente las dos piezas metálicas se unen por soldadura por puntos o con remache o con recalcado. Después del curado del adhesivo, bien a temperatura ambiente o bien a temperatura elevada, la unión formada queda sellada y estanca a los gases.

Se puede llevar a cabo aplicando el adhesivo a las superficies a unir antes de efectuar la unión mecánica o la soldadura, o bien cuando se emplea un adhesivo de baja viscosidad, infiltrándolo por capilaridad entre las superficies a unir, después de que se haya realizado la unión mecánica.

7.3.2.- Etapas.

Para realizar una unión híbrida se hace de la siguiente manera:

- a) Manipulación.
- b) Aplicación del adhesivo.
- c) Presentación de las piezas.
- d) Realización de la unión mecánica o soldadura.

La primera etapa, manipulación consiste en posicionar las superficies a unir en el lugar adecuado. La segunda, aplicación del adhesivo consiste en adicionar el adhesivo a las superficies que le corresponda. La tercera, presentación de las piezas, se superponen las superficies a unir. La cuarta y última etapa consiste en aplicar la unión mecánica (remache o recalcado) o soldadura de la unión. Véase un ejemplo completo de la fabricación de la carrocería de un automóvil (Fig. 53).

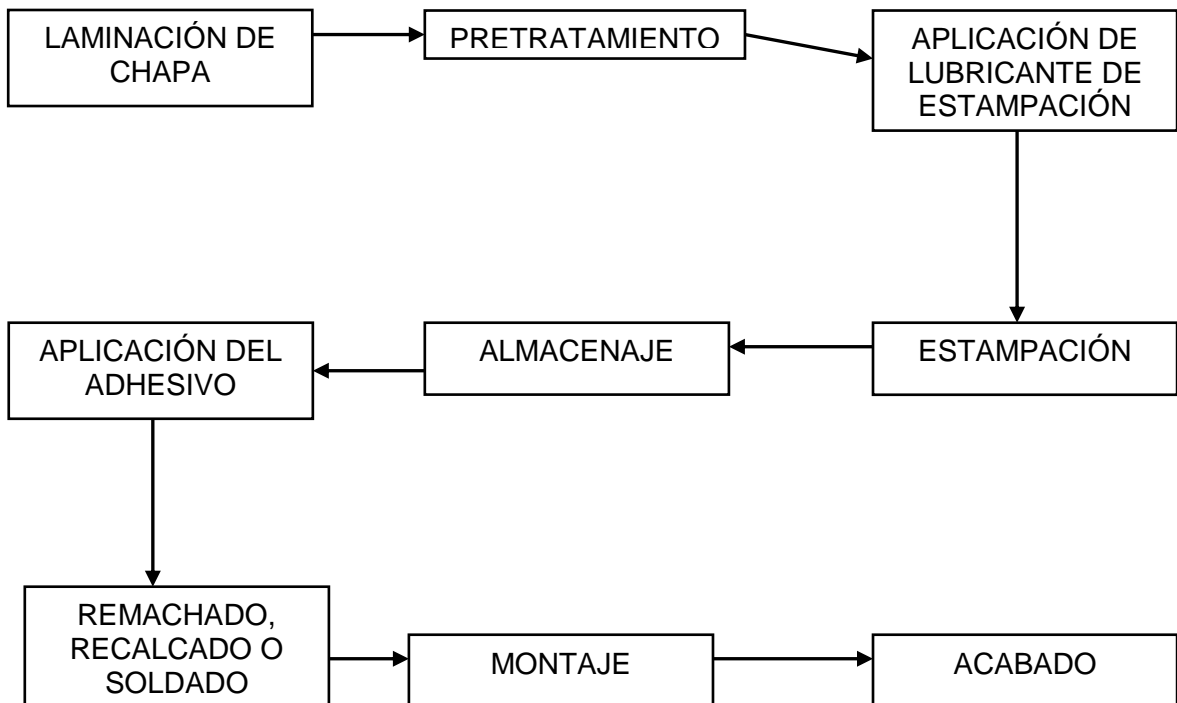


Figura 53. Proceso de fabricación de la carrocería de un automóvil.

7.3.3.- Diseño de la unión híbrida.

Para optimizar las prestaciones de una unión adhesiva, existen multitud de factores de diseño que influirán en su funcionamiento tales como: el medio ambiente, métodos de producción, métodos de aplicación, etc.

Así una unión que haya sido diseñada para ser construida con elementos mecánicos, puede no ser utilizada con éxito para unir mediante adhesivos sin modificar el diseño. Lo mismo puede ocurrir a la inversa.

7.3.4.- Preparación superficial.

Para que la unión híbrida sea eficaz es necesario realizar en la zona de unión una preparación superficial, la unión mecánica requiere muy poca o ninguna preparación, la unión por soldadura requiere una limpieza superficial y la unión adhesiva requiere una buena preparación superficial. La resistencia mecánica de la unión adhesiva depende fundamentalmente de las fuerzas de adhesión desarrolladas entre sustrato y adhesivo, lo cual requiere un contacto molecular íntimo entre ellos. Por eso en las uniones adhesivas es muy importante que las superficies a unir estén exentas de contaminantes, con el fin de facilitar una buena humectación del sustrato y proporcionar contacto directo con el adhesivo, favoreciendo la expulsión del aire que pudiera estar retenido.

En los metales la preparación superficial pretende eliminar las capas débiles superficiales que son químicamente incompatibles con el adhesivo y la formación artificial de capas estables que sean mecánica y químicamente compatibles con el mismo. Este aspecto es esencial tanto para obtener una buena resistencia de la unión como para su fiabilidad y conservación en el tiempo.

En los aceros los tratamientos superficiales usados consisten en la abrasión mecánica, estos son apropiados para muchas aplicaciones, aunque no tanto cuando la unión estructural está sometida a severas condiciones ambientales. En casos de condiciones ambientales extremas se puede utilizar además de la abrasión mecánica un ataque químico con ácido fosfórico y alcohol etílico.

7.4.- Selección del adhesivo para realizar la unión híbrida.

7.4.1- Características convenientes para adhesivo.

Los adhesivos que se empleen en las uniones híbridas deben cumplir unos requisitos que les permitan actuar de forma eficaz junto con la unión mecánica o la soldadura. Las características deseables para estos adhesivos son las siguientes:

- Buena resistencia a cortadura.
- Adecuada resistencia a pelado.
- Buena durabilidad.
- Capacidad para rellenar toda la unión sin que se produzcan contracciones durante el curado y facilidad para rellenar los huecos.
- Capacidad para soportar las condiciones de varios ciclos de calentamiento durante el proceso de montaje de la estructura, sin se produzcan daños en el adhesivo ni disminución de capacidades de carga.
- Capacidad para poder realizar la unión mecánica o la soldadura con el adhesivo fresco.

- Deben tener capacidad de fluir bajo presión de los electrodos de soldadura, para facilitar el contacto eléctrico entre las chapas a unir; pero no debería desbordar de la junta por completo antes de proceder al curado del adhesivo.
- Debe tener suficiente resistencia térmica para que el calor generado al realizar los puntos de soldadura no deteriore la resistencia de la unión.

A los adhesivos que se emplean en las uniones híbridas se les suelen adicionar productos especiales para conseguir evitar la excesiva fluidez, productos que disminuyen la corrosión, productos que aumentan la conductividad eléctrica, productos que disminuyen la viscosidad del adhesivo, etc.

7.4.2.- Adhesivos utilizados en las uniones híbridas.

Los adhesivos utilizados para la realización de las técnicas híbridas dependen de los requerimientos de cada aplicación concreta. En algunos casos, se prefieren adhesivos de base elástica frente a los epoxis debido a los problemas de seguridad y salud que conlleva la resina sin curar. Los adhesivos de aplicación en caliente que son semi-sólidos a temperatura ambiente presentan una mayor resistencia a ser eliminados fuera de la junta durante el pretratamiento anterior al pintado y curado.

Una limitación de los adhesivos es el fenómeno de envejecimiento por exposición al ambiente y que implica la reducción de la resistencia y la deformación de la pieza. La extensión de la pérdida en resistencia depende de la superficie del material en particular, del tipo de adhesivo y de las condiciones de envejecimiento. Con el envejecimiento, también se puede producir una ligera reducción en el comportamiento a fatiga.

Los adhesivos empleados se seleccionan arbitrariamente de entre los adhesivos desarrollados para otras aplicaciones y que, por tanto, dan buen resultado cuando se emplean para uniones híbridas.

7.5.- Unión híbrida de adhesivo combinada con soldadura por puntos.

7.5.1.- Generalidades.

Normalmente, se aplica una pasta adhesiva en una de las chapas y luego se cierra la junta con la otra chapa para, posteriormente, efectuar un punto de soldadura a través de las dos chapas y de la capa de adhesivo. El esfuerzo entre electrodos desplaza al adhesivo obteniendo contacto eléctrico entre las chapas y efectuando una soldadura de modo normal. Como el calor de la soldadura es muy localizado, el daño que se produce en el adhesivo es muy pequeño. Finalmente, el adhesivo se cura para completar el ensamblaje. Las pastas adhesivas de curado por calor se emplean porque son estables y tienen una viscosidad consistente a temperatura ambiente. Generalmente, estos adhesivos se curan en un horno a 180 C durante unos 30 minutos. Algunos adhesivos están disponibles en forma de cinta e incorporan partículas metálicas que permiten un contacto eléctrico inicial para poder efectuar la soldadura.

7.5.2.- Consideraciones de proceso.

Cuando se suelda por puntos chapas de un material a través de un adhesivo (o sellador), es importante que el adhesivo sea desplazado de forma consistente de la interfase bajo la influencia del esfuerzo entre electrodos. La presencia del adhesivo puede proporcionar una mayor resistencia eléctrica a la interfase cuyo efecto es la creación de más calor en la soldadura, con el consiguiente riesgo de proyecciones y variabilidad en la calidad de las soldaduras.

La pasta adhesiva debería tener la viscosidad lo suficientemente baja para permitir su desplazamiento bajo la acción de los electrodos pero no debería desbordar de la junta por completo antes de proceder al curado del adhesivo. Esto podría causar problemas en la soldadura. En algunos casos, el adhesivo en el reborde puede reaccionar a la acción de los electrodos y reducir así la eficacia del esfuerzo aplicado entre las superficies metálicas. Consecuentemente, es preferible un mayor esfuerzo para compensar este fenómeno y mejorar así el desplazamiento local del adhesivo.

El adhesivo adherido a los cabezales puede curar y generar una alta resistencia de contacto entre electrodo y pieza, que puede conducir a proyecciones y rebabas, causando daño en los cabezales y en el componente.

7.5.3.- Ventajas e inconvenientes.

Las principales ventajas que proporciona la soldadura por resistencia (unión discontinua) son la rapidez y la facilidad de automatización, un elevado nivel de control de calidad y una mayor resistencia de la unión frente a cargas de impacto. La principal desventaja de este método es su nula capacidad de sellado frente a líquidos y gases. Por su parte, la unión adhesiva (unión continua) presenta como ventajas la ausencia de concentración de tensiones, mejor comportamiento frente a fenómenos de fatiga, proporciona un buen sellado de la junta y provoca un daño mínimo o inexistente en los sustratos. Pero esta técnica de unión tiene como desventaja la susceptibilidad al daño por impacto y la necesidad de una preparación superficial de los sustratos previa a la aplicación del adhesivo.

Principalmente, lo que se consigue con el empleo de esta técnica híbrida es una mejora de la resistencia, tanto estática como dinámica, un mejor sellado y un mejor comportamiento de la unión ante fenómenos vibratorios. Además, las uniones híbridas obtenidas mediante el empleo esta técnica presentan un buen comportamiento frente a impactos.

El principal inconveniente que presenta es la lentitud del proceso debido a la necesidad de un adecuado tratamiento superficial de los sustratos y a la aplicación y curado del adhesivo. Además, existe una falta de información acerca del modo de fallo y la durabilidad de las uniones realizadas.

7.5.4.- Defectos que se producen.

La unión híbrida de adhesivo con soldadura por resistencia arrastra los defectos típicos de las dos técnicas de las que procede. Se resumen a continuación, los defectos más habituales que se pueden encontrar en un adhesivo curado:

- Porosidad: causada por gases y elementos volátiles presentes en el adhesivo.
- Huecos: los huecos pueden formarse por coalescencia de poros, aunque son causados más frecuentemente porque se queda aire atrapado durante la aplicación del adhesivo, por presencia de elementos volátiles o por la aplicación de una cantidad insuficiente de adhesivo.
- Zonas de curado incorrecto: puede darse un curado incorrecto local debido a la presencia de contaminantes o por un mal mezclado, pero es más probable que se produzca a través de la línea de unión por una incorrecta formulación, mezclado o exposición térmica.
- Fisuras o grietas: están asociadas al curado y a la contracción térmica durante la fabricación.
- Defectos en la interfase adhesivo-adherente.

Además de todo esto, la unión presencia una serie de defectos asociados al propio proceso híbrido:

- Inestabilidad Saffman-Taylor: existe el riesgo de la formación de grandes poros alrededor de la soldadura si se produce la expansión de burbujas de gas procedentes del adhesivo. El gas puede ser aire atrapado o generarse a partir de la descomposición de productos de una pequeña cantidad de adhesivo calentada por la soldadura.
- Depósitos carbonizados de adhesivo en torno a la soldadura: puede producirse la degradación térmica del adhesivo en las zonas cercanas al punto de soldadura.

7.5.5.- Propiedades mecánicas de la unión combinada con adhesivo y soldadura.

Para un adhesivo de alto módulo elástico la carga soportada por el punto es muy pequeña, mientras que para adhesivos más flexibles la carga soportada es mucho mayor. La resistencia de la junta depende del material, el espesor y el tipo de adhesivo, anchura de junta, forma de la lámina y, en menor medida, de la distancia de solape. En general, las propiedades a fatiga de estas uniones son superiores a los puntos por sí solos. La carga se concentra en la zona del punto de soldadura donde además existen elevadas tensiones residuales. Sin embargo, la carga se distribuye en el eje del borde de la unión adhesiva por lo que la concentración de tensiones es mucho menor. Las propiedades de impacto de las uniones adhesivas puede ser menores con adhesivos de mayor módulo, de limitada tenacidad, particularmente frente a cargas de pelado o clivaje. En este caso, los puntos de soldadura pueden también ser considerados como frenos para el pelado,

previniendo el fallo catastrófico de la unión y permitiendo a la estructura fallar de manera controlada.

Una importante ventaja del empleo de adhesivo es el incremento en la rigidez estructural que se puede conseguir, en comparación con un punto de soldadura por sí solo. Diversos estudios han mostrado que la rigidez de una estructura podría ser incrementada, para un material dado, o que incluso se puede reducir el espesor con un material de alta resistencia sin que haya pérdida de rigidez. El adhesivo proporciona una distribución más uniforme de la carga y previene del pandeo o deformación local en el flanco de la soldadura.

7.6.- Unión híbrida adhesivo combinada con unión mecánica.

7.6.1.- Fundamento.

La unión combinada de adhesivo y clinchado se puede fijar a través de adhesivo prefijado entre las chapas a unir. El proceso comienza fijando las chapas entre un punzón y una matriz. El punzón presiona en la chapa superior y la hunde sobre la inferior, de forma que en la parte inferior se forma un anclaje mecánico en forma de botón. La pasta adhesiva es desalojada de la junta pero algo de adhesivo siempre queda retenido en el botón entre las chapas.

Tanto el uso de remaches de cabeza prisionera como de tornillos requiere de un agujereado previo en ambas chapas lo que implica que el adhesivo no puede ser contenido completamente. Existe la alternativa de los tornillos que no necesitan perforado previo ya que su propio flujo forma un agujero.

7.6.2.- Consideraciones de proceso.

Los elevados esfuerzos asociados con los procesos de remachado o clinchado (suelen ser 10 veces mayores que los habitualmente empleados en soldadura por puntos) eliminan la posibilidad de cualquier problema vinculado al desplazamiento del adhesivo.

Como el área de la herramienta utilizada para estos procesos suele ser mayor que la del electrodo de soldadura por puntos, el área de la que se elimina el adhesivo es mayor. Los parámetros de proceso se deben fijar de tal manera que se evite agrietamiento de la lámina inferior y la consecuente contaminación de la matriz.

7.6.3.- Ventajas e inconvenientes.

En líneas generales, las principales ventajas e inconvenientes de estos procesos respecto de los correspondientes procesos sin la presencia del adhesivo son las mismas que las resaltadas para el caso del método de unión híbrida que combina adhesivo y soldadura.

7.6.4.- Defectos de la unión híbrida que combina adhesivo y unión mecánica.

Al igual que en el caso de las uniones híbridas con soldadura, las uniones mecánicas combinadas con adhesivo heredan la defectología propia de cada técnica individual. Los defectos propios del adhesivo curado están expuestos en el anterior apartado mientras que los correspondientes a las uniones mecánicas se enumeran ahora brevemente:

- Cabeza del remache demasiado sobresaliente o demasiado profunda (sólo en el remachado autoperforante).
- Parte inferior del remache fisurada (sólo en el remachado autoperforante).
- Chapa inferior perforada.
- Daño severo en el recubrimiento de la chapa.
- Espaciamiento entre chapas.
- Botón asimétrico.

En cuanto a los defectos asociados al propio proceso híbrido, habría que considerar una excesiva eliminación de adhesivo de las zonas próximas al anclaje mecánico debido al esfuerzo ejercido durante el proceso.

7.6.5.- Propiedades mecánicas de la unión mecánica con adhesivo.

La resistencia de la unión adhesiva con remache o con cualquier otro de los anclajes mecánicos está generalmente dominada por la primera. La distribución de tensiones en este tipo de uniones es similar a la que presentan las realizadas mediante la unión híbrida con soldadura. Lo mismo se puede decir de las propiedades a fatiga y de impacto. Los resultados dependen del material a unir, del diseño de la junta y del adhesivo empleado.

7.7.- Control de calidad de las uniones híbridas.

7.7.1.- Requerimientos de calidad.

Actualmente, no existen normas nacionales o internacionales que definan los requerimientos de calidad para este tipo de uniones híbridas, pero hay normas y procedimientos internos de empresas (Tab. 4), que dependen en gran manera de la aplicación.

Los más habituales son:

- Tamaño del punto y modo de fractura.
- Apariencia visual.
- Resistencia estática.

En la práctica, para la realización de los ensayos de resistencia, tanto estática como dinámica, se suelen tener en cuenta las normas referentes a adhesivos y a soldadura por resistencia por puntos.

Tabla 4. Normativa sobre ensayos de adhesivos y soldadura por resistencia aplicada a uniones híbridas.

| | Soldadura por resistencia por puntos | Adhesivos |
|---|---|--|
| Ensayo de cizalla por tracción (“Tensile shear”) | <u>UNE-EN ISO 14273:2002</u> “Medidas de las probetas y procedimiento del ensayo de cizallamiento para soldaduras por resistencia por puntos, por costura y por protuberancias” | <u>UNE-EN 1465:1996</u> “Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos” |
| Ensayo de fatiga | <u>UNE-EN ISO 14324:2004</u> “Soldeo por resistencia por puntos / Ensayos destructivos de soldaduras. Método para el ensayo de fatiga sobre construcciones soldadas por puntos” | <u>UNE-EN ISO 9664:1996</u> “Adhesivos. Métodos de ensayo para la resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales”. |

7.7.2.- Monitorización y control de la calidad.

Hay que tener en cuenta los aspectos correspondientes de cada una de las técnicas constituyentes de la unión híbrida:

- Monitorización y control de materiales y operaciones de pretratamiento.
- Monitorización y control de los proceso de aplicación del adhesivo, soldadura/remachado/clinchado y curado.
- Monitorización de la calidad de la soldadura/remachado/clinchado y del curado en línea.
- Ensayos destructivos y no destructivos post-proceso.

7.7.3.- Ensayos destructivos.

Los ensayos destructivos post-proceso son las técnicas más comúnmente utilizadas para asegurar la calidad de la unión. Los más empleados son el desabotonado mediante cincel o mediante pelado, para la posterior medida del diámetro del punto, comprobación del aspecto visual y del tipo de fractura. Otros ensayos destructivos son el ensayo de cizalla por tracción, el de tensión transversal, a fatiga, a torsión, a impacto, de durabilidad del adhesivo y análisis metalográficos.

7.7.4.- Ensayos no destructivos.

Para caracterizar la defectología de los adhesivos en la unión híbrida se pueden utilizar distintos métodos como ultrasonidos, radiografía o termografía de baja frecuencia. En el caso de la soldadura por puntos y de los anclajes mecánicos en la unión híbrida pueden emplearse el método de ultrasonidos o el radiográfico.

CAPITULO 3

MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL

3.- MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL.

1.- UNIONES ESTRUCTURALES CON CHAPA FINA.

1.1.- Importancia tecnológica.

Las chapas de acero con distintos acabados se utilizan mucho en la fabricación de electrodomésticos, en la fabricación de automóviles, en aviación, en fabricación de barcos, en superficies de trabajo, en cerramientos de edificios, en paneles de cubiertas en general, para cubrir pequeños equipos como ventiladores, motores, etc., para bandas protectoras, en paneles de arquetas y otros. Dependiendo de la aplicación, la superficie será distinta, lo cual da lugar a muchos tipos de superficies.

Las principales técnicas de ensamblaje que se emplean en estas aplicaciones son los sistemas de unión tradicionales y a menudo en combinación con sellantes. Tales técnicas de unión se realizan de forma automatizada y en muchos sectores del mercado no están adaptadas para las uniones de chapas de acero en líneas de montaje en alta producción. En consecuencia, para ampliar la utilización y el mercado de las chapas de acero prepintadas y para mantener su competitividad con materiales alternativos, es necesario desarrollar técnicas de unión rápida apropiadas para todos los productos que se realizan con chapas prepintadas. Además, es necesario resolver el problema de aumentar la productividad al realizar las uniones de alta resistencia ya que su aplicación se está generalizando en muchos campos tales como en la fabricación de aparatos electrodomésticos, automóviles, y en aplicaciones de ingeniería en general.

La soldadura por resistencia es la mejor técnica de unión que se usa para ensamblajes a gran velocidad en la fabricación con chapas de acero. Uniones de gran resistencia se pueden fabricar con este método. Sin embargo tales procesos no se pueden realizar con chapas prepintadas porque la capa de pintura no deja pasar la corriente eléctrica. En consecuencia se necesitan desarrollar nuevos métodos de unión rápidos. Entre los posibles que se pueden estudiar estarían las uniones con adhesivos, métodos mecánicos, soldadura y uniones híbridas. En esta investigación se van a desarrollar algunos de los métodos mecánicos más modernos como es el autorremache (clinchado), los métodos de unión con adhesivos, y las uniones combinadas con autorremache y algunos de los adhesivos.

La unión con adhesivos es una de las alternativas a la soldadura más atractivas pero tiene la limitación de que se requiere un tiempo, que puede variar desde minutos a horas después de unirse para que la unión pueda ser manejable. En consecuencia, sería necesario desarrollar técnicas de curado rápido para eliminar o disminuir en lo posible esta limitación. Además, la mayoría de las recientes innovaciones en el desarrollo de adhesivos de curado rápido necesitan ser evaluados con vistas a que desarrollen grandes fuerzas de unión de forma rápida.

1.2.- Condiciones superficiales.

1.2.1.- Superficie Blanca.

Se entiende por superficie blanca la que presenta el material base cuando sale del proceso de laminación en frío, sin ningún tratamiento posterior. Estas superficies están impregnadas en aceite, lo cual se realiza durante el proceso de laminación para evitar su rápida oxidación. Antes de unirlas se han limpiado, primero se le pasa un paño seco y después se lavan con acetona.

Características del acero de las chapas

Denominación: Chapa Laminada en frío, mate, aceitada, de espesor 1.5 mm.

Norma: STANDARD EN-10130.

Composición química: 0.04 % C; 0.24 % Mn; 0.007 % Si; 0.010 % P; 0.011 % S; 0.032 % Al.

1.2.2.- Superficie lijada.

Para crear esta superficie se ha partido del mismo material base, de la superficie anterior, procediendo en primer lugar a una limpieza con un paño seco para quitar el aceite superficial y la suciedad que pudiera tener, y posteriormente se ha lijado en sentido transversal con lija de 120 con máquina. Por tanto la composición química del material es la misma que la de la superficie blanca.

1.2.3.- Superficie galvanizada.

1.2.3.1.-Definición.

Por acero galvanizado se entiende un producto formado por un sustrato de acero con un recubrimiento de zinc (Fig. 54), aplicado este último por deposición.

Estos productos se fabrican en líneas de producción de proceso continuo.

Existen diversas tecnologías de recubrimiento:

- El proceso de recubrimiento por inmersión en caliente, que consiste en sumergir la banda de acero en un baño de cinc fundido.

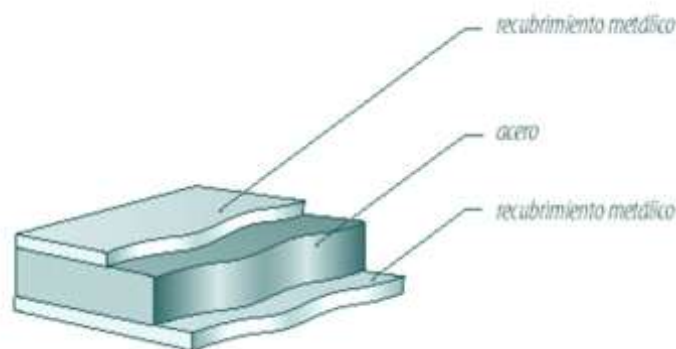


Figura 54. Composición de una superficie galvanizada.

- El proceso de electrocincado, que consiste en recubrir en frío la banda de acero con zinc por electrodeposición.

- Los procesos de recubrimiento por deposición al vacío, de tipo PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition), etc.

1.2.3.2.- Aplicaciones.

La amplia gama de productos de acero con recubrimiento de cinc forma parte íntegra de nuestra vida cotidiana: se utilizan en aplicaciones de protección, cubiertas, almacenamiento y transporte. Además, responden a sus necesidades en materia de solidez, durabilidad y estética. El acero con recubrimiento metálico registra un crecimiento considerable y constante. Se utiliza en aplicaciones cada vez más diversas, gracias a las excepcionales ventajas económicas, tecnológicas y medioambientales que ofrece.

En el sector de la construcción y obras públicas, los productos de acero con recubrimiento metálico se utilizan desde hace años en perfiles, recubrimientos de fachadas y cubiertas, pero su aplicación se extiende asimismo a puertas, escaleras, techos, etc.

En la industria general, estos productos encuentran numerosas aplicaciones, por ejemplo, en mobiliario, sistemas de aire acondicionado, depósitos, pantallas térmicas, etc.

El sector de los electrodomésticos también es un importante consumidor de aceros con recubrimiento metálico. La tendencia actual consiste en diseñar aparatos electrodomésticos fabricados enteramente con acero galvanizado, tanto para los productos de línea blanca (frigoríficos, lavadoras, hornos, etc.) como para los productos de línea marrón (aparatos electrónicos, vídeo, hifi, etc.).

1.2.3.3.- Ventajas medioambientales.

El acero con recubrimiento metálico es, sin duda, una solución óptima para dar respuesta a las normativas actuales y futuras en materia de medio ambiente.

La utilización de los productos de acero con recubrimiento de cinc en sus diferentes sectores de aplicación – construcción y obras públicas, electrodomésticos e industria general – no conlleva ningún riesgo para el consumidor ni para el medio ambiente.

En cuanto al reciclaje, al final de su ciclo de vida, el acero con recubrimiento de cinc se recicla al igual que cualquier otro producto de acero.

1.2.3.4.- Características del acero electrocincado.

El acero electrocincado es un producto plano recubierto con una capa de zinc puro depositada sobre una o ambas caras. El electrocincado permite obtener una elevada pureza química así como un excelente control del espesor del recubrimiento en todas las direcciones.

Gracias al comportamiento de sacrificio del zinc, la protección contra la corrosión persiste, incluso si se daña el recubrimiento. Se trata de la protección catódica. Además, la homogeneidad de este recubrimiento tiene un efecto positivo sobre la resistencia a la corrosión.

Por su calidad superficial, resulta un producto ideal para la fabricación de partes vistas. Por consiguiente, los productos electrocincados son también muy valorados por su excelente aspecto superficial tras la aplicación posterior de pintura.



Figura 55. Recubrimiento de cinc de elevada pureza.

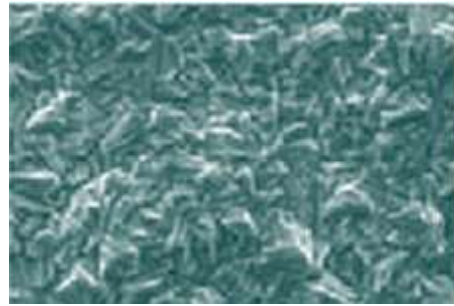


Figura 56. Composición del recubrimiento. Formado por yuxtaposición de cristales de pequeño tamaño.

El acero electrocincado se obtiene a través de un proceso de electrodeposición, también denominado electrogalvanizado. Este proceso permite aplicar un recubrimiento de elevada pureza con un espesor extremadamente regular (Fig. 55), compuesto por una yuxtaposición de cristales de pequeño tamaño (Fig. 56), con un gran poder de cubrición, no arborescentes. Esto confiere al acero electrocincado una adecuada soldabilidad.

Generalmente, sólo se comercializan recubrimientos de bajo espesor, lo que limita la resistencia a la corrosión de este producto si no se aplica un recubrimiento posterior (por lo tanto, este producto no es recomendable para aplicaciones en exteriores).

Este producto se utiliza generalmente para aplicaciones en interiores (techos, tabiques, etc.), aparatos electrodomésticos y electrónicos (carcasas de aparatos electrónicos), mobiliario metálico, etc. En este tipo de aplicaciones, un recubrimiento de unas micras ofrece una buena protección contra la corrosión.

1.2.3.5.- Características del acero galvanizado por inmersión en caliente.

El acero galvanizado por inmersión en caliente está constituido por un sustrato de acero y un recubrimiento metálico de zinc aplicado de forma continua a través de un proceso de galvanizado por inmersión en un baño de zinc fundido.

Los productos galvanizados por inmersión en caliente ofrecen una buena resistencia a la corrosión gracias a la protección catódica del zinc, así como buenas propiedades de conformación.

El recubrimiento presenta un aspecto brillante. El recubrimiento galvanizado está compuesto por tres capas (Fig. 57):

- una capa intermetálica (Fe_2Al_5) de muy bajo espesor, situada en la interfase acero/recubrimiento (su espesor, de aproximadamente 100 nm, es demasiado reducido para que resulte visible con microscopio óptico).
- La capa de zinc propiamente dicha.
- Una capa superior enriquecida en aluminio en su forma oxidada, Al_2O_3 (de espesor extremadamente bajo, 50 nm).



Figura 57. Corte micrográfico de un recubrimiento galvanizado, en el que se puede apreciar su estructura.

El acero galvanizado por inmersión en caliente se caracteriza por una amplia gama de espesores de recubrimiento y de dimensiones de sustrato. Esto permite dar respuesta a las necesidades de numerosos ámbitos de aplicación, tanto en interiores como en exteriores: perfiles estructurales para la construcción, paneles y estructuras de aparatos electrodomésticos, mobiliario metálico, etc.

1.2.3.6.- Mecanismos de protección contra la corrosión de los recubrimientos de cinc.

La ventaja principal que ofrecen los productos de acero con recubrimiento de cinc es la protección contra la corrosión que el recubrimiento de cinc aporta al sustrato de acero.

A modo de recordatorio, la corrosión es un fenómeno electroquímico durante el cual se crea una pila constituida por un ánodo que se consume transmitiendo su materia a un cátodo. En la práctica, se forman pilas en cuanto aparece en la superficie del acero una heterogeneidad que crea zonas anódicas y zonas catódicas, actuando el agua como electrolito. En estas pilas, cada vez que el acero se encuentre en posición anódica, se producirá su corrosión.

Por el contrario, en la posición catódica se mantendrá intacto. El zinc con potencial electroquímico más negativo que el hierro, se oxidará de forma preferente, protegiendo la superficie de acero.

La pasivación de la superficie del recubrimiento también influye en su poder de sacrificio. De este modo, el recubrimiento podrá considerarse como inerte con respecto al sustrato de metal y perderá su capacidad de sacrificio.

En la práctica, el zinc protege al acero frente al entorno corrosivo gracias a los dos efectos siguientes (Fig. 58):

- Efecto barrera: la presencia del recubrimiento aísla el acero del entorno corrosivo; además, los productos de corrosión del recubrimiento que se forman crean una capa de protección que frena la propagación de la corrosión y actúan como protección de las zonas no recubiertas. Esta capa adherente, dura y no porosa constituye una protección física e impide la propagación de la corrosión en el recubrimiento. Dependiendo de la acidez del medio circundante, esta pasivación será más o menos activa.

- Protección catódica: en las zonas no recubiertas (arañazos, bordes de corte, agujeros, etc.) el acero expuesto se protege gracias a la disolución del recubrimiento en las zonas circundantes, dado que el material de recubrimiento tiene una mayor propensión a la corrosión que el acero. Este efecto se denomina protección de sacrificio.

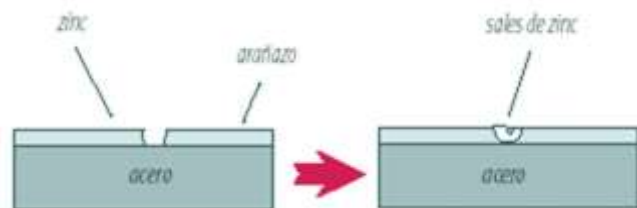


Figura 58. Protección activa.

Esta capacidad del recubrimiento para proteger el sustrato se limita a una distancia muy reducida (unas micras) pero se extiende a superficies mayores gracias a los productos de corrosión que se forman en la zona expuesta o en el borde de corte.

1.2.3.7.- Descripción detallada de los fenómenos físicos que suceden durante la vida del acero galvanizado.

En el caso de los recubrimientos galvanizados, se forma primeramente hidróxido de zinc. Dado que es un producto de baja conductividad, el hidróxido de zinc frena la propagación de la corrosión.

No obstante, el hidróxido de zinc se deshidrata formando óxido de zinc. Este último, semiconductor, constituye una barrera menos efectiva, permitiendo que se reinicie la propagación de la corrosión.

Aparte de los óxidos e hidróxidos de zinc, los productos más abundantes de la corrosión del zinc expuesto a la atmósfera (en entorno urbano) son los carbonatos de zinc.

También se forman, en función del medio, hidrocloruros de zinc (en entorno marino) e hidroxisulfatos de zinc (en entorno industrial).

La porosidad de estos óxidos complejos, que influye en gran medida en la propagación de la corrosión, depende de su composición.

Su estabilidad dependerá del pH del medio al que estén expuestos; se observa que el rango de estabilidad más amplio y el mejor efecto barrera corresponde a los carbonatos de zinc, mientras que los cloruros y los sulfatos se disuelven en medios ácidos.

Nótese, sin embargo, que el espesor de los recubrimientos electrolíticos es inferior al de los recubrimientos galvanizados, lo que limita el efecto barrera así como la protección catódica y, por consiguiente, la resistencia a la corrosión.

1.2.3.8.- Características de las chapas utilizadas en los ensayos.

Denominación: Chapa Galvanizada sin plomo de espesor 1.5 mm, con recubrimiento Z-275, sin aceitar.

Norma: STANDARD EN-10327.

Composición química del material base: 0.05 % C; 0.24 % Mn; 0.006 % Si; 0.020 % P; 0.018 % S; 0.037 % Al.

1.2.4.- *Superficie prepintada.*

1.2.4.1 Introducción.

Los productos de acero prepintado están presentes en todos los sectores industriales. En la construcción, en forma de chapas perfiladas de recubrimiento de fachadas y cubiertas, en falsos techos, en luminarias, etc. En la industria general, se utilizan en múltiples aplicaciones entre las que destacan el mobiliario metálico, los aparatos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, etc. En la industria de los electrodomésticos, las ventajas que ofrecen los productos prepintados son muy conocidas. Se utilizan con éxito, tanto en aparatos de "línea blanca" (frigoríficos, lavadoras, etc.) como en pequeños electrodomésticos (microondas, etc.). También se utilizan para los productos de "línea marrón" (ordenadores, cajas de vídeos y DVDs, etc.).

Los productos de acero prepintados representan hoy en día una gran ventaja económica y tecnológica, lo que explica sin duda alguna, su extraordinario desarrollo en la industria.

1.2.4.2.- Ventajas económicas de la superficie prepintada.

Las líneas de recubrimiento orgánico disponen intrínsecamente de elevados niveles de productividad y rendimiento, lo que permite reducir los costes de aplicación de las pinturas. La velocidad lineal de aplicación se sitúa frecuentemente en torno a 100 m/min. Al sustituir la aplicación posterior de pintura por el prepintado, el usuario puede permitirse eliminar los equipos de desengrasado y tratamiento superficial, las operaciones y los equipos correspondientes de aplicación posterior de pintura así como la gestión de los efluentes generados en estos procesos. La simplificación de los procesos de fabricación que se obtiene con el uso del acero prepintado permite reducir radicalmente los siguientes factores:

- costes de fabricación
- consumo energético
- tiempo de procesado
- costes financieros asociados a la gestión de inventarios (materias primas, productos químicos y stocks intermedios).

Los productos prepintados también permiten reducir significativamente las cargas fiscales y las primas de seguros. Se eliminan todos los impuestos ligados al tratamiento de vertidos y se puede acceder a determinadas ayudas públicas y subvenciones de la Unión Europea.

1.2.4.3.-Ventajas tecnológicas de las chapas prepintadas.

La principal ventaja que ofrece el acero prepintado es su calidad constante y reproducible de un lote a otro, tanto en términos de espesor como de tolerancias de color y aspecto superficial.

La flexibilidad del proceso de prepintado permite obtener una gama de diferentes acabados superficiales: liso, piel de naranja, granulado, texturado o con relieve. Todos estos acabados se pueden fabricar en una amplia gama de colores (saturado, metalizado, nacarado, etc.) y de brillos (desde mate hasta muy alto brillo).

La dureza de los revestimientos es muy elevada.

Tienen alta resistencia al desgaste por rozamiento.

También presentan alta resistencia a la corrosión.

Asimismo tienen ausencia de deformaciones durante el procesado.

Los productos tratados poseen un elevado valor agregado.

1.2.4.4.- Características y composición química de las probetas usadas.

Denominación: Chapa lisa prepintada de espesor 0.8 mm.

Acero base: FePO2G, Z-225, S/EN 10327

Composición química del acero base: 0.03 % C; 0.19 % Mn; 0.004 % Si; 0.008 % P; 0.009 % S; 0.057 % Al.

Recubrimiento: Tipo orgánico S/EN 10169

Cara superior: rojo 7001 poliéster exteriores, brillo 30, de 25 micras de espesor.

Cara inferior: gris 5003 protección poliéster Epoxi, brillo 30, de 7 micras de espesor.

1.2.5.- Otras superficies.

Existen muchas otras superficies que se emplean en la industria, con otros materiales base como por ejemplo el aluminio, y también con diferentes tipos de recubrimientos con diferentes metales, y con diferentes tipos de pinturas. Sin embargo en el aluminio y en otros metales base y en muchas pinturas y en algunos recubrimientos con metales, los adhesivos no presentan buena capacidad de adherencia.

Existen también chapas aluminizadas, que consisten en una chapa de acero con recubrimiento metálico de aluminio, la cual presenta una excelente resistencia a la corrosión, mayor a la del recubrimiento de zinc, pero tiene algunos inconvenientes, tales como que no brinda ninguna protección catódica, y por consiguiente los bordes expuestos, rayas y hendiduras se corroen rápidamente, por eso esta chapa no se recomienda ciertas aplicaciones tales como los techos.

Aprovechando las bondades de estos dos materiales -aluminio y zinc- existe una aleación con 55 % de aluminio, 43.5 % de zinc y 1.5 % de silicio, denominada Aluzinc. Esta ha demostrado una notoria mejoría en la vida útil, lo cual se consigue por una mayor resistencia a la corrosión que con el galvanizado, conservando una excelente protección catódica.

Aquí no se van a estudiar estas superficies porque sería demasiado amplio el campo de investigación, lo que dificultaría llegar a conclusiones concretas.

2.- UNIONES Y MATERIALES UTILIZADOS.

2.1.- Uniones realizadas.

Para estudiar la influencia del espesor de adhesivo se han realizado 23 uniones distintas (cada unión requiere 6 muestras distintas, lo que supone 138 probetas distintas) con diferentes espesores de adhesivo de tipo poliuretano.

Para el estudio de la resistencia mecánica de las uniones, las deformaciones, la capacidad de adherencia, tipo de rotura dúctil o frágil, rigidez de la unión, etc., se han preparado 14 tipos de unión distintas, 4 ADHESIVOS (CN, EPO, MS, PUR), 2 UNIONES MECÁNICAS (REMACHE, CLINCHADO), 8 UNIONES MIXTAS (CN+REM, EPO+REM, MS+REM, PUR+REM, CN+CL, EPO+CL, MS+CL, PUR+CL), y todas ellas se han realizado en 4 tipos de superficies (BLANCA, LIJADA, GALVANIZADA, PINTADA), lo que ha supuesto un total de 56 ensayos distintos (cada ensayo requiere de 6 muestras distintas, lo que suponen un total de 336 probetas), que corresponden a 14 tipos de unión diferentes realizados cada uno en 4 tipos de superficies. Además las uniones mixtas realizadas con remache se han realizado con el adhesivo fresco y con el adhesivo curado en los 4 tipos de superficies, lo que ha supuesto la realización de 16 ensayos adicionales (cada ensayo requiere 6 muestras distintas, lo que supone 96 probetas mas).

Por tanto las probetas realizadas han sido 138 (espesor de adhesivo) mas 336 (resistencia mecánica, deformación,), mas 96 (adhesivo fresco) que hacen un total de 570, esto sin contar muchos tipos de ensayos realizados que al final no se han reflejado en este estudio porque los resultados obtenidos aportan conclusiones que se apartan de los objetivos de esta Tesis, pero que podrían servir para estudios futuros.

2.1.- Materiales Base.

2.1.1.- Chapa blanca.

El material base de la chapa laminada blanca es un acero St 37, laminado en frío. Sus características se reflejan a continuación:

Denominación: Chapa Laminada en frío, mate, aceitada, de espesor 1.5 mm.

Norma: STANDARD EN-10130.

Composición química: 0.04 % C; 0.24 % Mn; 0.007 % Si; 0.010 % P;
0.011 % S; 0.032 % Al.

2.1.2.- Chapa lijada.

Denominación: Chapa Laminada en frío, mate, aceitada, de espesor 1.5 mm.

Norma: STANDARD EN-10130.

Composición química: 0.04 % C; 0.24 % Mn; 0.007 % Si; 0.010 % P;
0.011 % S; 0.032 % Al.

2.1.3.- Chapa galvanizada.

Denominación: Chapa Galvanizada sin plomo de espesor 1.5 mm, con recubrimiento Z-275, sin aceitar.

Norma: STANDARD EN-10327.

Composición química del material base: 0.05 % C; 0.24 % Mn; 0.006 % Si;
0.020 % P; 0.018 % S; 0.037 % Al.

2.1.4.- Chapa prepintada.

Denominación: Chapa lisa prepintada de espesor 0.8 mm.

Acero base: FePO2G, Z-225, S/EN 10327.

Composición química del acero base: 0.03 % C; 0.19 % Mn; 0.004 % Si; 0.008 % P; 0.009 % S; 0.057 % Al.

Recubrimiento: Tipo orgánico S/EN 10169

Cara superior: rojo 7001 poliéster exteriores, brillo 30, de 25 micras de espesor.

Cara inferior: gris 5003 protección poliéster Epoxi, brillo 30, de 7 micras de espesor.

2.2.- Resistencia mecánica de los materiales base.

2.2.1.- Resistencia real (TR). (Fig. 59).

Esta es la resistencia real que presentan las chapas ensayadas en nuestro laboratorio con las mismas dimensiones de probeta que las utilizadas para las uniones, o sea las probetas son de 100 x 25 mm. Es el resultado de dividir la fuerza de rotura entre el área transversal de la misma.

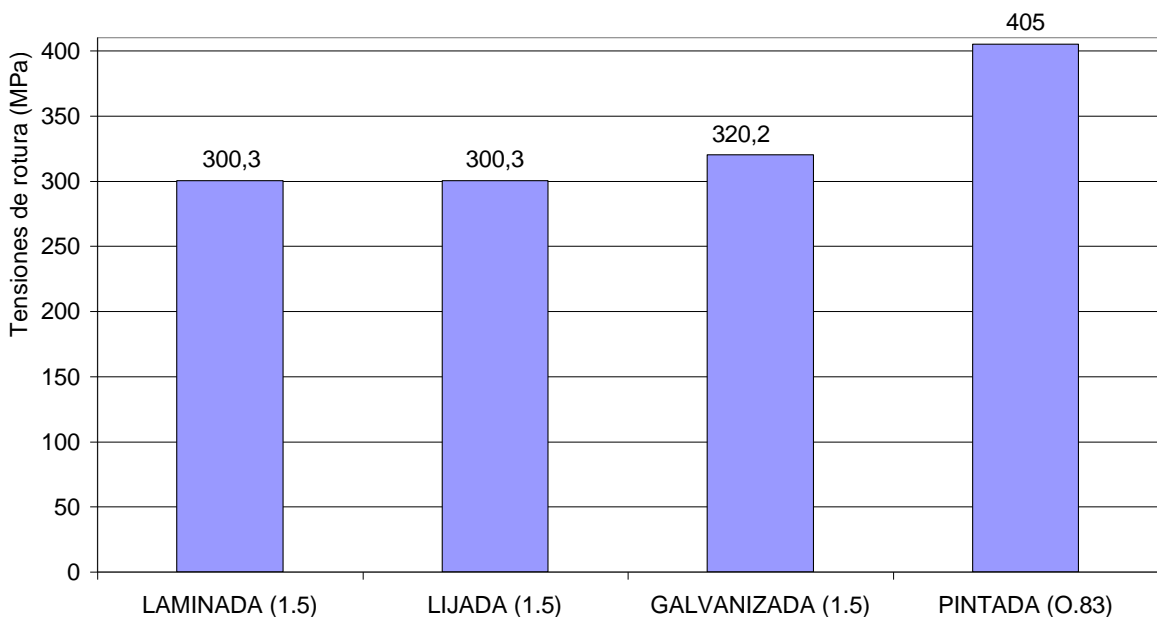


Figura 59. Tensión de rotura (TR) de los diferentes substratos utilizados.

2.2.2.- Resistencia equivalente a la del adhesivo (TR_E). (Fig. 60).

La resistencia equivalente a la del adhesivo (TR_E) es la tensión máxima cortante que admite la chapa.

Esta resistencia representa la fuerza máxima que admite el material dividida entre el área de adhesivo en el sentido longitudinal de la fuerza. Estos valores se han obtenido de los anteriores, teniendo en cuenta el espesor de la chapa y el área de adhesivo que se va a dosificar que es 25 x 12.5 mm.

Esta resistencia es un valor a tener en cuenta, porque si la resistencia a cortante del adhesivo es superior a ella entonces falla la chapa antes que el adhesivo, y esta es una situación no deseable porque no se podrían cuantificar las propiedades del adhesivo. Además en la industria siempre se diseña de manera que el fallo ocurra por la unión adhesiva y no por el sustrato.

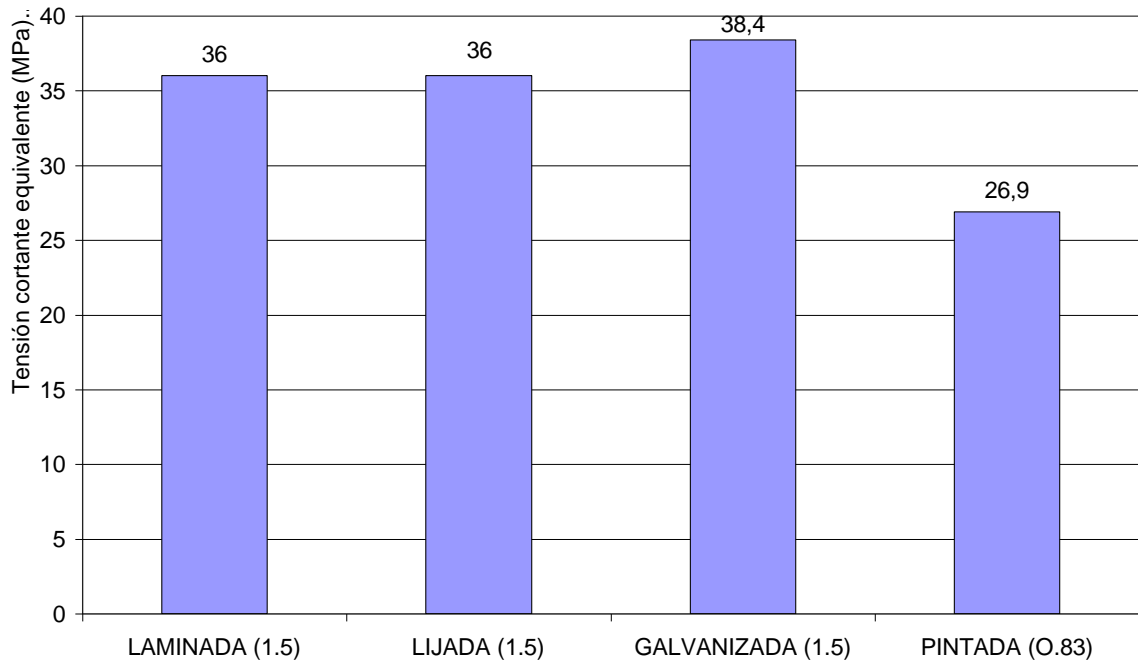


Figura 60. Tensión cortante equivalente (TR_E) de los diferentes sustratos utilizados.

2.2.3.- Dificultad que el adhesivo tenía más resistencia que el sustrato.

Una dificultad encontrada fue que con las dimensiones estándar de las uniones que se estaban realizando con adhesivos de alta resistencia se rompía el sustrato y la unión permanecía intacta, con lo cual hubo que pasar a elegir probetas de espesores más grandes. Con los nuevos espesores utilizados ya no se rompía en ningún caso el sustrato, sino que con todos los adhesivos la rotura ocurre por la unión, con lo cual el problema quedó resuelto.

2.3.- Tipo de unión seleccionada.

La unión seleccionada para nuestros ensayos ha sido la unión a solape simple (Fig. 61), porque es una unión de fácil reproducción y a la vez muy representativa del tipo de uniones más frecuentes en la industria de fabricación con chapa.



Figura 61. Unión seleccionada y curva de tensiones a lo largo de la línea de unión.

La longitud de solape igual que el ancho de la probeta y demás características de la unión se han hecho de acuerdo a la norma UNE-EN 1465.

2.4.- Sistemas de fijación.

Se han empleado tres sistemas distintos de fijación para compararlos entre sí y con los diferentes tipos de acabados seleccionados:

- a) Unión con adhesivo solamente.
- b) Uniones de tipo mecánico.
- c) Uniones mixtas (unión mecánica más adhesiva). (Fig. 62).



Figura 62. Unión mixta: Adhesivo mas clinchado.

2.5.- Adhesivos seleccionados.

2.5.1.- Introducción.

Se han seleccionado cuatro tipos de adhesivos de propiedades diferentes, atendiendo a los diferentes grupos que existen, estos son los siguientes:

Cianoacrilato.
Epoxi.
Silano modificado.
Poliuretano.

2.5.2.- Adhesivo Cianoacrilato.

El adhesivo utilizado del grupo Cianoacrilato es el **LOCTITE 480**, se trata de un producto monocomponente en estado viscoso de color negro, que presenta un curado rápido, que admite buena flexibilidad y tiene buena resistencia a las tensiones de pelado.

Su endurecimiento inicial es rápido, en menos de un minuto las superficies ya quedan unidas con fuerza, y se pueden manipular las uniones al cabo de unos minutos. Alcanza su resistencia máxima en 24 horas y sirve para unir materiales metálicos, plásticos y elastómeros.

La tensión cortante máxima teórica para chapas de acero según el fabricante es de 26 N/mm².

2.5.3.- Adhesivo Epoxi.

El adhesivo utilizado del grupo Epoxi es el **LOCTITE 9464**. Se trata de un producto formado por dos componentes que se mezclan en relación 1:1 en el momento de realizar la unión mediante un dosificador especial suministrado por el fabricante del adhesivo. Los dos componentes son una Resina y un Endurecedor, ambos son una pasta de color blanco mate y después de mezclados queda un adhesivo de color gris mate.

El tiempo mínimo para poder manipular las uniones es de 3 horas, y su resistencia máxima la adquiere al cabo de 3 días a temperatura ambiente. No obstante estos tiempos se pueden disminuir hasta curar en 2 o 3 horas si el curado se hace en un horno a temperaturas controladas entre 60 y 150 grados centígrados.

La tensión cortante máxima teórica para chapas de acero según el fabricante es de 22 N/mm².

2.5.4.- Adhesivo Silano Modificado (MS).

El adhesivo utilizado del grupo Silano Modificado es el **LOCTITE 5069**. Se trata de un adhesivo de un solo componente que se presenta en forma de pasta de color negro.

Es un producto que aporta mucha flexibilidad a la unión, es muy útil cuando las uniones están sometidas a vibraciones.

La tensión cortante máxima teórica para chapas de acero según el fabricante es de 3.5 N/mm².

2.5.5.- Adhesivo Poliuretano, marca Sika.

El adhesivo utilizado del tipo Poliuretano es el **SIKA-FLEX 260**. Se trata de un adhesivo de un solo componente que se presenta en forma de pasta de color negro. Su endurecimiento tiene lugar con la humedad del ambiente. El tiempo que se necesita para poder manipular la unión es de 24 horas y su máxima resistencia la alcanza al cabo de varios días.

Con este adhesivo las uniones son muy flexibles, es por eso especialmente indicado para trabajar en lugares expuestos a cargas dinámicas.

La tensión cortante máxima teórica para chapas de acero según el fabricante es de 4 N/mm².

En las superficies de acero galvanizado se ha dado primero una imprimación para mejorar la adherencia del adhesivo al sustrato. La imprimación empleada es la denominada **SIKA-PRIMER 204**. Esta imprimación es un fluido viscoso de color amarillo opaco. Su aplicación se hizo un día antes que el adhesivo para asegurar su secado total que varía entre 1 y 24 horas.

2.5.6.- Adhesivo de Poliuretano, marca Kömmerling.

Se trata del adhesivo denominado Körapur 140. Está formado por un solo componente que se presenta en forma de pasta de color blanco. Su endurecimiento tiene lugar con la humedad del ambiente. El tiempo que se necesita para poder manipular la unión es de 24 horas, y su máxima resistencia se alcanza al cabo de varios días. No necesita imprimación.

La tensión cortante máxima teórica para chapas de acero, según el fabricante es de 2 N/mm².

Este adhesivo es el que se ha usado para realizar los ensayos de la influencia del espesor de adhesivo en la resistencia de la unión.

2.6.- Uniones mecánicas seleccionadas.

2.6.1.- Uniones clinchadas. (Fig. 63).

2.6.1.1.- Definición.

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

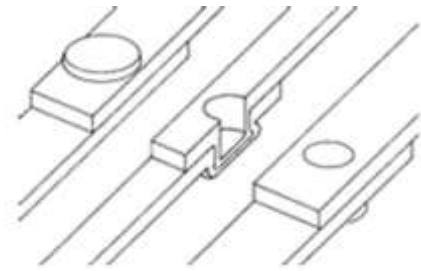


Figura 63. Unión clinchada.



El clinchado de chapas y

deformación de ambas chapas, mediante la acción de un punzón, que en nuestro caso es de un diámetro de 4.5 mm, de manera que se produce una deformación de ambas sin llegar a la rotura ni desgarro de ninguna de ellas, de forma que quedan unidas según se muestra en la Fig. 64.

Figura 64. Sección detalle de una unión clinchada.



Figura 65. Detalle deformación exterior e interior de unión clinchada.

En la Fig. 65 se puede ver una unión realizada por clinchado después de haber sido ensayada.

2.6.1.2.- Método de ejecución.

En el clinchado un punzón (Fig. 66) empuja a las dos chapas hasta un agujero de la máquina de forma que se produce una gran deformación permanente en las dos chapas. Las deformaciones producidas impiden que las chapas unidas se separen.

2.6.1.3.- Características más destacadas.

La característica de este sistema es que el mismo metal a unir provee la unión sin generación de calor, ruido o agregado de otros componentes.

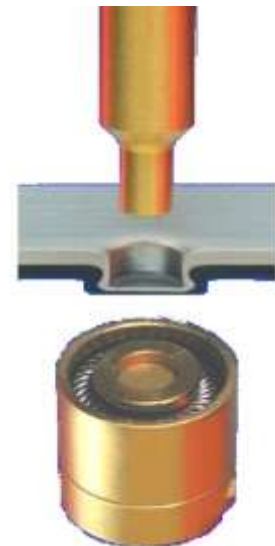


Figura 66. Método de ejecución de la unión clinchada.

La energía requerida para accionar las herramientas de clinchado es de tipo neumática.

2.6.2.- Uniones remachadas.

El tipo de remache que se ha utilizado ha sido de acero de 4 mm de diámetro. Y se han realizado con una herramienta como la que se muestra en la Fig. 67.



Figura 67. Herramienta de remachar en posición de ejecución del remache.

3.- OPERACIONES DE UNIÓN.

3.1.- Secuencia de Adhesión.

El proceso de adhesión ha sido realizado desarrollándolo en las siguientes etapas:

3.1.1.- Selección de chapas.

Esta primera etapa consiste en elegir las chapas que tienen mejores cortes, las que presentan buen estado superficial, sin ralladuras ni deterioros de ningún tipo, y a su vez se eligen las que menos suciedad en forma de limaduras o de negro de humo o manchas de aceite presenten. Además se hace una prelimpieza con gamuza (Fig. 68) para eliminar partículas adheridas, limaduras y rebabas de otras chapas.



Figura 68. Prelimpieza de las superficies a unir.

3.1.2.- Preparación de superficies.

Se han realizado dos preparaciones de superficies:

- a) La primera ha sido partiendo de las chapas blancas, se han lijado (Fig. 69) todas las que se van a unir con acabado superficial lijado.



Figura 69. Proceso de lijado de chapas con superficie original laminada.

b) En segundo lugar las chapas que se van a unir con el adhesivo cianoacrilato Loctite 480, se han eliminado todas las rebabas procedentes del corte de las mismas, para evitar cualquier interferencia de estas. Sólo se ha hecho en este tipo de adhesivo porque en estas uniones se requieren espesores de adhesivo muy pequeños, del orden de 1 décima de milímetro, en algunos casos la rebaba podría impedir esa holgura que es la adecuada para este tipo de adhesivo. En el caso de los demás adhesivos esto no se ha realizado porque los espesores de capa de adhesivos son muy superiores a las posibles rebabas, por eso en ningún caso impiden conseguir el espesor deseado.

3.1.3.- Limpieza de superficies.

Todas las superficies se han limpiado con un paño impregnado en acetona (Fig. 70) y después se han dejado secar.

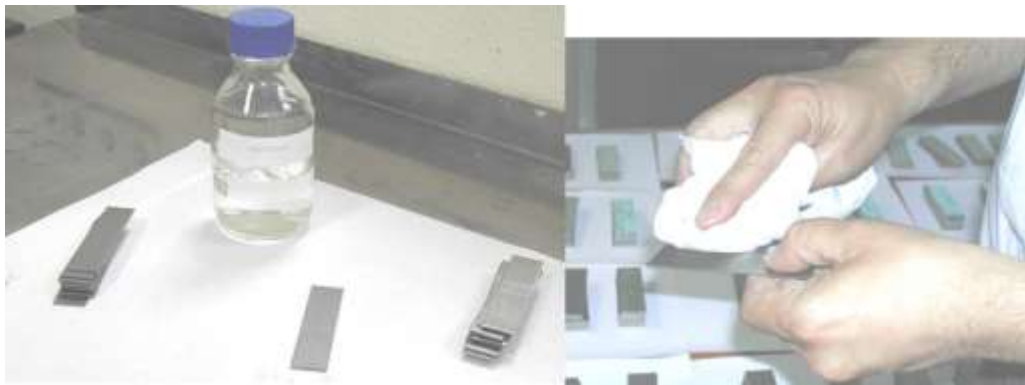


Figura 70. Limpieza de las superficies con acetona.

Y posteriormente se envolvieron en paquetes de 12 chapas (Fig. 71) con igual preparación, para evitar la posible adhesión de partículas del ambiente desde el momento de la limpieza hasta la operación de unión.



Figura 71. Paquetes de 12 chapas preparadas para aplicar el adhesivo.

3.1.4.- Preparación para unir.

La preparación que se ha realizado para unir las chapas con la mayor precisión y rapidez posible ha consistido en lo siguiente:

a) Unión lateral temporal de las chapas de 3 en 3 (Fig. 72). La unión se ha realizado con celofán y uniendo estas tres a otra chapa del mismo espesor de forma transversal para que esta última sirva de apoyo en el momento de la unión. Esto se ha hecho para asegurar que las chapas después de unidas quedan perfectamente alineadas, pues una de las dificultades que nos encontramos al unir las chapas es que durante el proceso de fraguado del adhesivo suele haber un giro de una chapa con respecto a la otra, de esta forma hemos conseguido que el movimiento de giro sea prácticamente despreciable, porque se sujetan entre sí gracias a la unión del celofán y a la rigidez de la otra chapa que tienen en el otro extremo.



Figura 72. Unión temporal con celofán y marcado de la zona donde se aplica el adhesivo, a 12.5 mm del extremo.

b) Marcado en todas las chapas una línea a la distancia de 12.5 mm del extremo (Fig. 72), lo cual sirve de referencia para saber hasta donde se debe añadir el adhesivo y al situar la otra chapa encima también sirve para que la longitud de solape de 12.5 mm quede lo más exacta posible.

3.1.5.- Realización de las uniones.

El procedimiento de unión depende de los tipos de uniones realizadas, por eso los dividimos en tres tipos:

1. Uniones con sólo adhesivo.
2. Uniones mecánicas.
3. Uniones mixtas (adhesivo más mecánica).

3.1.5.1.- Uniones con sólo adhesivo.

Cada adhesivo tiene su propio método de unión, aunque entre ellos tienen muchas etapas en común:

a) Uniones con **cianoacrilato** Loctite 480. El adhesivo se reparte por toda la superficie a unir en su estado de fluido viscoso en una de las chapas a unir e inmediatamente se coloca la otra sobre la primera ejerciendo presión sobre las mismas durante un minuto.

b) Uniones con adhesivo **epoxi** Loctite 9464. Este adhesivo se presenta en forma de pasta formado por dos componentes que se unen en el momento de dosificarlo, por eso se adiciona la cantidad adecuada de la mezcla de los dos componentes en una de las caras de las chapas a unir y posteriormente se superpone la otra cara ejerciendo presión hasta conseguir que toda la superficie de la unión quede impregnada de adhesivo y que el espesor de la unión quede uniforme y con el

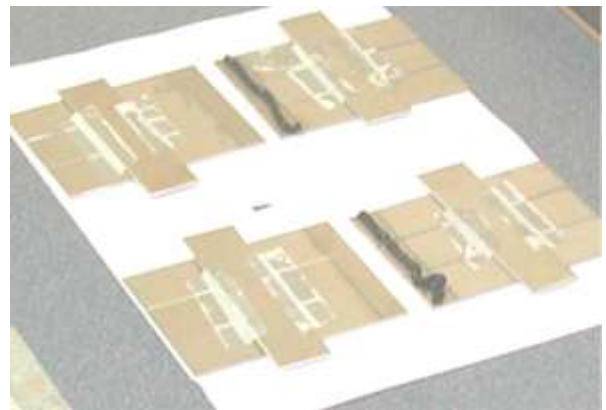


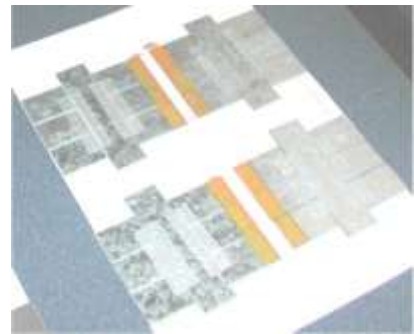
Figura 73. Adición del adhesivo MS (Loctite 5069).

mismo espesor que el resto de las uniones con este adhesivo.

c) Uniones con adhesivo **MS** Loctite 5069. Este adhesivo se presenta en forma de pasta (Fig. 73), por eso se adiciona la cantidad adecuada del mismo en una de las caras de las chapas a unir y posteriormente se superpone la otra cara ejerciendo presión hasta conseguir que toda la superficie de la unión quede impregnada de adhesivo y que el espesor de la unión quede uniforme y con el mismo espesor que el resto de las uniones con este adhesivo.

d) Uniones con adhesivo **poliuretano**, SIKA-FLEX 260. En las chapas de acero galvanizado se ha dado antes de este adhesivo una imprimación (Fig. 74), la SIKA-PRIMER 204; se trata de un fluido viscoso de color amarillo opaco que se reparte por todas las superficies a unir, o sea en ambas caras y se deja secar durante 24 horas, al cabo de las cuales se adiciona el adhesivo sobre la capa de imprimación.

Figura 74. Adición de la imprimación SIKA-PRIMER 204 en chapas de acero galvanizado para posterior aplicación de adhesivo poliuretano (SIK-FLEX 260).



3.1.5.2.- Uniones de tipo mecánico solamente.

El método operativo de cada uno de los dos tipos de uniones realizados es muy distinto, porque las uniones realizadas difieren mucho una de la otra:

a) Uniones por **clinchado**. Se superponen las chapas por parejas hasta la marca realizada anteriormente a la distancia de 12.5 mm, y seguidamente se sitúan sobre la base de la máquina de clinchado (Fig. 75) y se sujetan manualmente mientras se acciona la palanca del actuador neumático para que se realice de forma inmediata la unión (Fig. 76).



Figura 75. Máquina de clinchado realizando la operación de unión.



Figura 76. Forma de la unión realizada por clinchado.

b) Uniones con **remache de 4 mm**. Estas uniones se realizan en varias etapas, primero se hace un agujero de diámetro 4 mm en cada una de las superficies a unir a una distancia de 6.25 mm desde el extremo, justo a la mitad de la longitud de solape prevista para la unión con adhesivo (Fig. 77). En segundo lugar se unen de dos en dos y se introduce un remache por el agujero. En tercer lugar se introduce el remache en la remachadora (Fig. 78). Y finalmente se acciona la palanca de la remachadora hasta que el remache queda completamente ajustado y fijando las dos chapas (Fig. 79).



Figura 77. Taladrado de los agujeros a diámetro 4 mm para luego introducir el remache.



Figura 78. Remachadora preparada para realizar la unión con remache.



Figura 79. Aspecto final de las uniones remachadas.

3.1.5.3.- Uniones mixtas de adhesivo mas clinchado.

a) En primer lugar se aplicó la imprimación a las chapas de acero galvanizado que se van a unir con poliuretano.

b) Al cabo de 24 horas se adicionaron todos los adhesivos y se realizaron las uniones adhesivas correspondientes.

c) De forma inmediata se fueron realizando todas las uniones anteriores con clinchado.

3.1.5.4.- Uniones mixtas de adhesivo mas remache.

a) En primer lugar se realizó el agujero de 4 mm a todas las chapas a unir.

b) En segundo lugar se aplicó la imprimación a las chapas galvanizadas que se van a unir con poliuretano.

c) Al cabo de 24 horas se adicionaron todos los adhesivos y se realizaron las respectivas uniones.

d) De forma inmediata se fueron realizando todas las uniones anteriores con el método del remache.

3.1.5.5.- Dificultad de alineación de probetas.

Una dificultad que surgió era que las uniones durante el curado de algunos adhesivos mas que otros se desviaban lateralmente, pero como no se podían solapar a una superficie fija porque luego se quedaban unidas a esta, lo que se optó por hacer fue vigilar las uniones después de realizadas y enderezarlas mientras este fenómeno sucedía. De todas formas las desviaciones de linealidad que sufrían no eran muy grandes ni tampoco le ocurría a todas las probetas. Cuando alguna probeta se veía muy desalineada se desechaba y se preparaba otra en su lugar.

3.1.6.- Medición de la unión.

3.1.6.1.- Dificultad para conseguir uniones similares.

Otra dificultad fue el conseguir la repetibilidad de las uniones, es decir conseguir que todas las uniones fueran lo mas parecidas posibles para que su comportamiento sea luego semejante, para ello lo que se hizo en primer lugar fue preparar una plantilla de madera de tal manera que las probetas después de aplicar el adhesivo quedaban en la plantilla sujetas para que no hubiese movimientos durante el curado, pero este método presentaba varios inconvenientes, uno que la plantilla se ensuciaba mucho con el adhesivo sobrante y luego costaba mucho quitarlo incluso estropeaba la propia plantilla, y otro que era un método muy lento, por lo tanto se desechó el método de la plantilla, y se ideó un nuevo método de unión que es el que se ha utilizado finalmente. Este método de unión consiste en lo siguiente, primero se colocan de 6 en 6 las chapas a unir apoyadas sobre una regla fija y se marca en todas ellas una línea transversal a 12.5 mm del extremo, esta línea es la que sirve luego de referencia para dos cosas, para saber hasta donde debe llegar la capa de adhesivo, y para que al realizar la unión con la otra chapa saber cuál es la longitud que debe ir solapada, lo cual se consigue con relativa facilidad ya que esa marca realizada es una buena referencia.

Debajo de la chapa que queda en la parte superior se han puesto suplementos de la misma chapa para evitar que durante el curado del adhesivo se desvíen hacia abajo.

No obstante y con todas las precauciones que se han tenido, se constata que todas las uniones no son idénticas, hay pequeñas variaciones en el espesor de la unión dentro de

cada adhesivo lo cual podría tener cierta influencia en los resultados de resistencia final, y también hay pequeñas diferencias en la longitud de solape de las uniones. Para resolver este problema se optó por medir en cada una de las uniones finales estos dos parámetros que son los más variables, para que a la hora de calcular la resistencia, al menos la longitud de solape tengamos la seguridad de que no influye, aunque pueda influir en la carga máxima. De todas formas y gracias a la experiencia adquirida las longitudes de solape y los espesores de adhesivo no han presentado grandes variaciones, y cuando se ha dado el caso de una probeta con un valor muy desviado en estos parámetros se ha realizado otra para sustituir a ésta.

3.1.6.2.- Metodología de medición.

Una vez realizada cada una de las uniones y después de esperar el tiempo correspondiente de curado se procede a la medición de los parámetros fundamentales de la unión, que son el ancho de las chapas, la longitud de solape real y el espesor de adhesivo conseguido.

Los instrumentos utilizados para estas mediciones son el calibre y el micrómetro (Fig. 80).



Figura 80. Instrumentos utilizados para la medición de las uniones.

El calibre se ha utilizado para medir el espesor de las chapas (Fig. 81), el ancho de las mismas (Fig. 82) y la longitud de solape (Fig. 83).



Figura 81. Medida del espesor de las chapas con calibre.



Figura 82. Medida del ancho de las chapas con calibre.



Figura 83. Medida de la longitud de solape con calibre.

El micrómetro centesimal se ha empleado para medir el espesor de la capa de adhesivo. Esta última se ha medido por diferencia entre lo que mide la unión después de realizada (Fig. 84) y lo que mide antes de adicionar el adhesivo.

3.2.- Espesor de adhesivo.

3.2.1.- Introducción.

El espesor de adhesivo que queda en la unión realizada es un factor determinante en cuanto a la resistencia de la unión.

En los adhesivos de tipo Poliuretano se ha demostrado que el espesor de la capa de adhesivo en las uniones por adhesión de materiales metálicos, tiene una influencia notable en el comportamiento y las propiedades mecánicas de dichas uniones (Fig. 85). La resistencia mecánica es máxima para capas de adhesivo de espesor muy delgado: 0,1 mm. Cuando el espesor crece de 0,1 hasta 1 mm la resistencia disminuye rápidamente. Para capas desde 1 hasta 1,5 mm la resistencia disminuye más lentamente, y a partir de 1,5 mm la



Figura 84. Medida de la unión después de realizada con micrómetro.

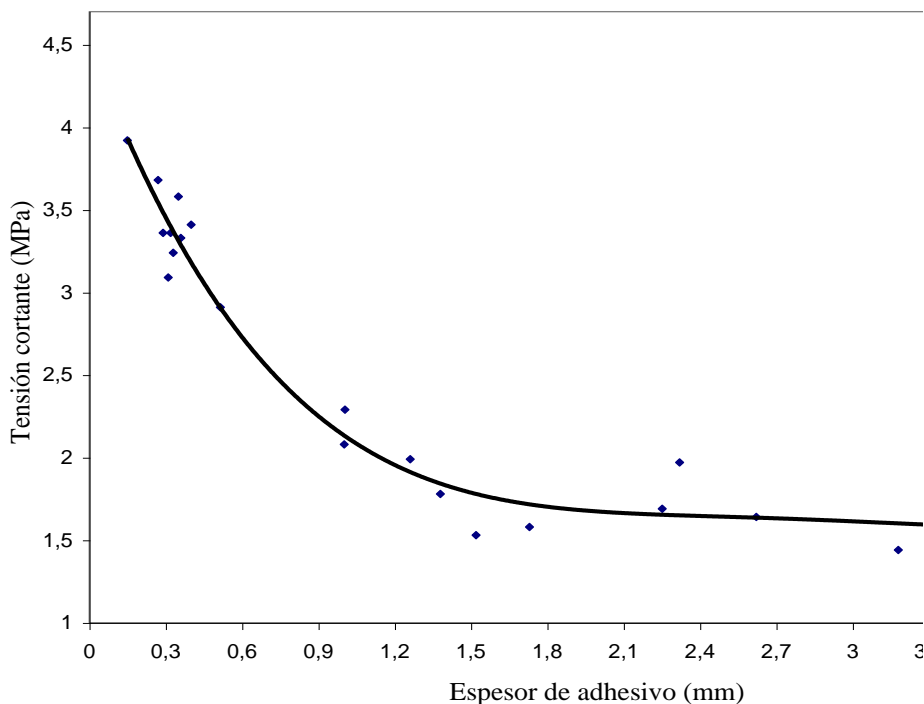


Figura 85. Valor de la tensión cortante en función del espesor de adhesivo poliuretano.

resistencia permanece prácticamente constante. Por otro lado, los desplazamientos de la unión aumentan uniformemente a medida que crece el espesor de la capa de adhesivo.

En general se puede decir que los espesores menores proporcionan mayor resistencia mecánica. Por este motivo se debe conseguir que todas las uniones realizadas con un mismo adhesivo tengan un espesor muy similar para que sean comparables. Para ello se debe adicionar la misma cantidad de adhesivo en todas ellas y después someterlas a la misma presión durante el curado. Estos dos parámetros, cantidad de adhesivo y presión ejercida durante el curado, serán diferentes en cada tipo de adhesivo, por eso se van a analizar y explicar en cada adhesivo por separado.

Además en todos los adhesivos se ha intentado que la capa de adhesivo sea lo menor posible, sin realizar presiones excesivas durante el curado, para intentar que los ensayos sean fácilmente reproducibles en los métodos de unión industriales.

3.2.2.- Adhesivo Cianoacrilato (Loctite 480).

Este adhesivo se presenta en estado de fluido viscoso, por lo que una vez repartido el adhesivo por toda la unión lo que se hace es presionar sobre la misma con la mano inmediatamente después de unir y mantener la presión durante un minuto, de esta forma el adhesivo sobrante se expulsa fácilmente hacia el exterior asegurando un mínimo espesor de adhesivo.

Los espesores de adhesivo que se han conseguido oscilan entre 6 y 7 centésimas de milímetro de valor medio en cada serie de 6 uniones con sólo adhesivo. Estos valores son los mínimos que se pueden conseguir con sólo presión manual.

Cuando se han hecho las uniones con adhesivo CN y remache los espesores de adhesivo han aumentado hasta valores entre 10 y 11 centésimas. Esto se explica porque el remache deforma un poco las chapas unidas, aunque esto aparentemente no se ve.

Con las uniones de adhesivo CN y clinchado no se ha medido el espesor de adhesivo porque la deformación que queda es tan grande que los errores que se cometerían al medir serían mayores que la precisión deseada.

3.2.3.- Adhesivo Epoxi de dos componentes (Loctite 9464).

Este adhesivo se presenta en dos componentes que se unen mediante un mezclador de forma automática durante el proceso de dosificación. El producto mezclado es una pasta blanda, la cual se adiciona en la cantidad adecuada sobre una de las caras a unir y después se presiona con la otra cara a unir con la mano para conseguir repartir el producto de forma uniforme por toda la superficie. Una vez conseguido esto se presiona fuertemente con la mano hasta que todo el producto sobrante salga fuera de la unión y hasta conseguir el mínimo espesor de adhesivo posible, se mantiene la presión durante un minuto y se dejan curando durante una semana.

3.2.4.- Adhesivo Silano Modificado (Loctite 5069).

Este producto se presenta en forma de pasta blanda, la cual se adiciona en la cantidad adecuada sobre una de las caras a unir y después se presiona con la otra cara a unir con la mano para conseguir repartir el producto de forma uniforme por toda la superficie. Una vez conseguido esto se presiona fuertemente con la mano hasta que todo el producto sobrante salga fuera de la unión y hasta conseguir el mínimo espesor de adhesivo posible, se mantiene la presión durante un minuto y se dejan curando durante una semana.

3.2.5.- Adhesivo Poliuretano (Sika-flex 260).

Este producto se presenta en forma de pasta blanda, la cual se adiciona en la cantidad adecuada sobre una de las caras a unir y después se presiona con la otra cara a unir con

la mano para conseguir repartir el producto de forma uniforme por toda la superficie. Una vez conseguido esto se presiona fuertemente con la mano hasta que todo el producto sobrante salga fuera de la unión y hasta conseguir el mínimo espesor de adhesivo posible, se mantiene la presión durante un minuto y se dejan curando durante una semana.

3.3.- Aprendizajes conseguidos.

Respecto a la variabilidad de las uniones, se ha aprendido a realizar las uniones y los ensayos de forma que los resultados entre unos y otros varían lo mínimo.

4.- ENSAYOS MECÁNICOS.

4.1.- Máquina de ensayo.

4.1.1.- Descripción.

Se trata de una máquina que ejerce una fuerza axial creciente de la probeta que se sitúa entre sus garras, hasta llegar a la rotura de la misma (Fig. 86). Las características de la máquina y el software que utiliza son los siguientes:

MÁQUINA MARCA INSTRON MODELO 1362. MTS + CONTROL SERVOSYS.

TIPO: MÁQUINA DE ENSAYOS HIDRÁULICA.

CÉLULA DE CARGA: MTS. 20 kN.

VELOCIDAD DE CARGA EMPLEADA EN LOS ENSAYOS: 100 N/s.

SOFTWARE DE CONTROL: PCD-1065 (SERVOSYS). Versión 1.4.0.239.

La máquina se dirige desde un puesto de control, compuesto por un autómata que es el que transmite las órdenes y recibe las señales que envía la máquina y por un ordenador que sirve para procesar los datos que le transmite el autómata y para mandar las órdenes al autómata.

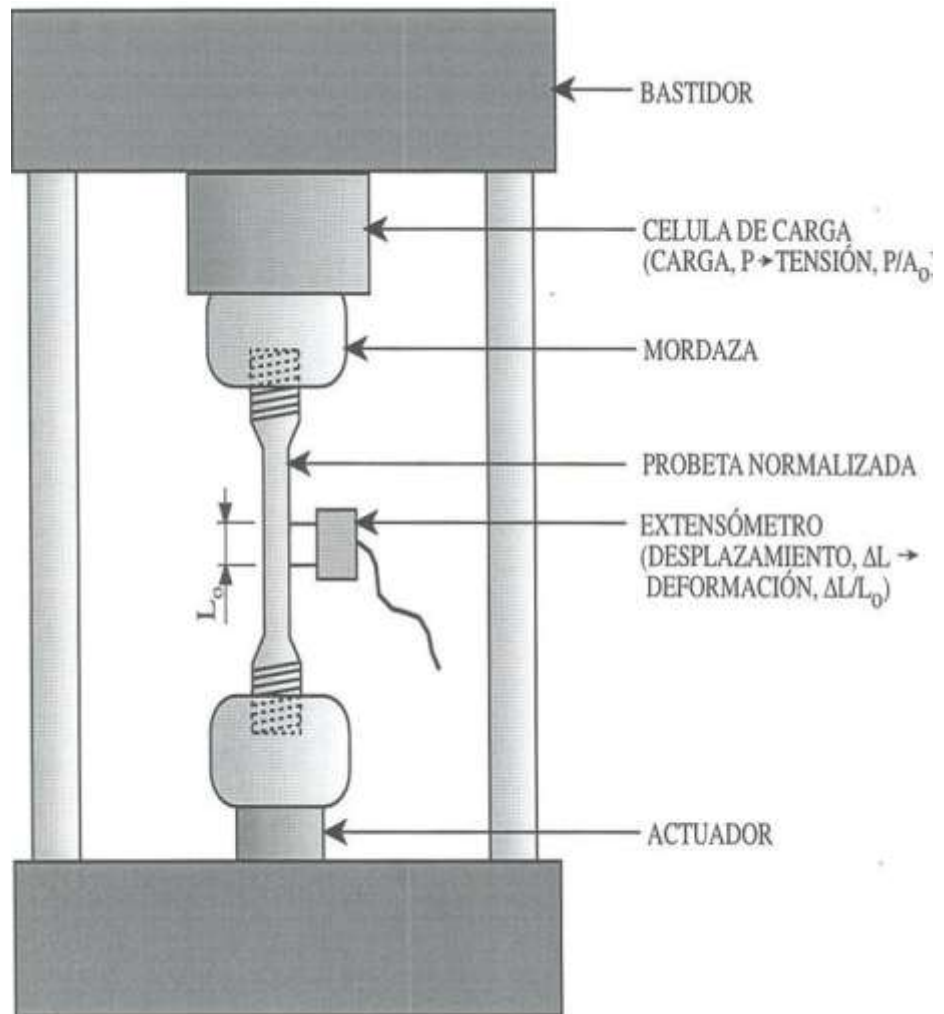


Figura 86. Máquina para realizar el ensayo de tracción.

4.1.2.- Funcionamiento.

La máquina se acciona desde el ordenador (Fig. 87), el cual transmite la orden al actuador para que lo accione tirando de las garras. En la parte superior lleva la célula de carga mediante la cual se controla el esfuerzo que se va realizando sobre la probeta y que se coloca entre las garras. Una vez que la probeta rompe, la máquina se para de forma automática y en el ordenador aparecen reflejados todos los datos de control del ensayo tensión deformación realizado.



Figura 87. Conjunto de dispositivos de accionamiento y control de la máquina de tracción.

4.1.3.- Características de la máquina de tracción.

Tipo: MÁQUINA DE ENSAYOS HIDRAÚLICA.

Marca. INSTRON

Modelo: 1362 (MTS).

Tipo de control: CONTROL SERVOSIS.

Célula de carga: MTS de 20 kN.

Software de control: PCD-1065 Versión 1.4.0.239 (SERVOSIS).

4.1.4.- Parámetros utilizados en el ensayo.

Se han realizado los ensayos con una célula de carga de 20 KN, el recorrido de trabajo es de 75 mm y la velocidad de carga de 100 N/s.

4.1.5.- Resultados.

El ordenador presenta los resultados de forma analítica y gráfica (Fig. 88). Todo lo cual queda grabado en un fichero que posteriormente podrá ser utilizado con otras aplicaciones. Los resultados principales que nos ofrece son los parámetros de control del ensayo además de los resultados obtenidos, estos son los valores de esfuerzo y deformación, incluida la fuerza máxima y la deformación máxima.

4.1.6.- Dificultad de alineación de carga durante el ensayo de tracción.

Otra dificultad que se encontró es que al realizar los ensayos la carga no quedaba perfectamente alineada en la zona de la unión, para resolver esto se han puesto un suplemento del mismo espesor que la chapa a unir en cada una de las mordazas de sujeción de la probeta.

4.2.- Probetas de ensayo.

4.2.1.- Normativa del ensayo.

Para la realización del ensayo se ha utilizado la norma sobre adhesivos UNE-EN 1465, cuyo título es "Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos". Esta norma UNE es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 1465 de fecha noviembre de 1994, que a su vez adopta la Norma Internacional ISO 4587:1979, modificada.



Figura 88. Panel de resultados que ofrece la aplicación en el ordenador.

Esta norma especifica un método para determinar la resistencia a la cizalladura por tracción en juntas pegadas resultantes del solapamiento de sustratos rígido-rígido, cuando se ensayan en probetas normalizadas y bajo condiciones especificadas de preparación y ensayo.

La resistencia a la cizalladura por tracción de juntas unidas por solapamiento, se determina sometiendo a una tensión de cizalla a una junta solapada simple entre sustratos rígidos, por aplicación sobre los sustratos de una fuerza de tracción paralela al área pegada y al eje mayor de la probeta. Se registra como resultado la fuerza observada o tensión en el momento de la rotura.

4.2.2.- Dimensiones de las probetas (Fig. 89).

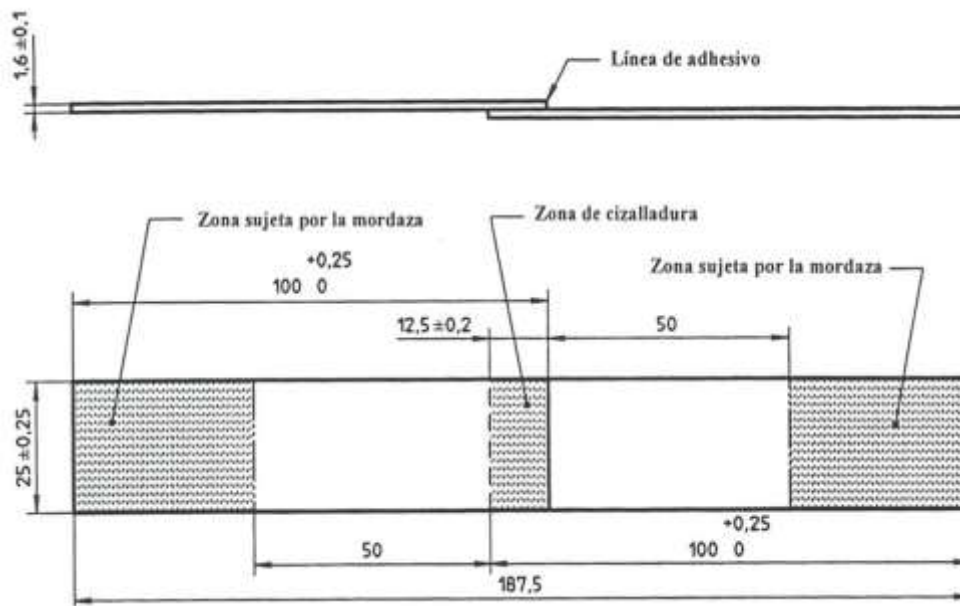


Figura 89. Dimensiones de las probetas utilizadas.

Las probetas son rectangulares de dimensiones 100 x 25 mm. La norma citada establece que el espesor de las probetas sea de 1.6 mm, pero en nuestros ensayos el espesor de las chapas se ha adaptado a los estándares de las mismas que hay en el mercado para cada tipo de superficie. Esta modificación tiene mínima influencia en los resultados finales. En las superficies pintadas la chapa utilizada es de 0.83 mm de espesor. Para el resto de superficies se han utilizado espesor 1.5 mm.

4.2.3.- Número de probetas.

El número de probetas que se han utilizado para cada ensayo han sido 6 unidades, que es el mínimo requerido por esta norma.

4.3.- Realización de los ensayos.

4.3.1.- Descripción del ensayo.

La probeta se sitúa en las mordazas de las garras de la máquina de la siguiente manera (Fig. 90): en cada lado de la probeta se sujeta la misma superpuesta con un suplemento del mismo espesor, para eliminar el momento flector que de otra forma se produciría por desalineación de fuerzas. De este modo el eje de la fuerza de la mordaza superior coincide con el eje de la fuerza de la mordaza inferior.

La longitud de agarre de la mordaza en la probeta es de 50 mm.



Figura 90. Situación de la probeta en las mordazas de las garras de la máquina.

Una vez situada la probeta perfectamente alineada con el eje de la máquina, se aprietan las mordazas quedando así lista para realizar el ensayo.

La velocidad de carga durante el ensayo se ha calculado para que el tiempo del ensayo sea de alrededor de 1 minuto.

Desde el ordenador situado en el puesto de control se introducen los parámetros de control del ensayo y se da la orden de realización del mismo, a partir de ese momento el ensayo se realiza de forma automática hasta que la probeta rompe y en ese instante y de forma automática se para el ensayo.

En el ordenador se puede ir siguiendo en todo momento del ensayo, la evolución del estado de cargas y deformaciones que está sufriendo la probeta, y al finalizar el ensayo presenta la curva tensión-deformación correspondiente al resultado completo del ensayo.

4.3.2.- Preparación del ensayo.

Lo primero que se realiza es calcular el valor de todos los parámetros de control de la máquina, tales como velocidad del ensayo, carga máxima a la que puede ser sometida la máquina, tamaño de las probetas, etc. y se introducen los valores adecuados en cada uno de los parámetros de control.

Luego se sujeta la probeta en las garras según se ha indicado anteriormente, quedando de esta forma listo el ensayo para realizarse.

4.3.3.- Ejecución del ensayo.

La ejecución del ensayo consiste en pulsar en el ordenador el botón de comienzo y a partir de este momento el ensayo se realiza de forma automática y para la máquina también de forma automática cuando rompe la probeta, quedando reflejada en el ordenador la curva esfuerzo-deformación con todos los valores de la misma.

4.4.- Presentación de resultados.

4.4.1.- Anotación de resultados.

De los valores que nos presenta el ordenador como resultado del ensayo se ha anotado solamente el valor de la máxima fuerza soportada por la unión (FR), que viene expresada en kN. Además de este dato se anota el tipo de rotura que tiene lugar, si es adhesiva o cohesiva, o en caso de rotura por el sustrato también se anotaría.

CAPITULO 4

RESULTADOS

4- RESULTADOS

1.- METODOLOGÍA PARA LA ANOTACIÓN DE RESULTADOS.

1.1.- Representación gráfica de las curvas tensión deformación de los ensayos.

Se han representado las curvas tensión-deformación de cada uno de los ensayos realizados para su posterior estudio y análisis de toda la información que estas curvas ofrecen y en el misma gráfica se han representado los resultados de las 6 probetas realizadas para cada tipo de unión (Fig. 91; 92; 93; 94; 95; 96; 97).

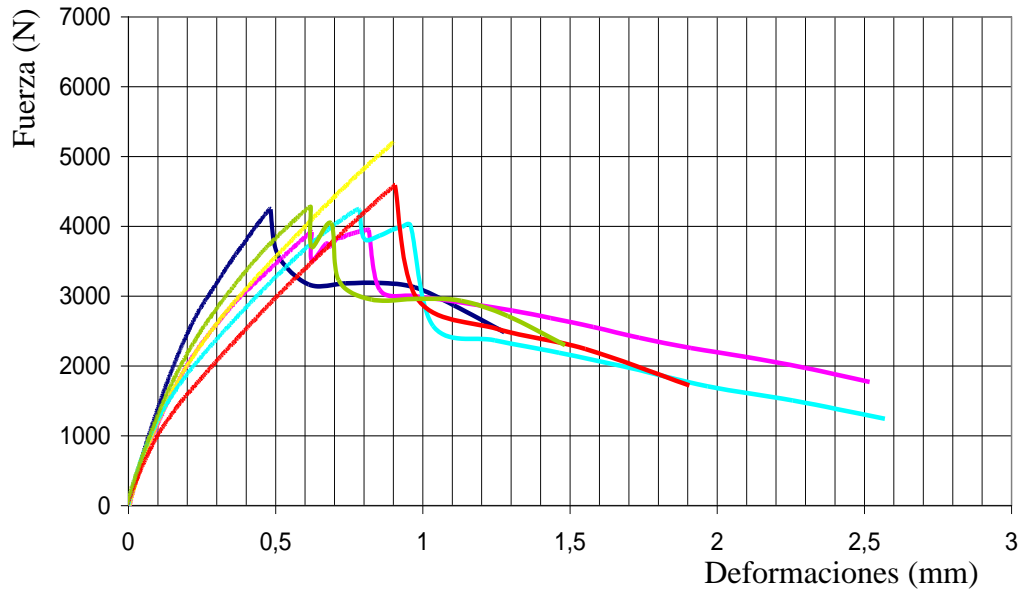


Figura 91. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie blanca con cianoacrilato mas clinchado.

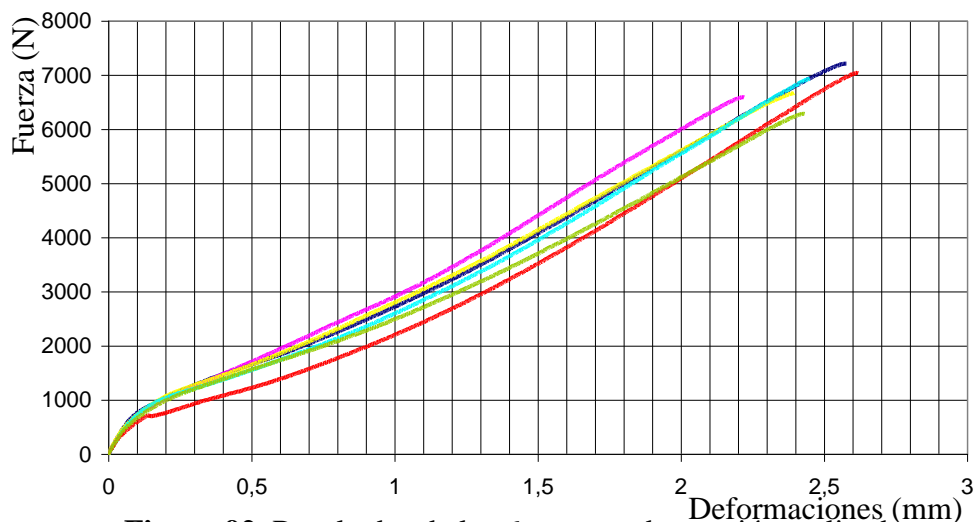


Figura 92. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie pintada con adhesivo epoxi.

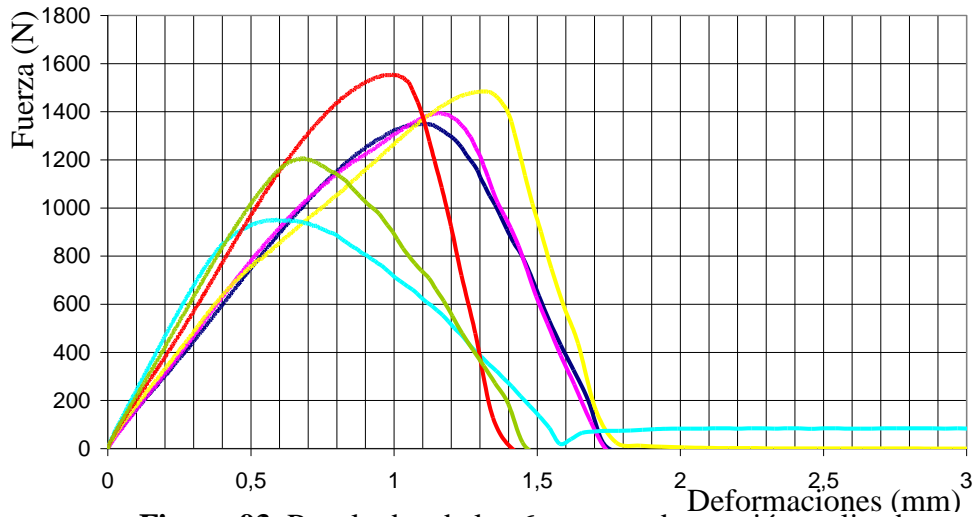


Figura 93. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie galvanizada con adhesivo MS.

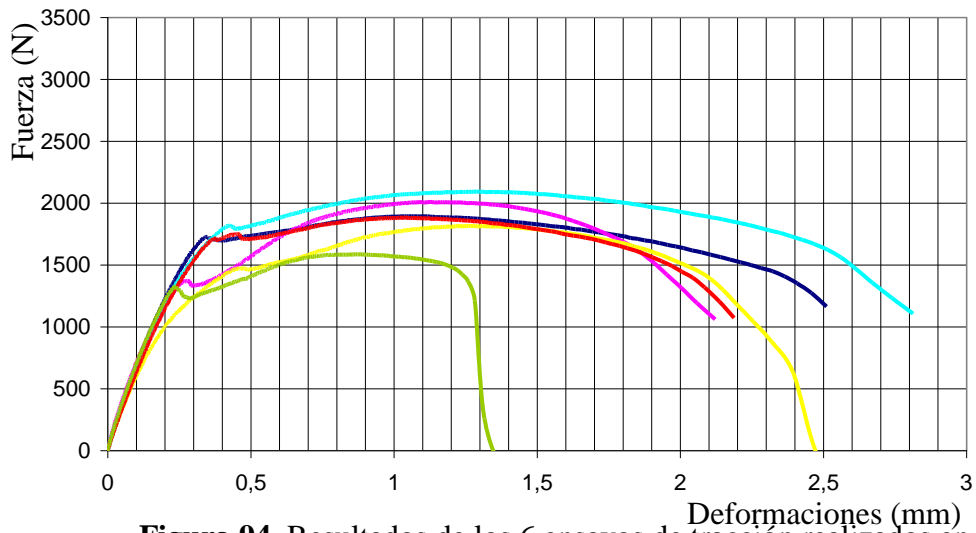


Figura 94. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie lijada con adhesivo PUR mas clinchada.

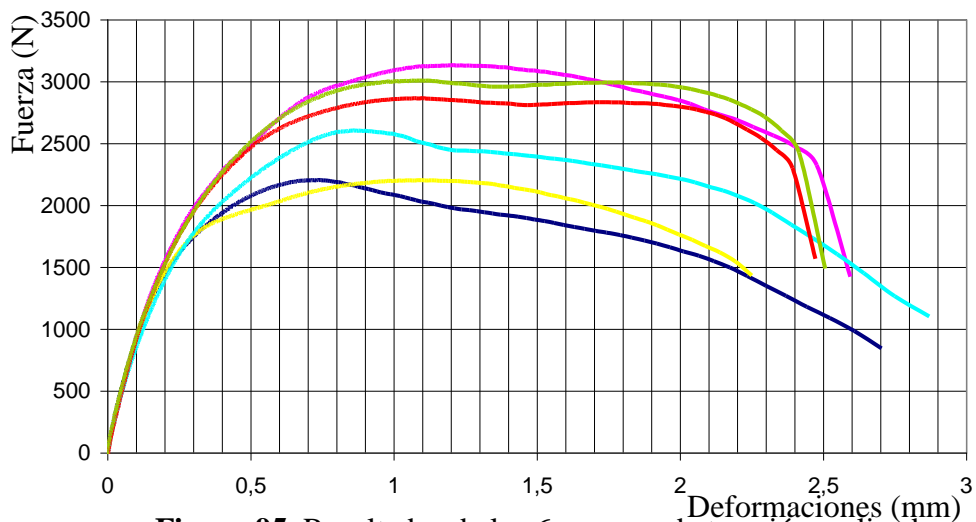


Figura 95. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie blanca con unión clinchada.

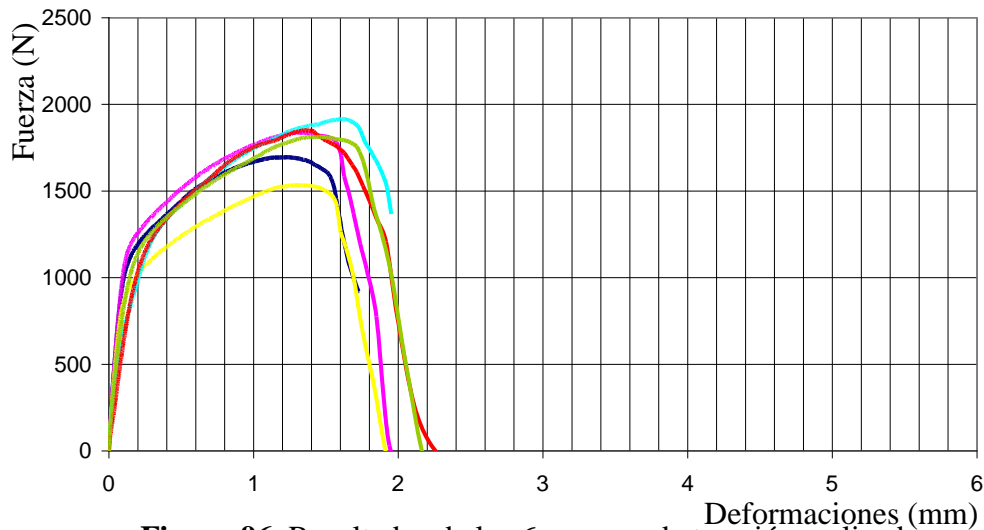


Figura 96. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en superficie blanca con unión remachada.

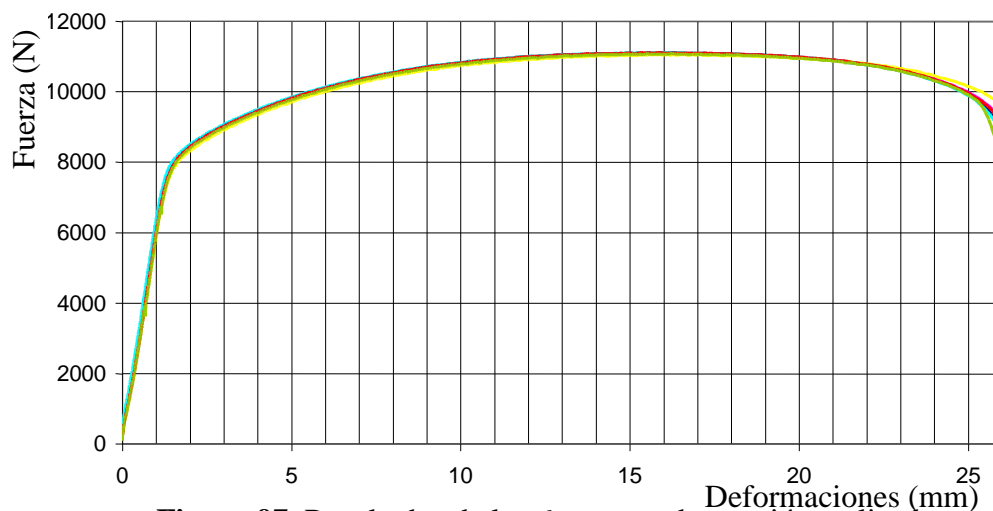


Figura 97. Resultados de los 6 ensayos de tracción realizados en el metal base de la superficie blanca.

Por otro lado se han representado gráficamente una probeta representativa de cada tipo de unión y agrupadas de la siguiente manera: PROBETAS DEL METAL BASE (Fig. 98), PROBETAS CON CADA UNO DE LOS ADHESIVOS (Fig. 99; 100; 101), PROBETAS CON CADA UNO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS (Fig. 102; 103), Y PROBETAS MIXTAS ORGANIZADAS POR ADHESIVO UTILIZADO. Además en cada gráfico se ha seleccionado también una probeta representativa de la chapa prepintada, que es de entre todos los sustratos utilizados el de menor capacidad de carga, para de esta forma poder comparar mejor la capacidad de carga de la unión frente a la capacidad del sustrato.

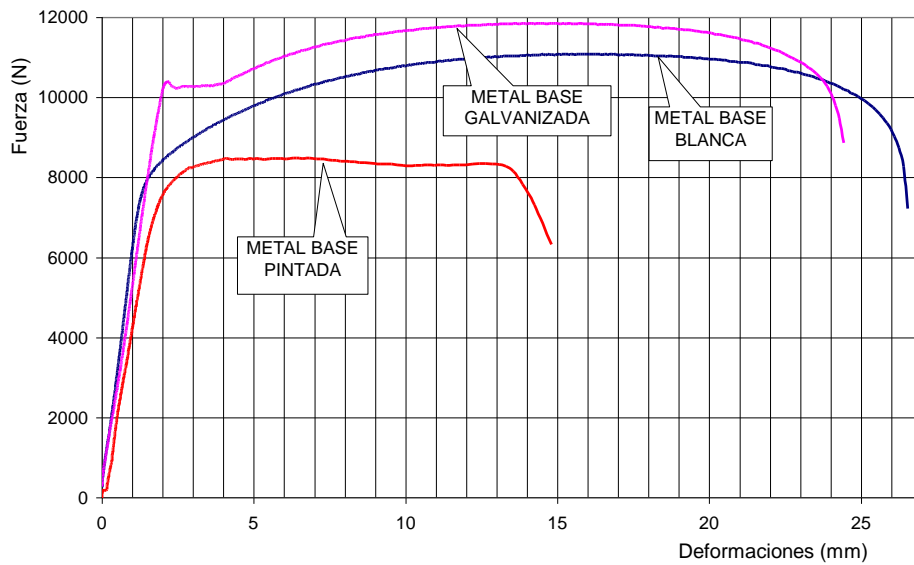


Figura 98. Resultados de probetas representativas del metal base.

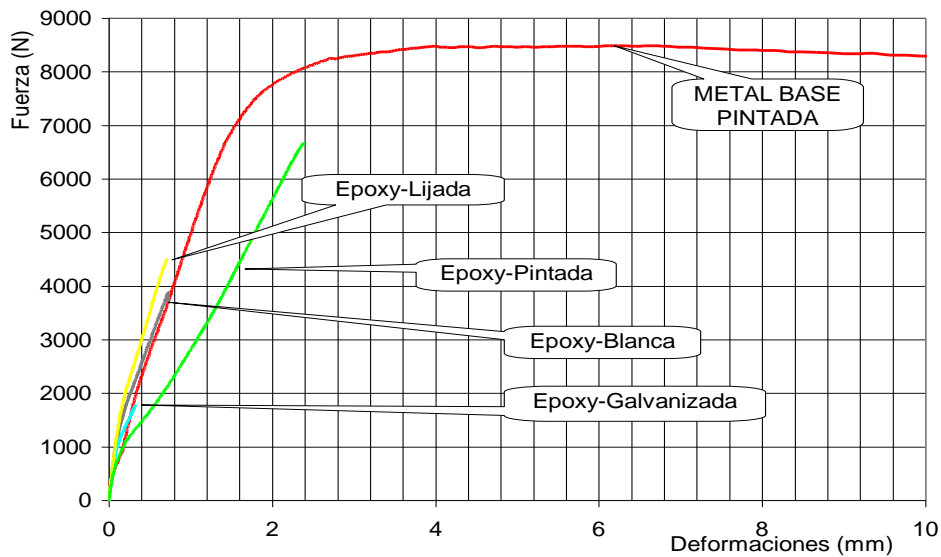


Figura 99. Resultados de probetas representativas del tipo de unión: Adhesivo Epoxi.

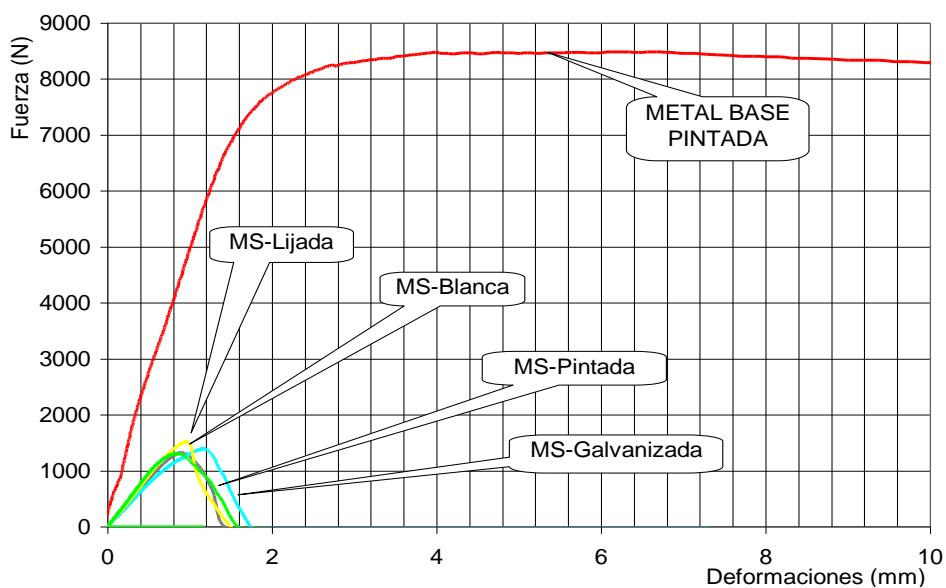


Figura 100. Resultados de probetas representativas del tipo de unión: Adhesivo MS.

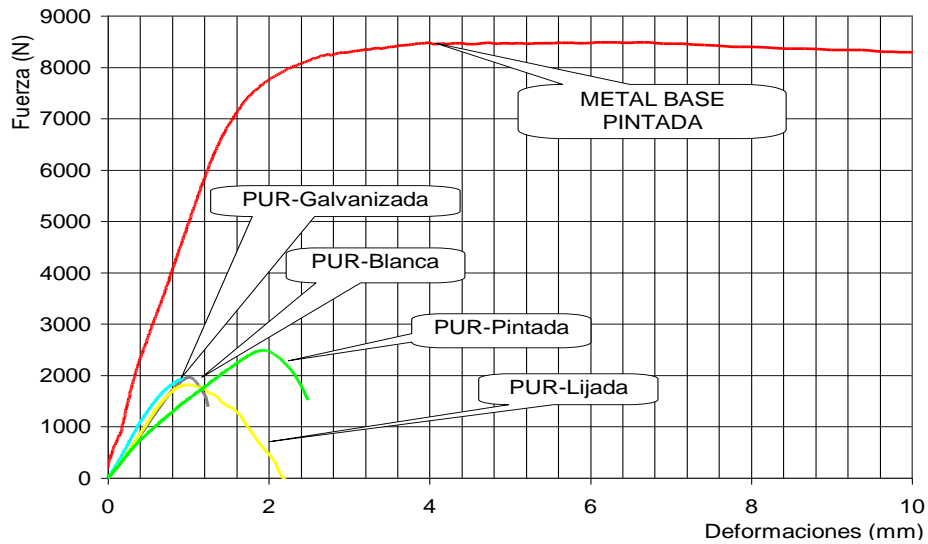


Figura 101. Resultados de probetas representativas del tipo de unión: Adhesivo PUR.

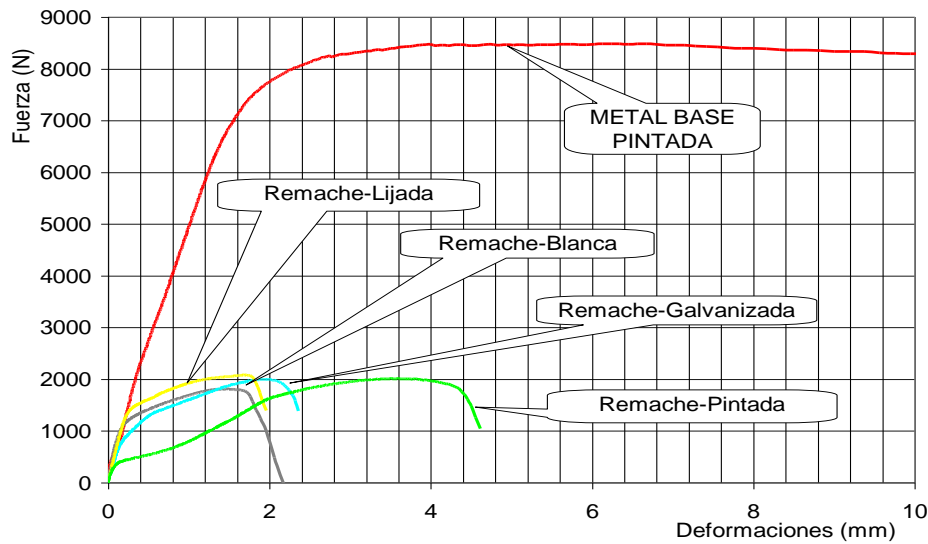


Figura 102. Resultados de probetas representativas del tipo de unión: Remache.

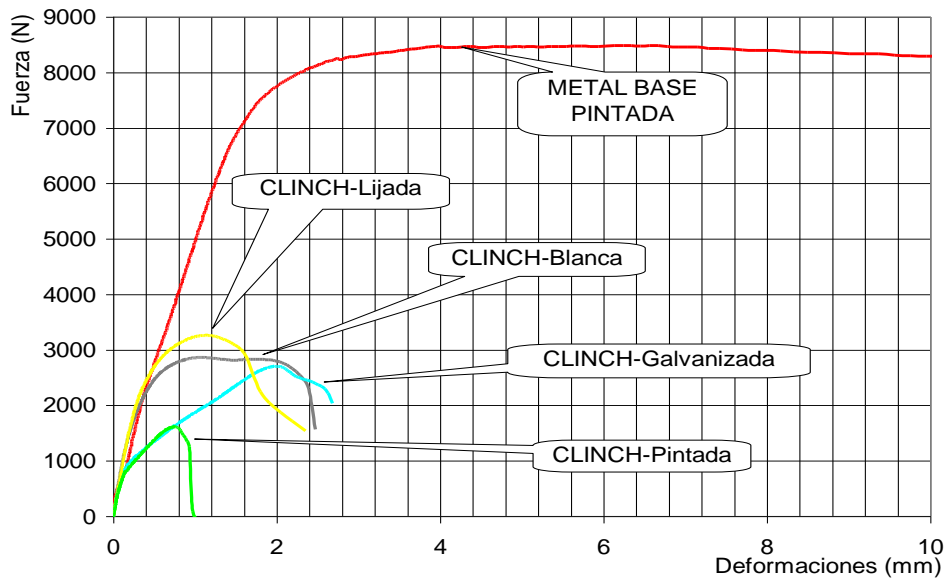


Figura 103. Resultados de probetas representativas del tipo de unión: Clinchado.

1.2.- Tabla de resultados.

Los datos anteriores junto con todos los datos que ya se habían obtenido de cada probeta, tales como dimensiones y espesor de adhesivo, se preparan en una tabla de resultados, para hacer los cálculos pertinentes, tales como tensión de rotura de cada unión (TR), valores medios de las 6 probetas de cada tipo, desviación típica (s), coeficiente de variación (CV), etc. Estas tablas de cada ensayo son las que luego se usarán para realizar el análisis de los diferentes ensayos.

Tabla 5. Tabla de resultados de las 6 probetas de cada tipo de unión.

| ENSAYO: tracción | | | | | | FR medio | 5,99 | TR medio | 19,21 |
|--|----------|-----------|----------|-----|---|--------------------------------|-------|----------|--------------|
| UNIÓN: CN-480 | | | | | | s(MPa) | 1,05 | s(MPa) | 3,31 |
| SUPERFICIE: pintada | | | | | | CV(%) | 17,60 | CV(%) | 17,26 |
| PREP. SUPERFICIAL: A | | | | | | A% | 1,7 | sp | 3,63 |
| ESP.: 0,83 FIJAC.: libre | | | | | | C % | 98,3 | CVp | 18,90 |
| FECHA: / | | | | | | S % | 0,0 | | |
| Nº | FR kN | TR MPa | Rotura % | | | Dimensiones de la probeta (mm) | | | |
| | | | A | C | S | b | l | t | e |
| 1 | 3,7 | 12,06 | 10 | 90 | 0 | 25 | 12,27 | 0,17 | 0,83 |
| 2 | 6,73 | 21,59 | 0 | 100 | 0 | 25 | 12,47 | 0,01 | 0,83 |
| 3 | 6,51 | 20,28 | 0 | 100 | 0 | 25 | 12,84 | 0,02 | 0,83 |
| 4 | 6,63 | 21,2 | 0 | 100 | 0 | 25 | 12,51 | 0,02 | 0,83 |
| 5 | 5,91 | 18,93 | 0 | 100 | 0 | 25 | 12,49 | 0,08 | 0,83 |
| 6 | 6,43 | 21,2 | 0 | 100 | 0 | 25 | 12,13 | 0,03 | 0,83 |

Tipo de ROTURA:

A: porcentaje de rotura adhesiva.

C: porcentaje de rotura cohesiva.

S: porcentaje de rotura del sustrato.

A modo de ejemplo se presenta aquí la tabla de resultados realizada para el ensayo de las 6 probetas correspondientes a la unión de cianoacrilato en superficie pintada de espesor 0.83 mm. (Tab. 5).

En la que el significado de los diferentes valores es el siguiente:

Preparación superficial: A = Las chapas han sido limpiadas con un paño y posteriormente se les aplicó una limpieza con acetona.

ESP: espesor medio de las 12 chapas.

e: espesor individual de cada chapa.

b: ancho de cada probeta.

l: longitud de solape de cada probeta.

t: espesor de adhesivo en cada probeta.

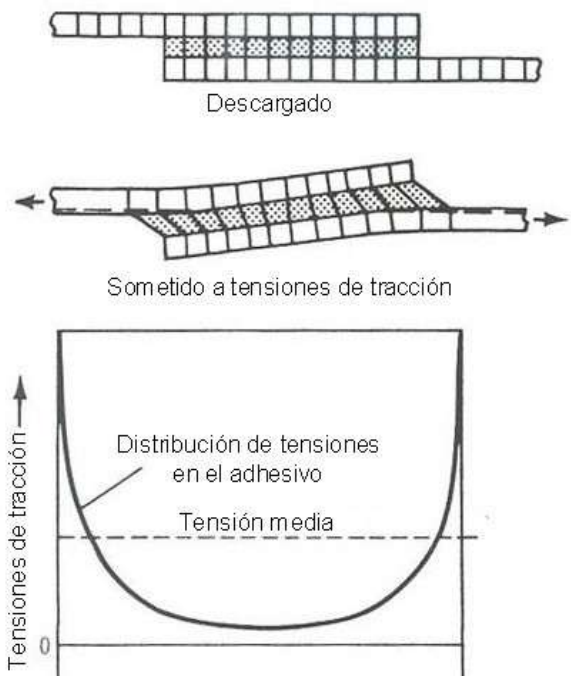


Figura 104. Unión a solape descargada y en tensión. Curva de tensiones cortantes en la unión a solape.

FR: fuerza necesaria para romper cada probeta en kN.

TR: Tensión media a la que estaba sometida la unión en el momento de la rotura. Este valor se obtiene de dividir la fuerza de rotura entre el área longitudinal de la unión. Esta es por tanto la tensión cortante media que produce la rotura. En realidad la unión falla porque la tensión cortante en los extremos es muy grande (Fig. 104), muy superior a este dato que nosotros calculamos, sin embargo esta es la forma típica de analizar el comportamiento de las uniones con adhesivos. El efecto que tiene la tensión cortante máxima en los extremos se puede ver físicamente cuando se realiza un ensayo de tracción a una probeta unida con una capa de adhesivo poliuretano de varios milímetros de (Fig. 105).



Antes de realizar el ensayo *Momento de la rotura*

Figura 105. Deformación de una unión realizada con adhesivo poliuretano de gran espesor durante el ensayo de tracción.

Cuando se une con adhesivos se pretende que el tipo de rotura sea en su mayor medida posible rotura cohesiva (C), pues de este modo se aprovechan al máximo las capacidades del adhesivo. No obstante algunos tipos de superficies como puede ser la galvanizada que tienen baja capacidad de unión a los adhesivos suelen dar porcentajes de rotura adhesiva (A), importantes, aunque en algunos casos sus valores de resistencia son bastante elevados, lo cual nos indica que las propiedades del adhesivo en esos casos han sido suficientemente aprovechadas.

Si acaso rompiera por el sustrato (S), nos estaría indicando que las capacidades del adhesivo son muy elevadas con respecto a la resistencia del sustrato. Esto es lo que puede ocurrir cuando se utilizan espesores de sustrato muy pequeños, en nuestro caso los espesores utilizados han sido suficientes para que en ningún caso nos ocurra este suceso.

s: representa la desviación típica normal de los 6 valores correspondientes. Esta es la que se calcula para los *n* valores.

$$s = \sqrt{\sum \frac{(TRM - TRi)^2}{n}}$$

CV: coeficiente de variación en %. Representa la relación en tanto por ciento entre la desviación típica normal y el valor medio del resultado que se estudia. Por ejemplo el *CV* de la tensión de rotura sería:

$$CV = \frac{s}{TR_{medio}} 100$$

sp: representa la desviación típica de los 6 valores correspondientes. Esta es la que se calcula para *n-1* valores.

$$sp = \sqrt{\frac{\sum (TRM - TRi)^2}{n-1}}$$

CVp: coeficiente de variación en %. Representa la relación en tanto por ciento entre la desviación típica y el valor medio del resultado que se estudia. Por ejemplo CVp de la tensión de rotura vale:

$$CVp = \frac{sp}{TR_{medio}} 100$$

1.3.- Estado de las probetas rotas.

La forma en la que queda la probeta después de realizar el ensayo puede en algunos casos ser de utilidad para determinar cómo han tenido lugar los esfuerzos que han causado la rotura de la misma.

Comparando probetas rotas del mismo tipo de unión se observa que la forma final de la probeta rota depende del esfuerzo máximo necesario para la rotura.

Comparando probetas rotas de diferentes tipos de unión se observa que la forma final es muy diferente dependiente de si se trata de un adhesivo de alta resistencia o de baja, si se trata de un adhesivo con una unión mecánica o adhesiva o mixta, etc. (Fig. 106).

Véanse los siguientes ejemplos ilustrativos.

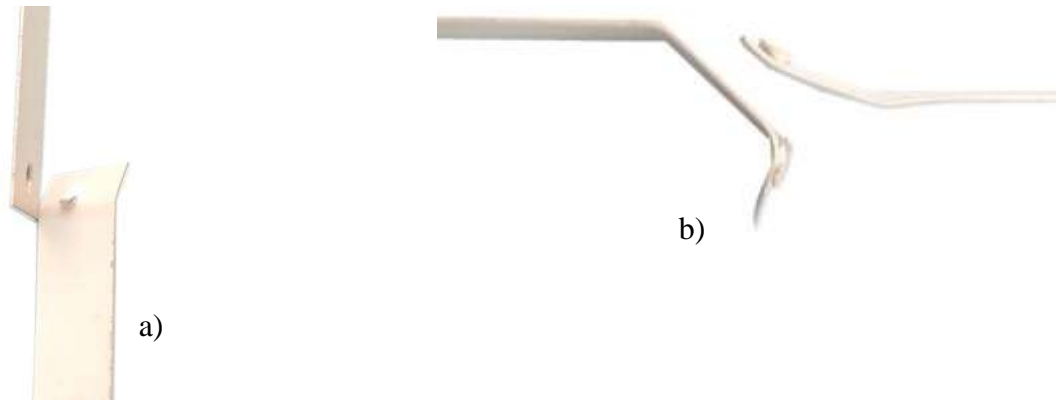


Figura 106. Diferentes tipos de roturas de las probetas unidas. a) Con poca deformación. b) Con gran deformación.

2.- FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS RESULTADOS.

2.1.- Espesor de adhesivo.

2.1.1.- Influencia del espesor de adhesivo en la unión.

El espesor de adhesivo que queda en la unión realizada es un factor determinante en cuanto a la resistencia de la unión.

En los adhesivos de tipo Poliuretano se ha demostrado que el espesor de la capa de adhesivo en las uniones por adhesión de materiales metálicos, tiene una influencia notable en el comportamiento y las propiedades mecánicas de dichas uniones. La resistencia mecánica es máxima para capas de adhesivo de espesor muy delgado: 0,1 mm. Cuando el espesor crece de 0,1 hasta 1 mm la resistencia disminuye rápidamente. Para capas desde 1 hasta 1,5 mm la resistencia disminuye más lentamente, y a partir de 1,5 mm la resistencia permanece prácticamente constante. Por otro lado, los desplazamientos de la unión aumentan uniformemente a medida que crece el espesor de la capa de adhesivo.

En general se puede decir que los espesores menores proporcionan mayor resistencia mecánica (Fig. 107). Por este motivo se debe conseguir que todas las uniones realizadas con un mismo adhesivo tengan un espesor muy similar para que sean comparables. Para ello se debe adicionar la misma cantidad de adhesivo en todas ellas y después someterlas a la misma presión durante el curado. Estos dos parámetros, cantidad de adhesivo y presión ejercida durante el curado, serán diferentes en cada tipo de adhesivo, por eso se van a analizar y explicar en cada adhesivo por separado.

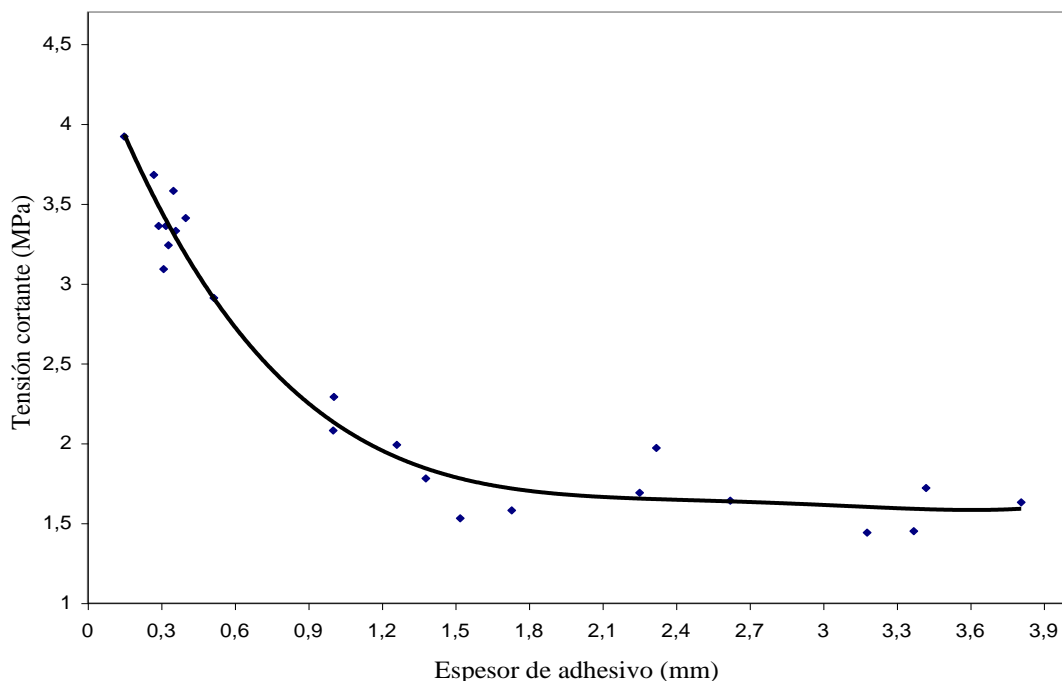


Figura 107. Tensión cortante máxima en función del espesor de adhesivo de tipo poliuretano.

La capa final de adhesivo que queda entre las dos superficies a unir depende fundamentalmente de dos factores, el tipo de adhesivo y de la presión ejercida durante el proceso de curado.

En nuestro caso todos los ensayos se han realizado con la misma presión, la cual es la ejercida de forma manual, de modo que el único factor variable es el tipo de adhesivo. De esta forma los espesores medios de adhesivo en el tipo de superficie blanca han sido los que se muestran en la Fig. 108.

Al realizar todos los ensayos con la misma presión, se ha pretendido que el factor espesor de adhesivo no influya en los resultados, además de que al ser una presión suficientemente alta, se ha conseguido una buena resistencia de cada uno de los adhesivos. De esta forma el resto de parámetros serán mas fáciles de determinar su influencia en el comportamiento final.

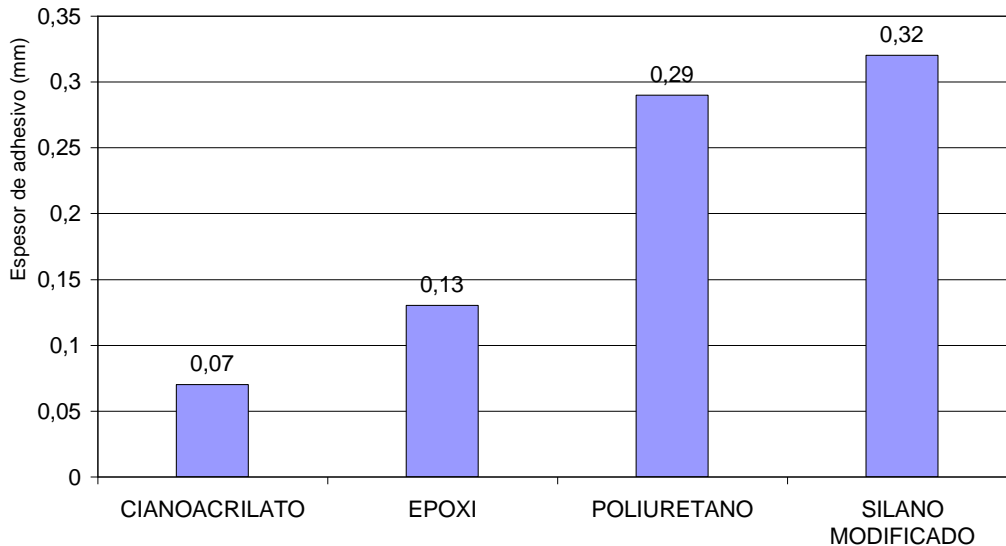


Figura 108. Espesores de adhesivo conseguidos en función del tipo de adhesivo utilizado para una misma presión durante el curado.

En los adhesivos de tipo flexible, como es el caso del Poliuretano, lo que se pretende en algunas ocasiones es que el comportamiento de la unión sea lo mas flexible posible, aunque se pierda algo de resistencia a cortadura. Esto se puede conseguir aumentando el espesor de la unión, de forma que se pueden encontrar uniones de varios milímetros para conseguir este objetivo. Debe tenerse en cuenta que cuando el espesor de adhesivo alcanza un cierto valor de capa de adhesivo, en torno a 2 mm, aunque se aumente éste, ya no se pierde más resistencia. O lo que es lo mismo, que las pérdidas de resistencia por causa del aumento de espesor de capa, sólo tienen lugar cuando se pasa de espesores muy pequeños hasta llegar a espesores de 1 o 2 mm.

En el caso de pretender espesores grandes de adhesivo, la forma de conseguirlo es adicionando mayor cantidad de adhesivo en las superficies a unir y presionando suavemente después, hasta conseguir que la capa de adhesivo quede repartida uniformemente en toda la región de unión. La cantidad de adhesivo que hay que adicionar en estos casos es proporcional al espesor deseado.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el fallo se ha producido en todos los casos por cohesión, lo que indica la obtención de una buena adhesión metal-adhesivo.

2.1.2.- Dificultad para conseguir uniformidad de espesor de adhesivo.

Una dificultad que ha habido que superar ha sido el conseguir la máxima uniformidad posible en todas las uniones realizadas, dado que se contaba primero con la dificultad propia de aplicar el adhesivo y después que cada adhesivo presentaba cualidades de

aplicación diferentes, porque unos son mas fluidos y otros mas pastosos, unos necesitan la aplicación previa de un activador en determinadas superficies y otros no, unos son monocomponentes y otros bicomponentes, unos tienen un tiempo de curado rápido y otros muy lento.

Para resolver esta dificultad inicial se han realizado bastantes ensayos preliminares con estos adhesivos y con otros de características similares, tales como el KÖRAPUR 140 que es del tipo poliuretano monocomponente, el cual se aplica con un acondicionador de superficies denominado KÖRABOND HG 81, el adhesivo KÖRAPOX 558, que es del tipo Epoxi bicomponente, el adhesivo LOCTITE 3295, que es del tipo Acrílico bicomponente, el adhesivo LOCTITE 5900, que es del tipo Silicona monocomponente, el adhesivo LOCTITE 9466, que es del tipo Epoxi bicomponente.

2.1.3.- Desplazamientos totales en función del espesor de adhesivo.

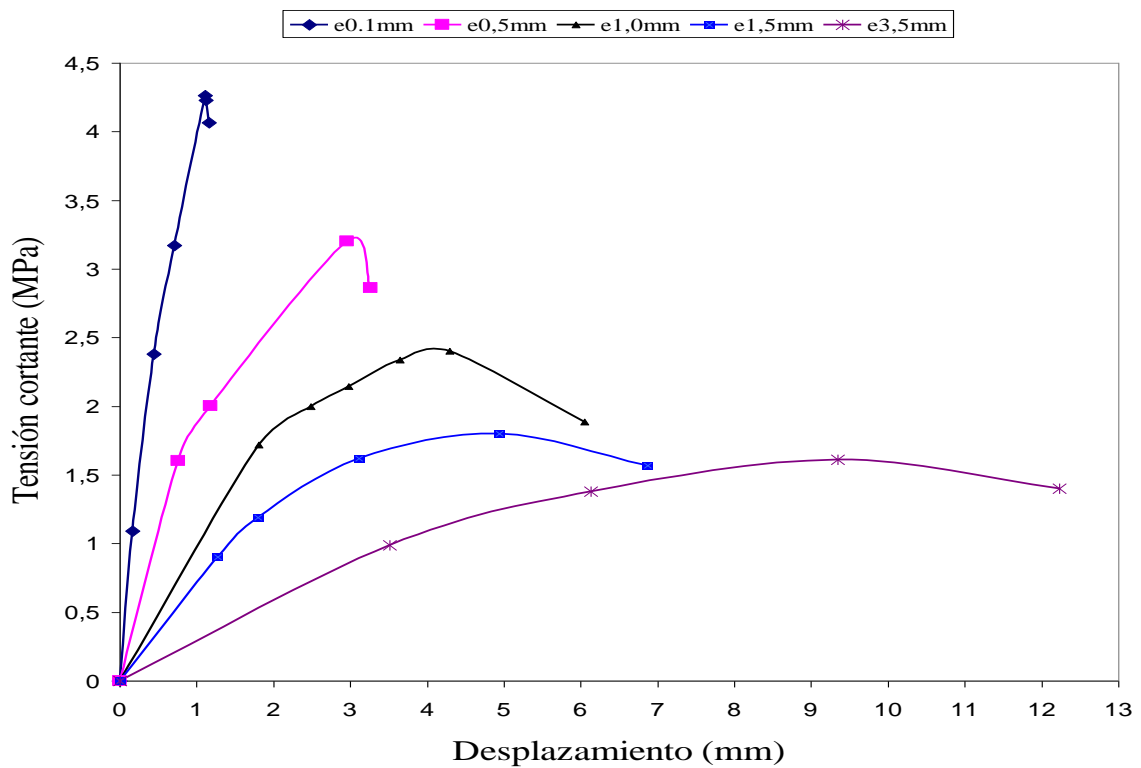


Figura 109. Curvas tensión-desplazamiento para probetas con diferente espesor de adhesivo

2.1.4.- Desplazamientos totales en función de la relación entre el Desplazamiento total y el espesor de adhesivo.

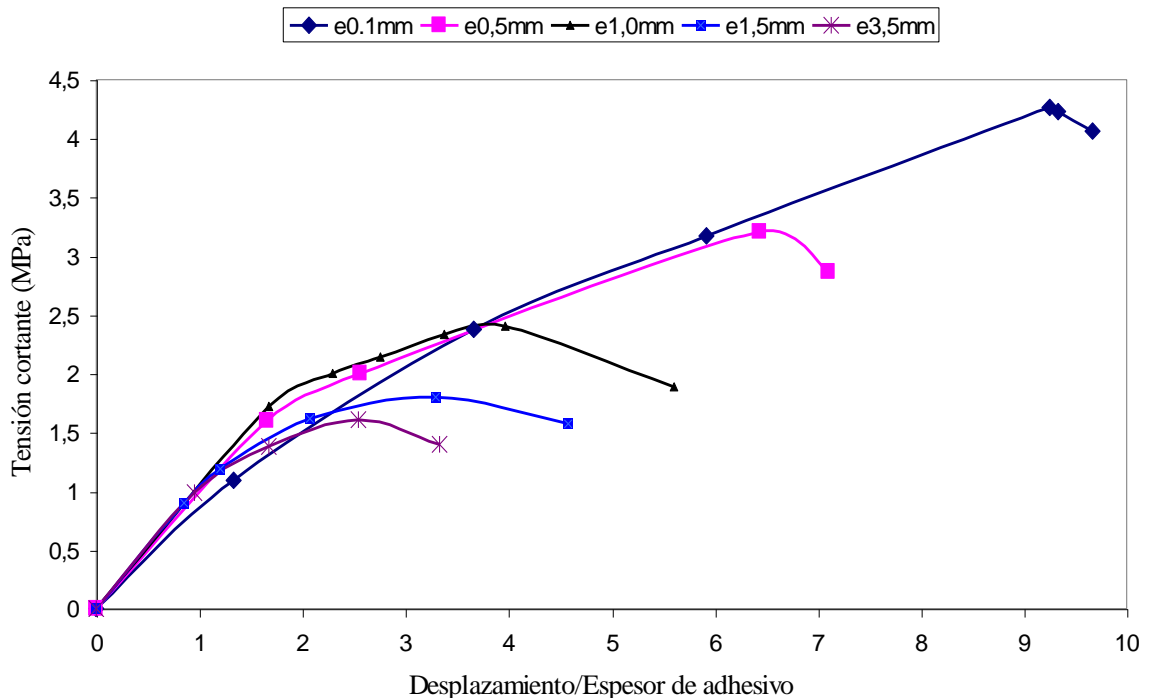


Figura 110. Curvas tensión-desplazamiento/espesor de adhesivo, para probetas con diferente espesor de adhesivo

2.1.5.- Aprendizajes conseguidos respecto al espesor de adhesivo.

La resistencia a cortadura de uniones a solape, realizadas con adhesivos de poliuretano varía notablemente en función del espesor de adhesivo utilizado (Fig. 107). Cuanto menor es el espesor del adhesivo mayor resistencia mecánica se obtiene, descendiendo ésta a medida que aumenta el espesor.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el efecto de capa delgada es muy destacado con espesores de adhesivo inferiores a 0,5 mm. A espesores superiores, al ser un adhesivo flexible, además de cortadura van aumentando las fuerzas de pelado, lo que hace que la resistencia del adhesivo vaya descendiendo de forma gradual.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el fallo se ha producido en todos los casos por cohesión, lo que indica la obtención de una buena adhesión metal-adhesivo.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el desplazamiento total a rotura presenta un comportamiento inverso al de resistencia máxima (Fig. 109), obteniéndose

mayores desplazamientos cuando los valores de resistencia máxima son menores, lo cual ocurre con espesores pequeños.

Sin embargo, los desplazamientos relativos (con respecto al espesor de adhesivo) presentan un comportamiento proporcional a la resistencia máxima (Fig. 110), obteniéndose menores desplazamientos relativos (con respecto al espesor de adhesivo) con los mayores espesores de adhesivo.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, es importante tener en cuenta en el diseño de uniones con adhesivos, la correlación observada entre resistencia y desplazamiento, dando prioridad en cada caso al parámetro más significativo. Este trabajo pretende ayudar a una correcta selección del espesor de adhesivo a utilizar.

2.2.- Tipo de superficie.

El tipo de superficie es una variable que se pretende estudiar, por eso se han elegido los siguientes tipos de superficies, blanca, lijada, galvanizada y prepintada.

En el tipo de superficie influyen varios factores, entre los cuales se encuentra la energía superficial del material que se va a unir. Es una condición necesaria para que se produzca la adhesión que el sustrato se deje mojar por el adhesivo. Y para que esta condición se cumpla se requiere que la tensión superficial del sólido sea superior a la del adhesivo. Por eso unos adhesivos pueden actuar muy bien en una superficie y mal en otras, y también una misma superficie se comporta de forma distinta con los distintos adhesivos. Esto es lo que ha observado en el análisis de los resultados obtenidos.

Los sustratos que tienen su tensión superficial más alta son los óxidos metálicos, seguidos de los materiales acrílicos, seguidos de los PVC, luego estarían los de polietileno, los de silicona y por último con una tensión superficial muy baja las siliconas. Dentro de los adhesivos ordenados de mayor a menor tensión superficial estarían los siguientes: Resina fenólica, los de urea-formaldehído, los de fenol-resorcinol, los de caseína, los de resina epoxi, los de látex de poliacetato de vinilo, los de nitrocelulosa.

Cuando las fuerzas de adhesión no son suficientes, se pueden mejorar generalmente por dos métodos:

- a) Mediante tratamientos superficiales del sustrato. En nuestro caso que ha realizado un lijado de superficie para ver la mejora que esto produce.
- b) Mediante la adición de promotores de la adhesión al adhesivo. En nuestro caso se ha realizado esto con la superficie galvanizada, que es la que peor capacidad de unión presenta. El promotor empleado aquí ha sido el SiKa-Primer 204.

2.3.- Rugosidad de la superficie.

La rugosidad de la superficie es una variable más a tener en cuenta. Cada superficie lleva una rugosidad típica, la cual suele ser distinta de unas superficies a otras. Dentro de un mismo tipo de superficie de las que se han estudiado, la rugosidad puede decirse que es la misma pues su variación es mínima de unas probetas a otras con el mismo tipo de superficie.

Una rugosidad alta mejora en general la capacidad de adhesión, aunque cuando la rugosidad se hace excesivamente alta no favorece la adhesión más bien la disminuye.

En este parámetro podría ampliarse la investigación utilizando una misma superficie, por ejemplo la lijada con diferentes tipos de lijas, lo cual daría lugar a diferentes rugosidades.

2.4.- Tipo de adhesivo.

2.4.1.- Consideraciones generales.

El tipo de adhesivo utilizado es una variable muy influyente en los resultados obtenidos. Hay que elegir siempre el más adecuado para cada tipo de superficie, teniendo siempre en cuenta otras variables, como pueden ser el tipo de aplicación de la unión, el método de unión, las condiciones de trabajo de la unión, etc. La exposición de los resultados aquí obtenidos servirán para conocer mejor qué adhesivos de entre los cuatro elegidos son más idóneos con cada tipo de superficie.

Los cuatro tipos de adhesivos elegidos han sido:

- 1) Cianoacrilato.
- 2) Epoxi.
- 3) Poliuretano.
- 4) Silano Modificado.

2.4.2.- Aprendizajes conseguidos.

Se ha aprendido mucho sobre las cualidades físicas de diferentes tipos de adhesivos, cómo y cuándo deben emplearse, influencia que tienen los diferentes factores, la gran diferencia que existe en los tiempos de curado de unos adhesivos a otros, las capacidades de resistencia y de alargamiento de cada tipo de adhesivos.

También se ha aprendido que el tipo de adhesivo, epoxi, poliuretano, cianoacrilato, o silicona no condiciona necesariamente la resistencia final, lo que si condicionan son los alargamientos finales que tiene cada uno.

Que los adhesivos de tipo CIANOACRILATO son de los que proporcionan mayores resistencias mecánicas a las uniones.

2.5.- Tipo de unión mecánica.

Cada tipo de unión mecánica tiene unas características propias de unión que dependen del tipo elegido. En nuestro caso se han elegido dos tipos distintos, uno mediante remache convencional y el otro mediante el método de clinchado. El primero se ejecuta realizando un agujero en las chapas a unir, introduciendo posteriormente el remache en dicho agujero y finalmente abocardando los extremos mediante un dispositivo denominado pistola de remachar. El segundo (clinchado), se realiza colocando los substratos a unir uno sobre otro y finalmente presionando con un punzón de clinchado sobre ambas, este punzón no llega a perforar los substratos sino que los deforma creando de esta manera una unión rígida entre ambos.

2.6.- Tipo de unión mixta.

2.6.1.- Consideraciones generales.

Los tipos de uniones mixtas que se han realizado son las realizadas entre cada uno de los adhesivos elegidos y cada una de las uniones mecánicas. Las características de cada unión mixta dependen fundamentalmente de las características de cada unión simple que la conforma.

2.6.2.- Aprendizajes conseguidos.

Que el efecto de las uniones mixtas con adhesivos no aumenta demasiado la resistencia de la unión, incluso en algunos casos puede llegar a disminuirlas.

2.7.- Tiempo de curado del adhesivo.

El tiempo de curado del adhesivo es el tiempo que necesita el adhesivo para adquirir su resistencia máxima. El tiempo de curado es muy variable de unos adhesivos a otros y depende también de las condiciones ambientales y de otras variables que favorecen el curado, como pueden ser la temperatura o la humedad.

De cualquier forma todos los adhesivos requieren un tiempo de curado desde que se aplica en la superficie hasta que alcanza su resistencia máxima, que va desde unos minutos los más rápidos hasta más de una semana los más lentos. Entre los que se han seleccionado aquí los hay de ambos tipos. El cianoacrilato 480 es de los que su tiempo de curado es de unos minutos, y el poliuretano 260 es el que tiene tiempos más largos, del orden de varios días. Para uniformizar esta variables, lo que se ha hecho es realizar todos los ensayos al cabo de una semana después de la aplicación del adhesivo, con esto se garantiza que todas las uniones habían alcanzado su resistencia máxima en el momento del ensayo.

2.8.- Realización de la unión en fresco o en seco.

Este factor se refiere sólo a las uniones híbridas, o sea aquellas que se realizan mediante unión adhesiva más unión mecánica. Se refiere a realizar la unión mecánica con el adhesivo recién aplicado, de forma inmediata, o después de curado. Además de los dos tipos de unión mecánica utilizados, con remache y con autorremache, el segundo no se puede hacer con el adhesivo curado, porque no se podría realizar la unión, sin embargo en la unión con remache clásico sí que es posible, pues con el adhesivo ya curado se le puede realizar el agujero correspondiente a la unión y luego acoplar el remache y este es el método que se ha realizado.

2.9.- Espesor de las chapas a unir.

2.9.1.- Consideraciones generales.

El espesor de las chapas a unir no tiene influencia en la calidad de la unión ni en las características de resistencia teórica de la del adhesivo, sin embargo en el tipo de ensayos que aquí se han realizado el espesor de la chapa a unir tiene influencia en los resultados de tensión obtenidos, debido a que cuanto mayor es el espesor mayor es el momento flector que actúa en la unión (Fig. 109), generando este un aumento de tensión adicional en la unión que facilita la rotura con cargas inferiores.

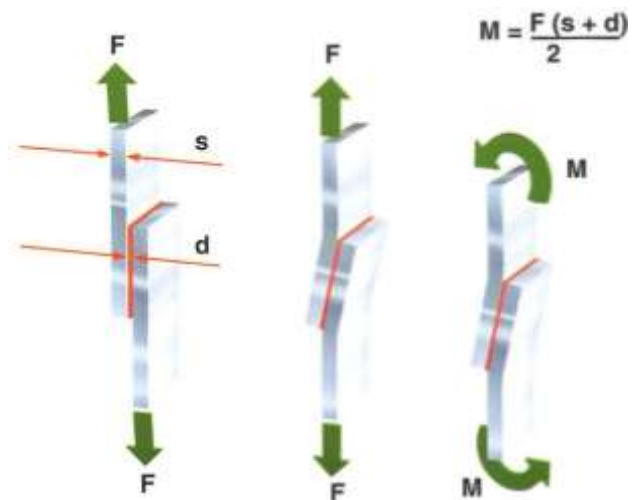


Figura 109. Momento flector generado en las probetas de unión a solape durante el ensayo de carga a tracción.

Por este motivo y para evitar en lo posible el efecto espesor de chapa en los resultados obtenidos se han elegido los espesores de chapa lo mas parecidos posible, todos de 1.5 mm, excepto el de chapa prepintada que se ha elegido menor, de 0.8 mm porque el de 1.5 mm no tiene casi ninguna aplicación industrial.

2.9.2.- Aprendizajes conseguidos.

Que la unión adhesiva puede tener una resistencia superior a la del substrato, y que eso depende del espesor del substrato y del tamaño de la superficie de unión, por ejemplo una longitud de solape mayor aumenta la resistencia de la unión consiguiendo si es el caso llegar a romper el substrato antes que la unión. También aumentando el ancho de la unión se aumenta la carga que es capaz de soportar, pudiendo de esta manera llegar a romper el substrato.

Por eso cuando se realiza una unión adhesiva hay que tener en cuenta estos factores, y no sólo la resistencia teórica del adhesivo, de forma que se deben diseñar las uniones con el conocimiento de todos estos factores para conseguir el equilibrio entre el adhesivo y el substrato, sobre todo para no aplicar mas adhesivo del necesario, ni dejar la unión tan débil que se rompiera a cargas muy inferiores a la del substrato.

3.- CALIDAD DE DATOS OBTENIDOS.

3.1.- Introducción.

Para asegurar la calidad de los datos se han tomado las medidas necesarias para ello. Por eso se han medido todas las dimensiones de todas las probetas y se han registrado sus valores en las tablas de datos y resultados.

Dentro de las variables propias del proceso de pegado como son la longitud de solape y el espesor de adhesivo, se comprueba que puede haber variaciones importantes de unas probetas a otras. Para disminuir este efecto de variación lo que se ha hecho ha sido desechar aquellas probetas que presentaban valores muy diferentes a la media. No obstante se hicieron bastantes probetas de prueba de forma que al principio había que desechar bastantes y al final con la experiencia el número de probetas desechadas fue muy pequeño pues se consiguió buena repetibilidad de los ensayos.

Para disminuir el efecto de las pequeñas variaciones en las dimensiones de las probetas, lo que se hace es calcular en cada probeta el valor de la tensión cortante media en el momento de la rotura (TR), y este valor es el que luego se utilizará para el análisis, después de hacer la media de las 6 probetas de que consta cada ensayo.

Después de anotar el valor medio de las tensiones de rotura de las 6 probetas, se ha estudiado también la desviación de cada valor de TR, con respecto al valor medio que es el valor que después se utilizará para el análisis. Es decir se ha calculado la desviación típica de los 6 datos, valor que en caso de ser muy grande nos indicaría que hay gran variación de datos, y que por lo tanto el valor medio no tiene un gran valor representativo. Para poder comparar este parámetro entre diferentes ensayos con diferentes adhesivos o con diferentes sistemas de unión, se ha calculado también el coeficiente de variación (CV), el cual representa el porcentaje de la desviación típica con respecto a la media, y se da en tanto por ciento.

3.2.- Análisis general de los coeficientes de variación (CV).

Los coeficientes de variación representan la desviación de resultados obtenidos entre las diferentes probetas de un mismo tipo de unión, se expresan en tanto por ciento (Fig. 110).

Los valores de los coeficientes de variación se han representado en la Tabla 6 y en ella se han clasificado en tres grupos según la magnitud de su valor, BAJO, MEDIO y ALTO.

Como resumen puede decirse lo siguiente:

- a) Que las uniones que tienen mayor dispersión de resultados son las de tipo CIANOACRILATO y las de la unión CLINCHADO. Y que esto se arregla bastante cuando se realiza la unión mixta entre ambos.
- b) Que en general la unión mixta da menores variaciones que cada unión sola.
- c) Que la chapa GALVANIZADA es la que en la mayoría de los casos da mayores variaciones.

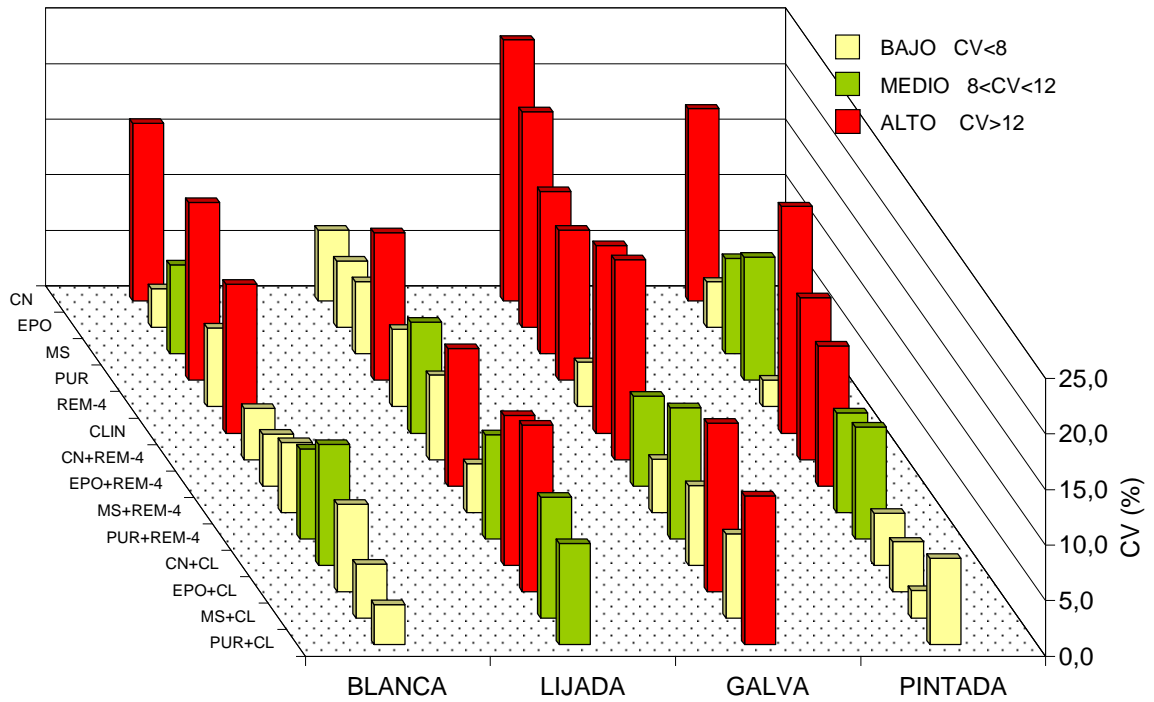


Figura 110. Coeficientes de variación (CV) de todas las uniones.

Tabla 6. Coeficientes de variación (CV) de todas las uniones.

| COEFICIENTES CV (DESV. DE RESULTADOS) (%) | | | | | |
|---|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN | 16,0 | 6,4 | 23,5 | 17,3 | 15,8 |
| EPO | 3,5 | 6,0 | 19,4 | 4,1 | 8,3 |
| MS | 8,0 | 6,5 | 14,6 | 8,6 | 9,4 |
| PUR | 16,0 | 13,3 | 13,5 | 11,1 | 13,5 |
| REM-4 | 7,1 | 7,0 | 4,0 | 2,4 | 5,1 |
| CLIN | 13,4 | 10,0 | 16,9 | 20,4 | 15,2 |
| CN+REM-4 | 4,6 | 7,6 | 18,0 | 14,6 | 11,2 |
| EPO+REM-4 | 4,7 | 12,4 | 8,1 | 12,6 | 9,5 |
| MS+REM-4 | 6,3 | 4,4 | 4,8 | 9,0 | 6,1 |
| PUR+REM-4 | 8,1 | 9,4 | 11,8 | 10,1 | 9,9 |
| CN+CL | 10,9 | 13,5 | 7,2 | 4,7 | 9,1 |
| EPO+CL | 7,9 | 15,0 | 15,2 | 4,5 | 10,7 |
| MS+CL | 4,9 | 10,9 | 7,6 | 2,5 | 6,5 |
| PUR+CL | 3,6 | 9,1 | 13,4 | 7,8 | 8,5 |
| Promedio | 8,2 | 9,4 | 12,7 | 9,3 | 9,9 |

| | |
|-------|-------------|
| BAJO | CV < 8 |
| MEDIO | 8 < CV < 12 |
| ALTO | CV > 12 |

3.3.- Análisis de valores medios de CV en cada sustrato.

En la Fig. 111 se han representado los valores medios de los coeficientes de variación (CV) de cada sustrato.

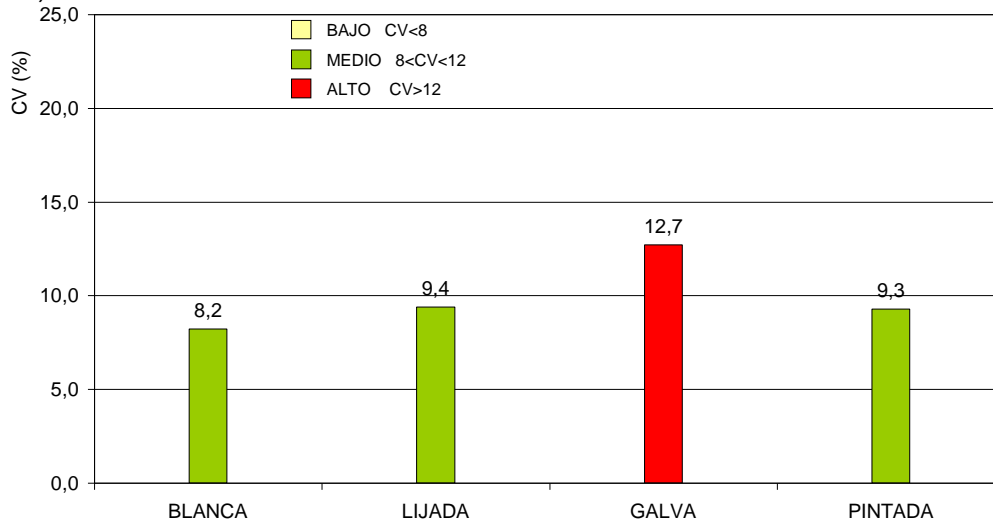


Figura 111. Coeficientes de variación según el tipo de sustrato.

De la Fig. 111 se deduce lo siguiente:

- El tipo de sustrato que tiene mayor coeficiente de variación es el de tipo GALVANIZADA, los demás sustratos tienen valores medios de coeficiente de variación.

3.4.- Análisis de valores medios de CV en cada unión.

En la Fig. 112 se han representado los valores medios de los coeficientes de variación (CV) de cada tipo de unión.

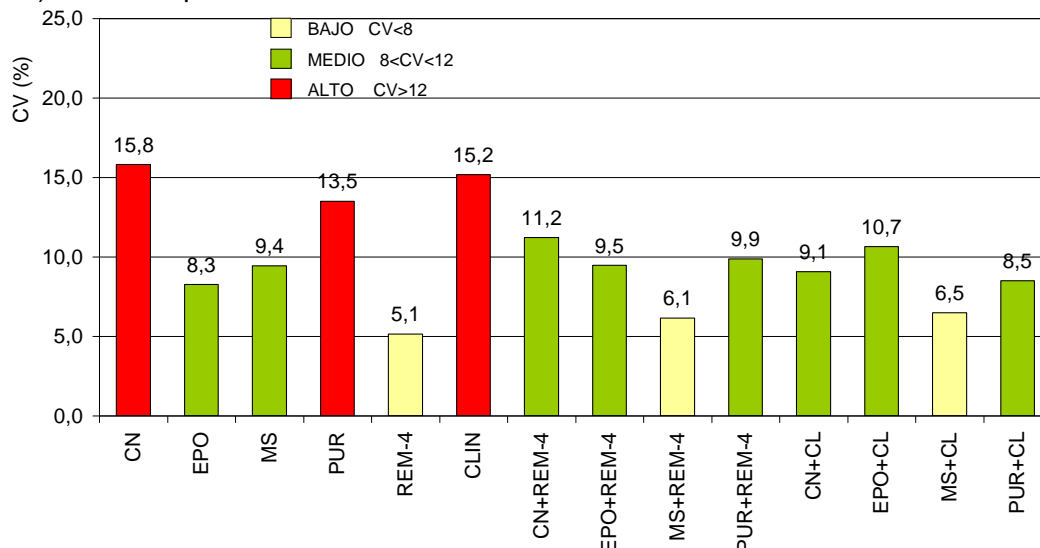


Figura 112. Coeficientes de variación según el tipo de unión.

De la Fig. 112 se deduce lo siguiente:

- Hay tres tipos de unión que llevan asociados valores altos en los coeficientes de variación, son CIANOACRILATO, CLINCHADO, y POLIURETANO.

b) Hay tres tipos de unión que llevan asociados valores bajos en los coeficientes de variación, son MS+REMACHE, MS+CLINCHADO, y REMACHE.

c) La mayoría de los tipos de unión presentan valores medios.

3.5.- Influencia de la unión mecánica (clinchado y remache) en los coeficientes de variación de las uniones mixtas.

3.5.1.- Respecto del CV del adhesivo.

Al añadir la unión mecánica a la del adhesivo se modifica el coeficiente de variación (CV) de la nueva unión. En la mayoría de los casos disminuye el valor del mismo (Fig. 113 y Tabla 7, valores inferiores a 100 indica que disminuye el CV de la unión mixta). Lo cual indica que es generalmente positivo en este sentido realizar la unión mixta porque disminuye el coeficiente de variación. Sin embargo en algunos casos aumenta el CV con relación a lo que tenía el adhesivo por sí solo, lo cual ocurre en con el adhesivo de tipo epoxi.

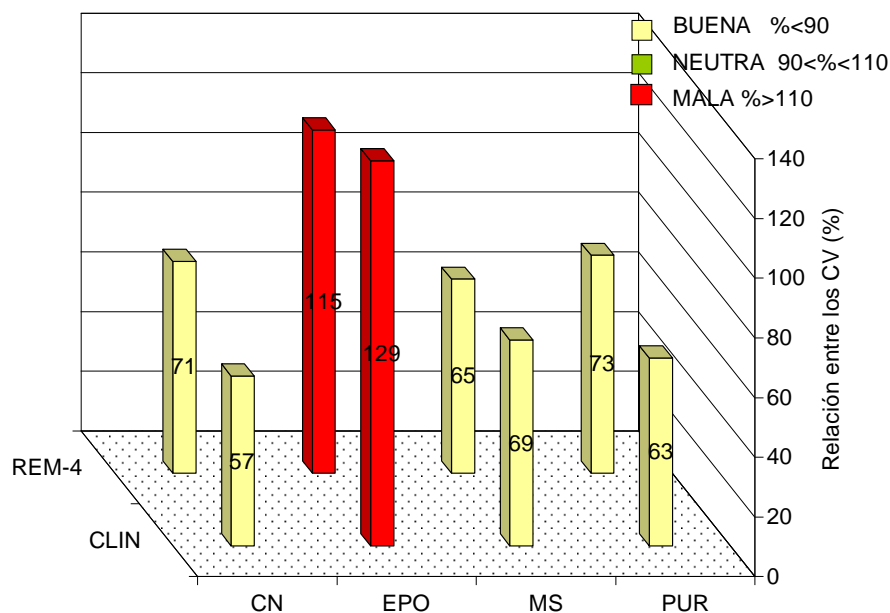


Figura 113. Influencia del remache y el clinchado en la modificación de los coeficientes de variación con respecto a los del adhesivo.

Tabla 7. Influencia del remache y el clinchado en la modificación de los coeficientes de variación con respecto a los del adhesivo.

| Relación entre el CV de la unión mixta y el CV del adhesivo (%) | | | |
|---|------|-------|----------|
| | CLIN | REM-4 | Promedio |
| CN | 57 | 71 | 64 |
| EPO | 129 | 115 | 122 |
| MS | 69 | 65 | 67 |
| PUR | 63 | 73 | 68 |
| Promedio | 80 | 81 | 80 |

| | |
|------------|-----------|
| Buena | % <90 |
| Intermedia | 90 <%<110 |
| Mala | % > 110 |

3.5.2.- Respecto del valor medio del CV del adhesivo y de la unión mecánica.

Si se compara con el valor medio de ambas uniones por separado, o sea la unión adhesiva y al unión mecánica, entonces los resultados que se obtienen se muestran en la Fig. 114 y Tabla 8.

Tabla 8. Influencia del remache y el clinchado en la modificación de los coeficientes de variación con respecto a los valores medios de ambas uniones de forma independiente.

| Relación entre el CV de la unión mixta y el CV medio de la unión con adhesivo y la unión mecánica independientes (%) | | | |
|--|------|-------|----------|
| | CLIN | REM-4 | Promedio |
| CN | 59 | 107 | 83 |
| EPO | 91 | 141 | 116 |
| MS | 53 | 84 | 68 |
| PUR | 59 | 106 | 83 |
| Promedio | 65 | 110 | 87 |

| | |
|------------|------------|
| Buena | % <90 |
| Intermedia | 90 <% <110 |
| Mala | % > 110 |

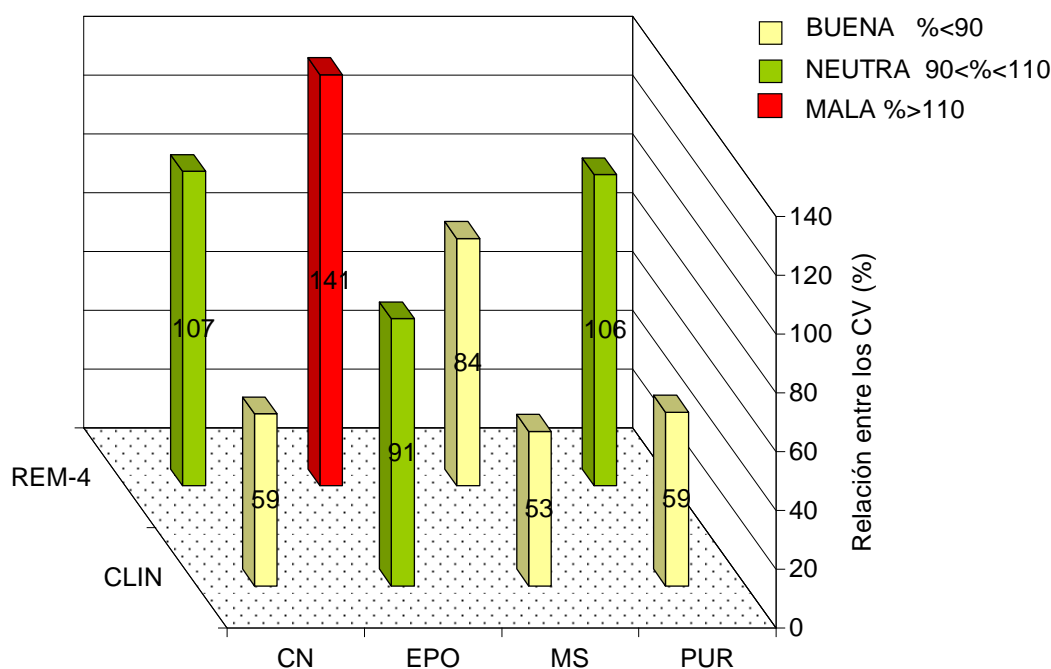


Figura 114. Influencia del remache y el clinchado en la modificación de los coeficientes de variación con respecto a los valores medios de ambas uniones de forma independiente.

3.6.- Aprendizajes conseguidos sobre coeficientes de variación.

La dispersión de valores de resistencia a cortadura se ve poco influenciada por las **condiciones superficiales** (Tab. 6). Esto se comprueba por la poca diferencia en los coeficientes de dispersión entre unas superficies y otras. No obstante la superficie que peor se comporta es la GALVANIZADA, ya que presente los valores más altos de dispersión. En el lado opuesto la que tiene menores valores de dispersión es la superficie BLANCA.

La dispersión de valores de resistencia a cortadura está muy influenciada por el **tipo de unión** que se realiza (Tab. 6). Las uniones realizadas con CN son las que peor se comportan, con valores de dispersión muy altos. También tienen valores elevados las uniones realizadas con el método mecánico de CLINCHADO y las realizadas con PUR. Por otro lado las mejores uniones por tener los valores más pequeños de dispersión, son las realizadas con REMACHE. También son buenas uniones con valores bastante bajos las uniones realizadas con unión mixta MS+REM-4, y la unión mixta MS+CL.

La dispersión de valores de resistencia a cortadura de las uniones mixtas en la mayoría de los casos es mejor que el del propio adhesivo (Tab. 7). Sin embargo no se puede afirmar esto para todos los adhesivos, pues el adhesivo EPOXI, resulta que cuando se realizan uniones mixtas con él, empeora la dispersión de la unión, aumenta el coeficiente de variación. El adhesivo que mejor comportamiento tiene porque disminuye más el coeficiente al hacer la unión mixta es el CN, seguido del MS y del PUR.

La dispersión de valores de resistencia a cortadura mejora (disminuye) al realizar la unión mixta, con **respecto al valor medio entre el obtenido con la unión simple mecánica de tipo clinchado** y la unión simple adhesiva por separado (Tab. 8). El adhesivo con el que menos mejora es con el de tipo EPOXI. No ocurre lo mismo cuando la **unión mixta se realiza con remache**, en este caso se puede decir que en general no se altera el coeficiente de dispersión con respecto al valor medio realizando las uniones por separado, con la excepción del adhesivo EPOXI, que en este caso no sólo no disminuye sino que aumenta bastante el coeficiente de dispersión.

4.- RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS UNIONES.

4.1.- Introducción.

Los resultados que se han utilizado para el análisis de resistencias se muestran en la Fig. 115.

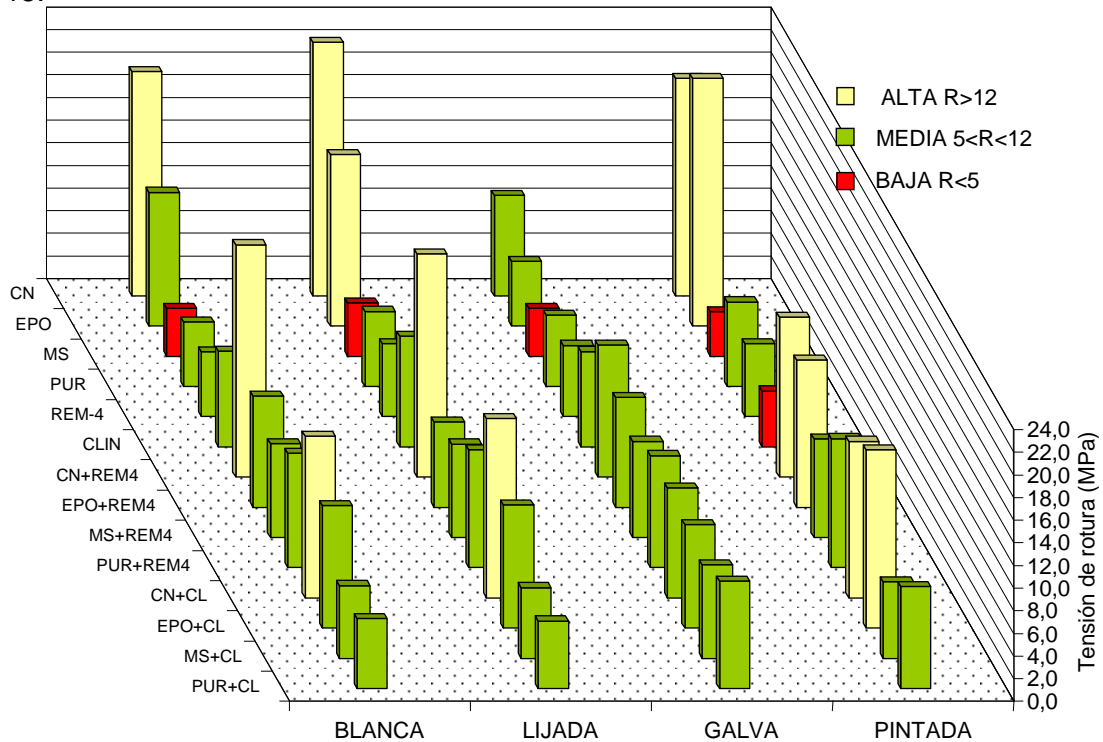


Figura 115. Resistencia mecánica obtenida en cada tipo de unión.

Estos son los valores de la tensión cortante media obtenida en cada ensayo. Se han clasificado en 4 grupos según el tipo de superficie y 14 sistemas de unión diferentes para cada superficie.

4.2.- Análisis según la magnitud de resistencia.

Los valores de resistencia se han clasificado en tres categorías, resistencias ALTA, MEDIA Y BAJA (Fig. 115 y Tabla 9).

Del estudio de la Tabla 9 se deduce lo siguiente:

- La mejor resistencia se consigue con adhesivo CN en la superficie lijada; su valor es 22.4 N/mm^2 . Le sigue muy próximo el adhesivo EPO en la superficie pintada; su valor es 21.9 N/mm^2 .
- Los valores mas bajos de resistencia se obtienen con adhesivo MS en superficie pintada. Su valor es 4 N/mm^2 .
- El adhesivo MS es el de menor resistencia en todas las superficies.
- A los adhesivos CN y EPO les influye mucho el tipo de superficie.
- Al adhesivo PUR le influye poco el tipo de superficie.
- Al adhesivo MS prácticamente no le influye el tipo de superficie.

Tabla 9. Resistencia mecánica obtenida en cada tipo de unión y clasificación en baja, media, alta.

| RESISTENCIA (MPa) | | | | | |
|-------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN | 19,8 | 22,4 | 8,9 | 19,2 | 17,6 |
| EPO | 11,8 | 15,2 | 5,7 | 21,9 | 13,6 |
| MS | 4,2 | 4,7 | 4,2 | 4,0 | 4,3 |
| PUR | 5,7 | 6,6 | 6,3 | 7,5 | 6,5 |
| REM-4 | 5,7 | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,2 |
| CLIN | 8,4 | 9,8 | 8,4 | 4,9 | 7,9 |
| CN+REM4 | 20,5 | 19,7 | 11,7 | 14,1 | 16,5 |
| EPO+REM4 | 9,8 | 7,5 | 9,7 | 13,0 | 10,0 |
| MS+REM4 | 8,3 | 8,2 | 8,5 | 8,7 | 8,4 |
| PUR+REM4 | 10,1 | 10,4 | 9,9 | 11,4 | 10,5 |
| CN+CL | 14,3 | 15,9 | 9,7 | 13,8 | 13,4 |
| EPO+CL | 10,8 | 10,9 | 9,1 | 15,7 | 11,6 |
| MS+CL | 6,4 | 6,2 | 8,2 | 6,8 | 6,9 |
| PUR+CL | 6,2 | 6,0 | 9,5 | 9,0 | 7,7 |
| Promedio | 10,2 | 10,7 | 8,3 | 11,2 | 10,1 |

| | |
|-------|--------|
| ALTA | R>12 |
| MEDIA | 5<R<12 |
| BAJA | R<5 |

- g. La superficie GALVANIZADA es la que presenta mayor uniformidad de resultados.
- h. La mayoría de las uniones se encuentran en el grupo que va de 5 a 10 N/mm².
- i. La unión de CLINCHADO con chapa PINTADA, está en la franja más baja de resultados.

4.3.- Análisis de resistencia desde el punto de vista del tipo de superficie.

Los anteriores valores de resistencia, desglosados por tipo de sustrato quedan de la siguiente manera:

1. SUPERFICIE BLANCA

Los valores desglosados por tipo de superficie BLANCA, se muestran en la Fig. 116. De los cuales se deduce lo siguiente:

- a. Los mejores resultados se obtienen con el adhesivo CN + REM-4, 20.5 N/mm².
- b. La unión con adhesivo CN tiene una resistencia muy buena, casi igual que con remache, cuyo valor es 19.8 N/mm².
- c. Los peores resultados en cuanto a tensión cortante máxima le corresponde al adhesivo MS: 4.2 N/mm².

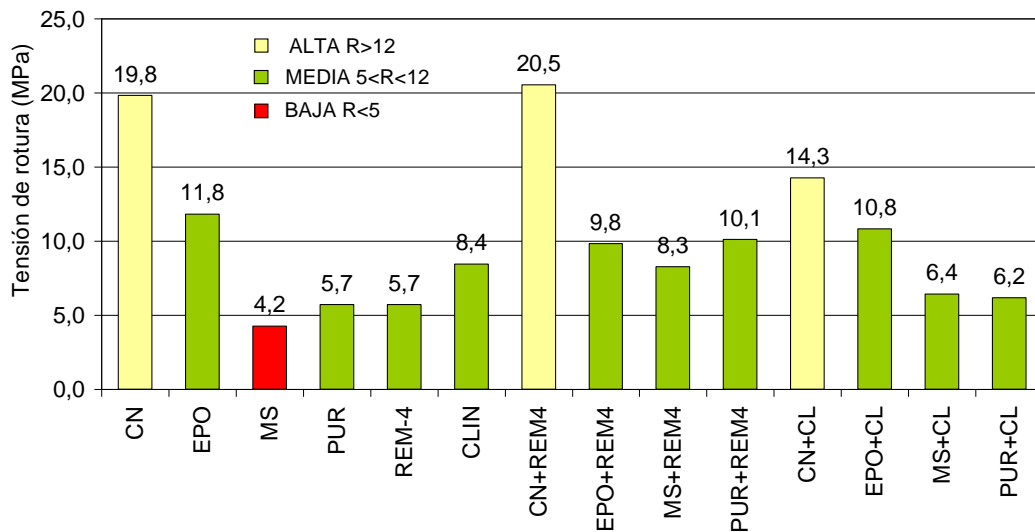


Figura 116. Tensiones de rotura medias en el sustrato BLANCA.

2. SUPERFICIE LIJADA

Los valores desglosados por tipo de superficie LIJADA, se muestran en la Fig. 117. De los cuales se deduce lo siguiente:

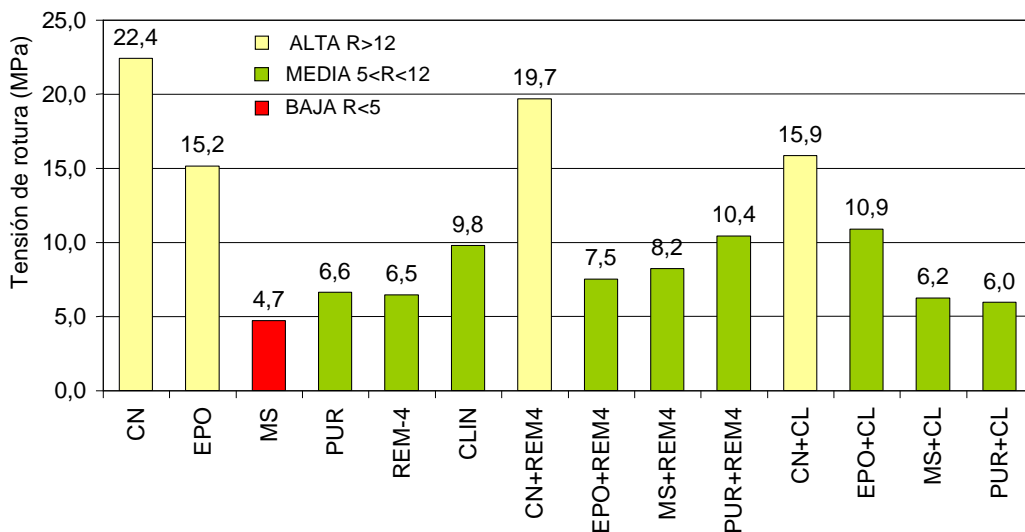


Figura 117. Tensiones de rotura medias en el sustrato LIJADA.

- Los mejores resultados se obtienen con el adhesivo CN, 22.4 N/mm².
- La unión con adhesivo CN+REM-4 tiene una resistencia muy buena, casi igual que con CN sólo, su valor es 19.69 N/mm².
- Los peores resultados en cuanto a tensión cortante máxima le corresponde al adhesivo MS: 4.7 N/mm².

3. SUPERFICIE GALVANIZADA

Los valores desglosados por tipo de superficie GALVANIZADA, se muestran en la Fig. 118. De los cuales se deduce lo siguiente:

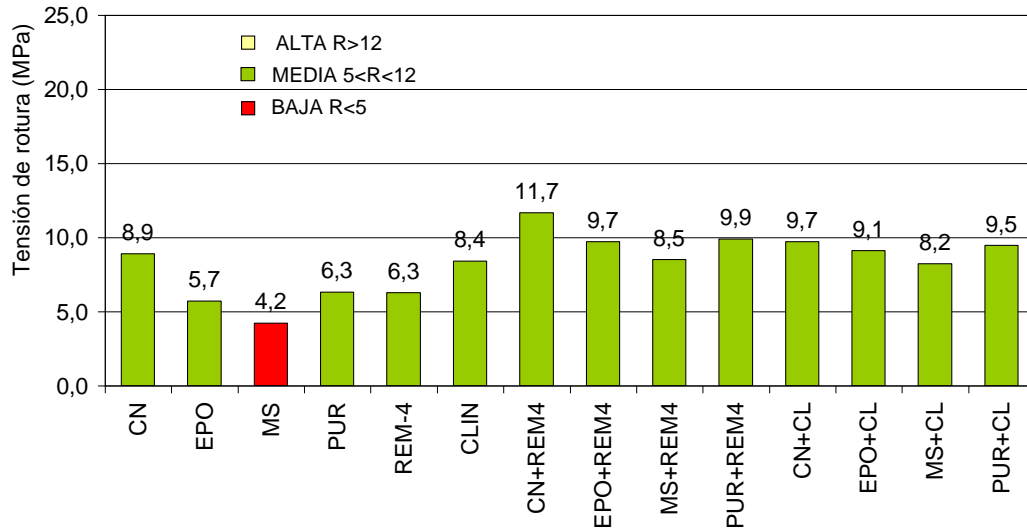


Figura 118. Tensiones de rotura medias en el sustrato GALVANIZADA.

- Los mejores resultados se obtienen con el adhesivo CN+REM-4, 11.67 N/mm².
- La unión con adhesivo PUR+REM-4 tiene una resistencia parecida, su valor es 9.9 N/mm².
- Los peores resultados en cuanto a tensión cortante máxima le corresponde al adhesivo MS, con 4.23 N/mm².

4. SUPERFICIE PINTADA

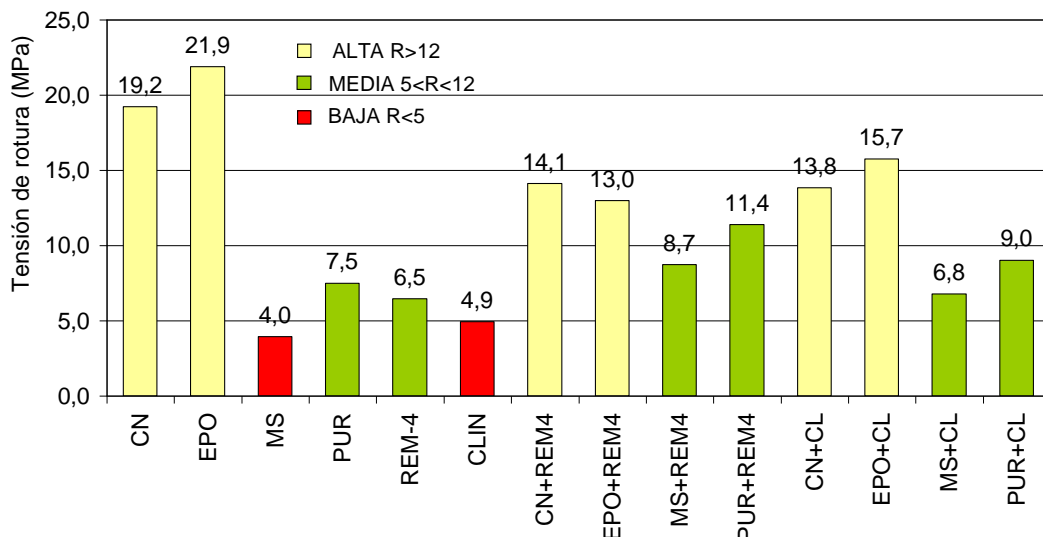


Figura 119. Tensiones de rotura medias en el sustrato PINTADA.

Los valores desglosados por tipo de superficie PINTADA, se muestran en la Fig. 119. De los cuales se deduce lo siguiente:

- a. Los mejores resultados se obtienen con el adhesivo EPO, 21.9 N/mm².
- b. La unión con adhesivo CN tiene una resistencia parecida, su valor es 19.2 N/mm².
- c. Los peores resultados en cuanto a tensión cortante máxima le corresponde al adhesivo MS, con 4 N/mm².

4.4.- Análisis de resistencia de los valores medios de cada unión.

De la Fig. 120 se deduce lo siguiente:

- a) Los adhesivos pertenecen cada uno a un grupo de resistencias, por orden de mayor a menor resistencia son CN, EPO, PUR y MS.
- b) Las uniones mecánicas pertenecen las dos al mismo grupo de resistencias al denominado BAJO, aunque el CLINCHADO, es un poco mayor que el REMACHE.

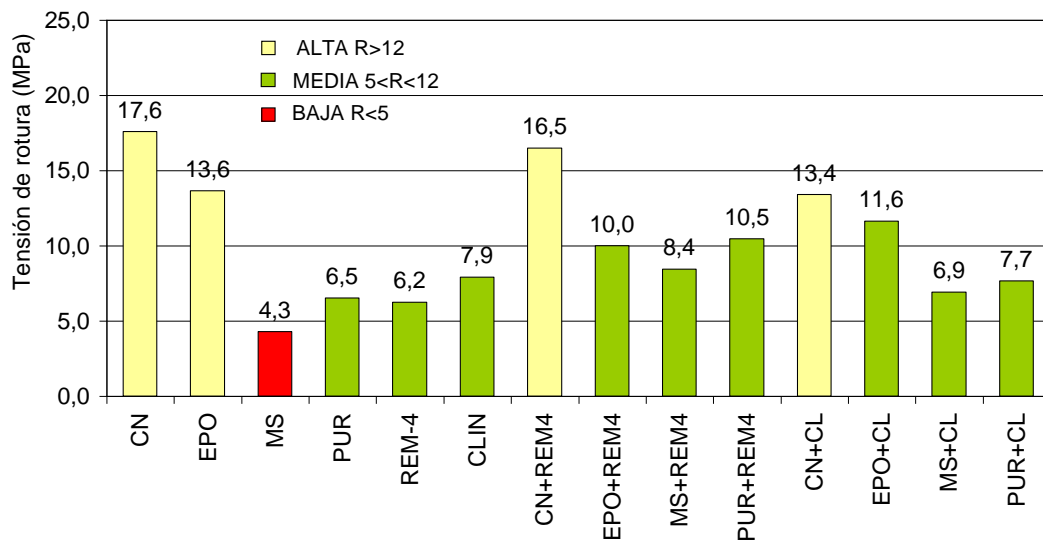


Figura 120. Valor medio de la tensión de rotura en cada tipo de unión.

- c) Destaca claramente cómo el adhesivo MS es el único del grupo mas bajo.
- d) Queda claro que el adhesivo CIANOACRILATO, sólo o con uniones mixtas es el que da mejores resultados.
- e) Se ve cómo las dos uniones mecánicas, el REMACHE y el CLINCHADO restan resistencia cuando se hace la unión mixta con CN y con EPO, y que suman cuando se hace con PUR y con MS.

4.5.- Análisis por valores medios de cada sustrato.

De la Fig. 121 se deduce lo siguiente:

- a) La influencia del tipo de sustrato es muy pequeña en la resistencia final de la unión.
- b) No obstante según los resultados obtenidos por orden de mayor a menor resistencia quedarían de la siguiente manera: PINTADA, LIJADA, BLANCA Y GALVANIZADA.

c) Si hay alguna que destaca por algo es la GALVANIZADA, por ser un poco inferior a las demás. Véase que las tres primeras están dentro de un subgrupo que podría haberse llamado 10-12, mientras que la GALVANIZADA se encuentra en el grupo 8-10.

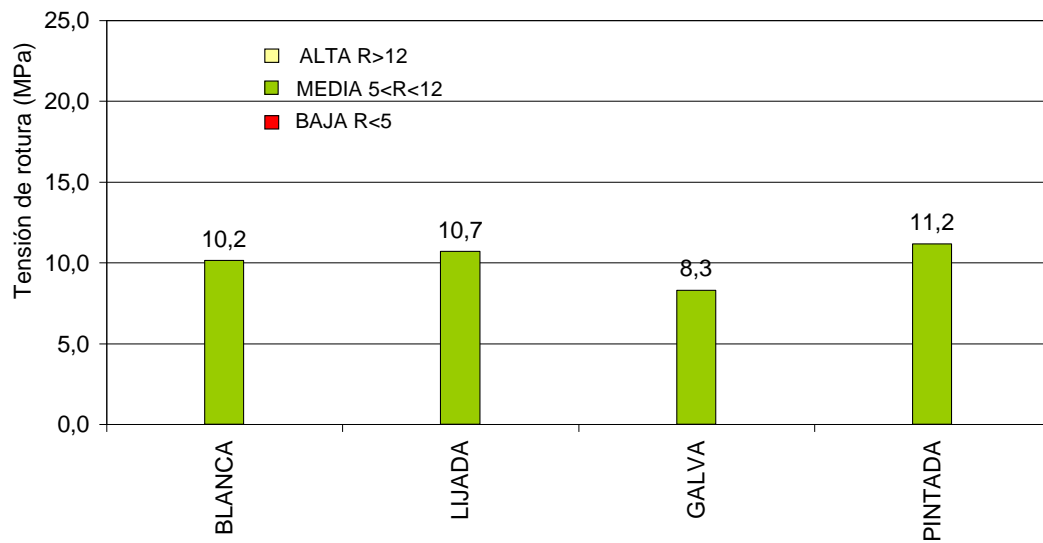


Figura 121. Valor medio de la tensión de rotura en cada tipo de sustrato.

4.6.- Influencia del adhesivo y el tipo de superficie.

Se ha realizado una clasificación atendiendo al valor de la resistencia obtenida con cada adhesivo y en cada sustrato, por ALTA, MEDIA, BAJA. (Fig. 122 y Tabla 10).

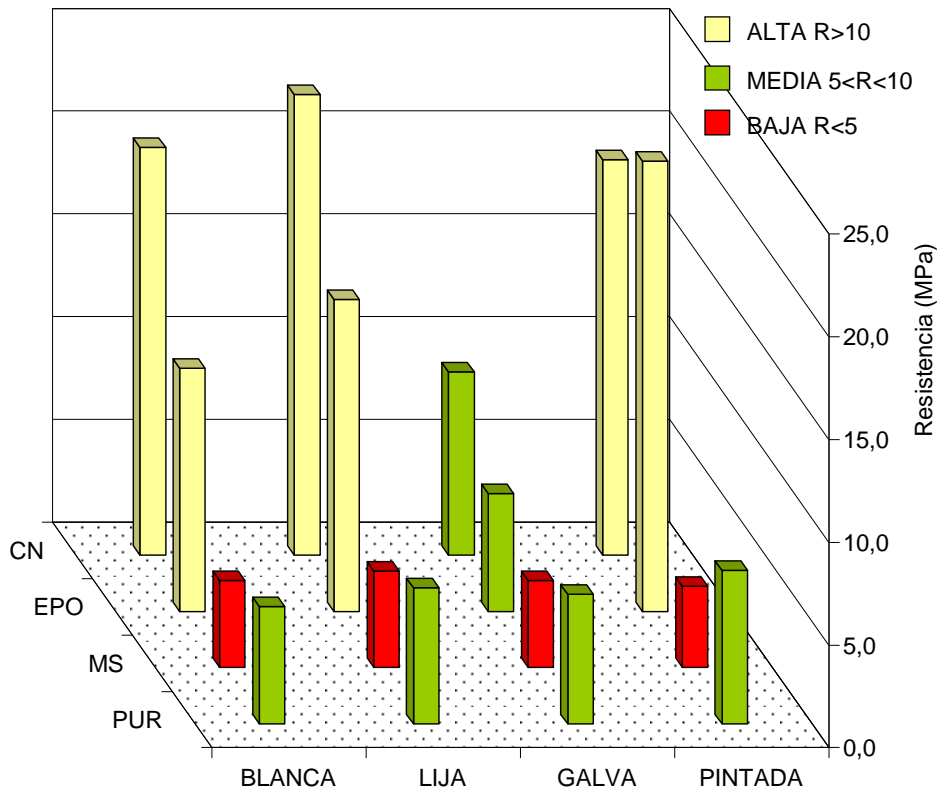


Figura 122. Influencia sobre la resistencia mecánica, de cada adhesivo en cada sustrato.

Tabla 10. Influencia sobre la resistencia mecánica, de cada adhesivo en cada sustrato.

| RESISTENCIA(R) (MPa) | | | | | |
|----------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN | 19,8 | 22,4 | 8,9 | 19,2 | 17,6 |
| EPO | 11,8 | 15,2 | 5,7 | 21,9 | 13,6 |
| MS | 4,2 | 4,7 | 4,2 | 4,0 | 4,3 |
| PUR | 5,7 | 6,6 | 6,3 | 7,5 | 6,5 |
| Promedio | 10,4 | 12,2 | 6,3 | 13,1 | 10,5 |

| | |
|-------|------------|
| ALTA | R > 10 |
| MEDIA | 5 < R < 10 |
| BAJA | R < 5 |

De la Tabla 10 se deduce lo siguiente:

1. En el adhesivo CIANOACRILATO (CN).
 - a. La mejor superficie es la Lijada, (22.4 N/mm²).
 - b. La peor superficie es la galvanizada, (8.9 N/mm²).
2. En el adhesivo EPOXI (EPO).
 - a. La mejor superficie es la pintada, (21.9 N/mm²).

- b. La peor superficie es la galvanizada, (5.7 N/mm²).
- 3. En el adhesivo SILANO MODIFICADO (MS).
 - a. La mejor superficie es la lijada, (4.7 N/mm²).
 - b. La peor superficie es la pintada, (4.0 N/mm²).
 - c. Se comporta prácticamente igual en todas las superficies.
- 4. En el adhesivo POLIURETANO (PUR).
 - a. La mejor superficie es la pintada, (7.5 N/mm²).
 - b. La peor superficie es la galvanizada, (5.7 N/mm²).
 - c. Hay poca diferencia de comportamiento entre unas superficies y otras.

Y de forma resumida se puede decir que:

- a) El peor sustrato corresponde al GALVANIZADO, y el mejor sería la PINTADA.
- b) El adhesivo que da menores resultados de tensión es el SILANO MODIFICADO, mientras que el mayor es el CIANOACRILATO.

4.7.- Comparativa entre unión con remache y unión con clinchado.

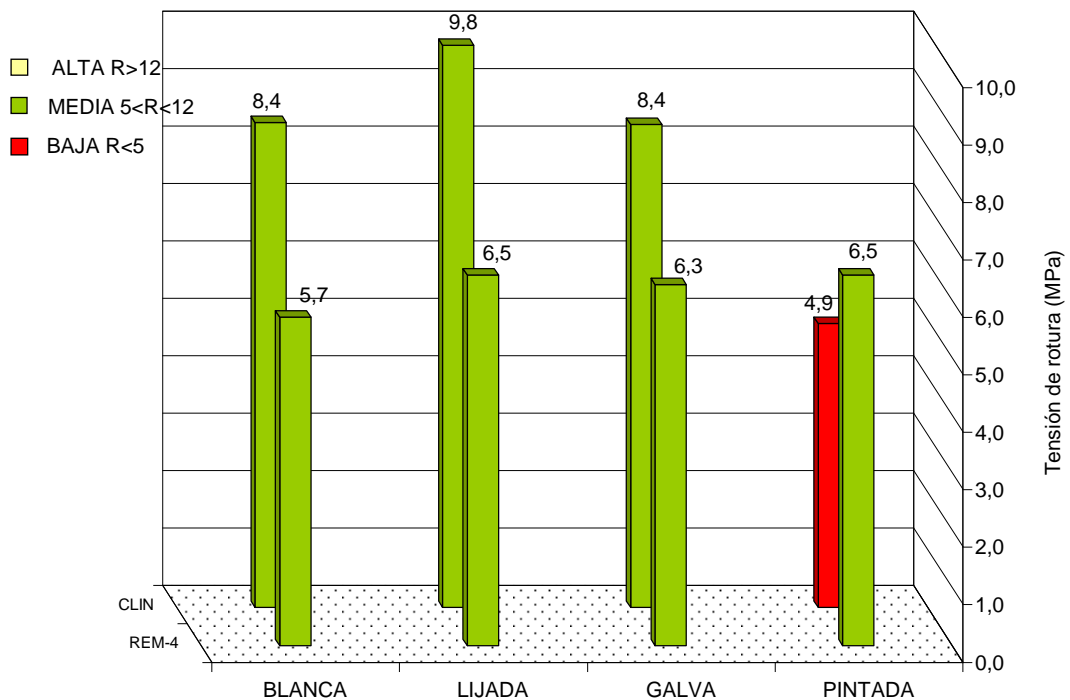


Figura 123. Resistencia mecánica de las uniones con remache y clinchadas.

Tabla 11. Resistencia mecánica de las uniones con remache y clinchadas.

| RESISTENCIA (R) (MPa) | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| REM-4 | 5,7 | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,2 |
| CLIN | 8,4 | 9,8 | 8,4 | 4,9 | 7,9 |
| Promedio | 7,1 | 8,1 | 7,4 | 5,7 | 7,1 |

| | |
|-------|--------|
| ALTA | R>12 |
| MEDIA | 5<R<12 |
| BAJA | R<5 |

4.8.- Influencia del clinchado.

4.8.1.- Valores de resistencia de las uniones con clinchado.

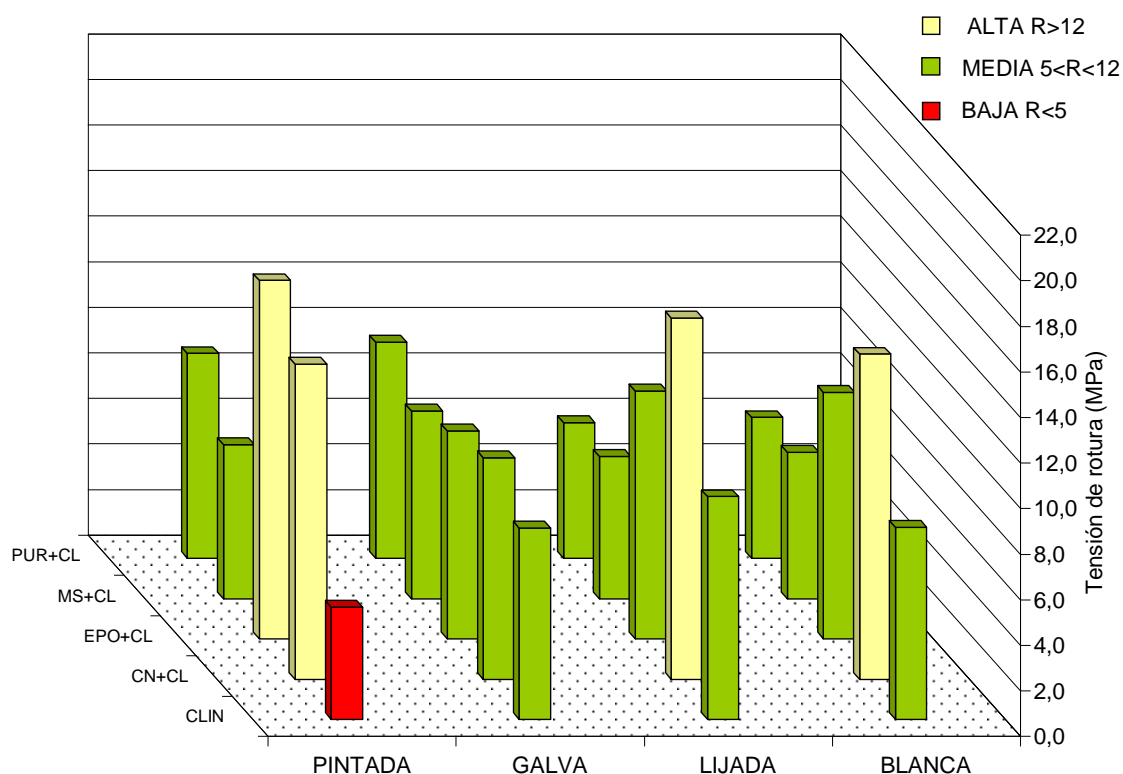


Figura 124. Resistencia mecánica de las uniones realizadas con clinchado.

Tabla 12. Resistencia mecánica de las uniones realizadas con clinchado.

| RESISTENCIA (R) (MPa) | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CLIN | 8,4 | 9,8 | 8,4 | 4,9 | 7,9 |
| CN+CL | 14,3 | 15,9 | 9,7 | 13,8 | 13,4 |
| EPO+CL | 10,8 | 10,9 | 9,1 | 15,7 | 11,6 |
| MS+CL | 6,4 | 6,2 | 8,2 | 6,8 | 6,9 |
| PUR+CL | 6,2 | 6,0 | 9,5 | 9,0 | 7,7 |
| Promedio | 9,2 | 9,7 | 9,0 | 10,0 | 9,5 |

| | |
|-------|--------|
| ALTA | R>12 |
| MEDIA | 5<R<12 |
| BAJA | R<5 |

4.8.2.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO con respecto a la suma de resistencias de las uniones CLINCHADAS solas y el Adhesivo solo.

El resultado de añadir la unión mecánica de clinchado junto con un adhesivo ha sido en primer lugar que, en ninguna unión se suma la resistencia que proporciona el clinchado cuando se realiza de forma individual a la que proporciona el adhesivo de forma independiente (Fig. 125). En muchos casos incluso disminuye la resistencia a valores inferiores a los que proporciona el adhesivos sólo. En general la reducción que se produce en la resistencia mecánica respecto de la suma de las resistencias de la unión mecánica y del adhesivo por separado hace que la resistencia de la unión mixta quede con una resistencia del orden del 50 % por ciento de la suma de ambas.

Se han agrupado según su efecto **poca pérdida, media pérdida, mucha pérdida**, quedando estos valores cómo se indica en la Fig. 125 y en la Tabla 13).

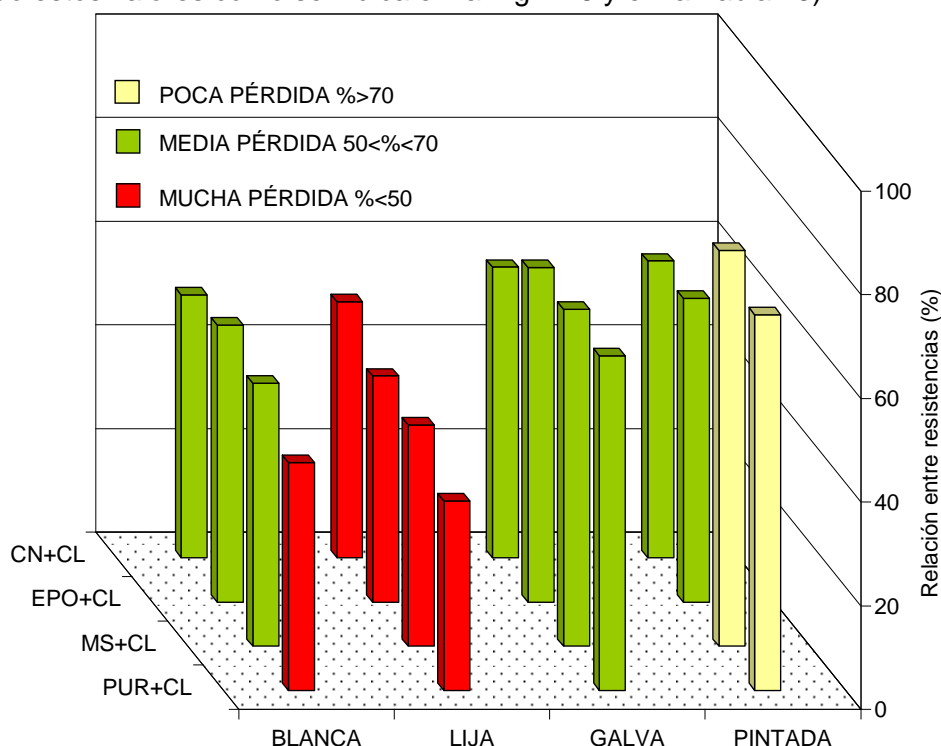


Figura 125. Influencia de la unión mixta con clinchado en la resistencia mecánica. La altura de las barras indica el % que representa la resistencia de la unión mixta con clinchado, con respecto a la suma de las resistencias por separado del clinchado más el adhesivo

Tabla 13. Influencia de la unión mixta con clinchado en la resistencia mecánica. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con clinchado, con respecto a la suma de las resistencias por separado del clinchado más el adhesivo

| Relación entre resistencias (%) | | | | | |
|---------------------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+CL | 51 | 49 | 56 | 57 | 53 |
| EPO+CL | 53 | 44 | 65 | 59 | 55 |
| MS+CL | 51 | 43 | 65 | 76 | 59 |
| PUR+CL | 44 | 37 | 65 | 73 | 54 |
| Promedio | 50 | 43 | 63 | 66 | 55 |

| | |
|---------------|---------|
| POCA PÉRDIDA | %>70 |
| MEDIA PÉRDIDA | 50<%<70 |
| MUCHA PÉRDIDA | %<50 |

De la Tabla 13 se concluye lo siguiente:

- En cuanto al efecto de los sustratos, la superficie prepintada es la que proporciona mejores resultados pues es la que consigue mejores resultados de resistencia.
- En cuanto al efecto sobre los adhesivos destaca con mejor efecto, aunque por muy poco, el adhesivo SILANO MODIFICADO, y POLIURETANO, aunque sobre todo con la superficie prepintada.
- En general el efecto es muy similar en todas las uniones.

Análisis detallado de la influencia relativa del clinchado en cada tipo de superficie.

1. SUPERFICIE BLANCA

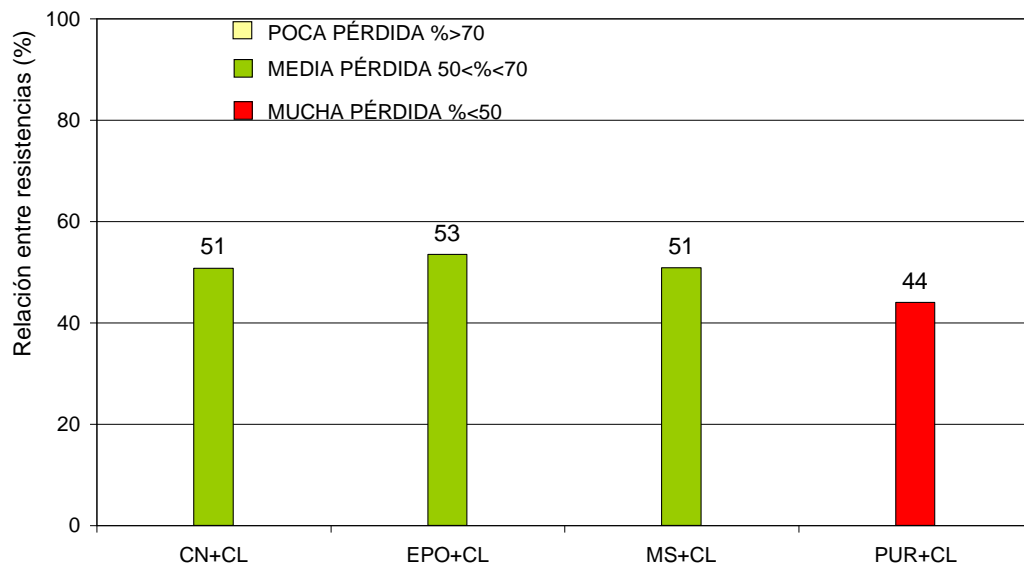


Figura 126. Influencia del clinchado en la resistencia de la unión mixta con sustrato BLANCA.

Su efecto es muy similar, todos se encuentran en la franja 40-60 %. (Fig. 126).

2. SUPERFICIE LIJADA.

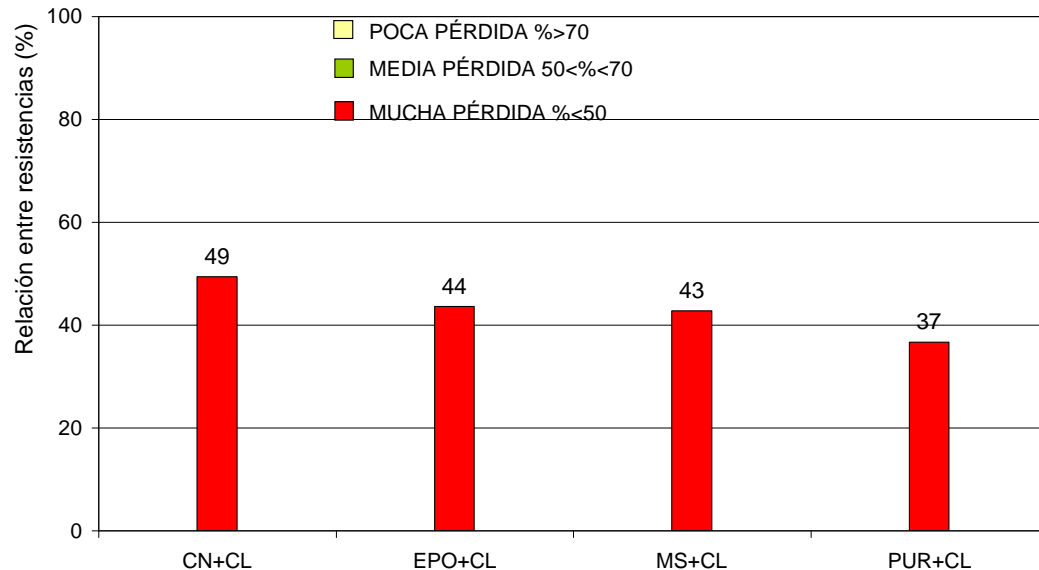


Figura 127. Influencia del clinchado en la resistencia de la unión mixta con sustrato LIJADA.

Su efecto es muy similar, todos se encuentran en la franja 40-60 %. (Fig. 127).

3. SUPERFICIE GALVANIZADA.

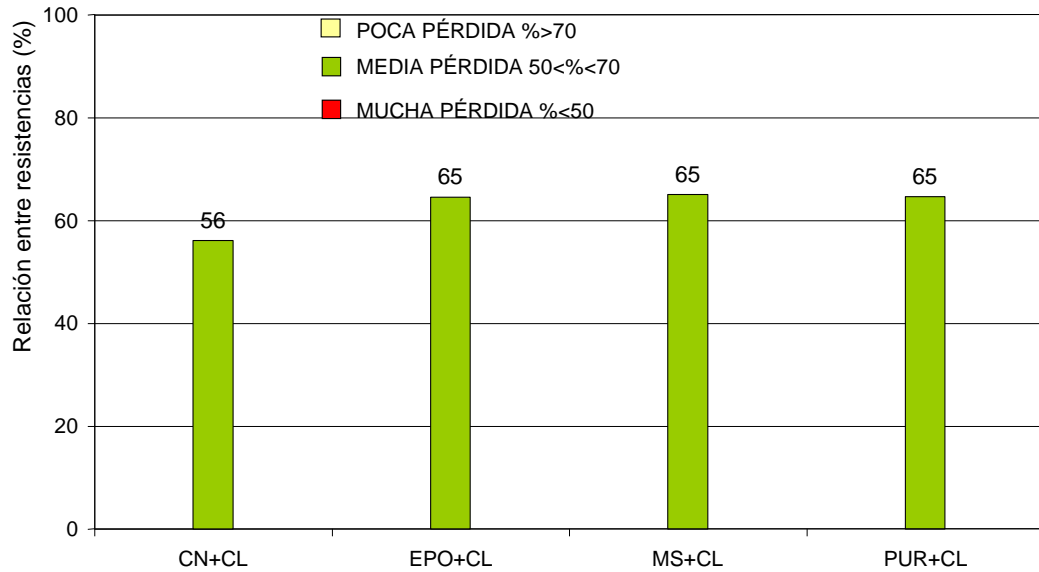


Figura 128. Influencia del clinchado en la resistencia de la unión mixta con substrato GALVANIZADA.

Esta superficie destaca un poco de las demás porque su efecto además de ser también muy constante, están casi todas por encima del 60 %. (Fig. 128).

4. SUPERFICIE PINTADA.

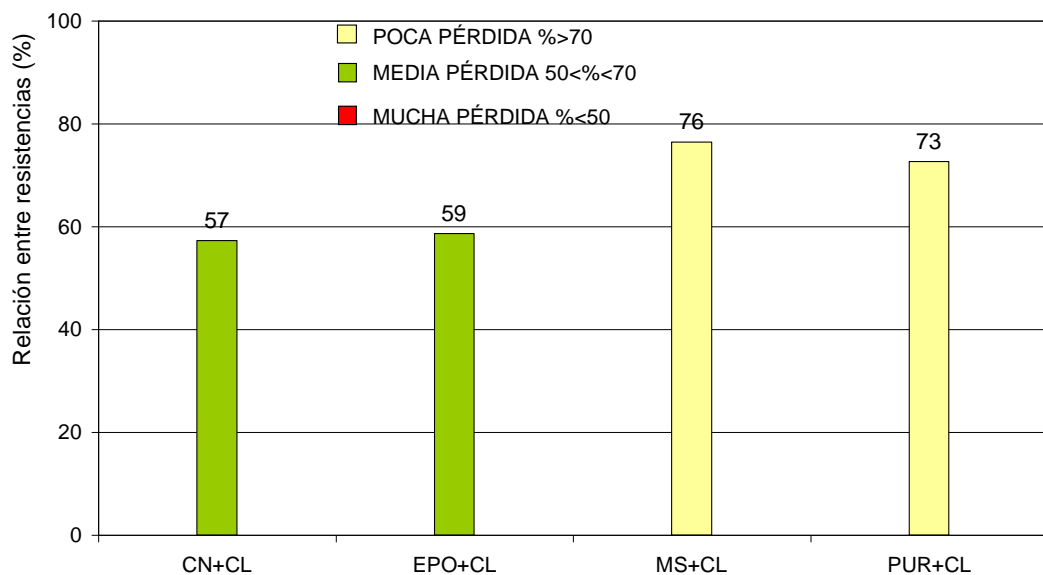


Figura 129 Influencia del clinchado en la resistencia de la unión mixta con substrato PINTADA.

Esta superficie tiene dos uniones en la franja 40-60 % y otras dos en la franja 60-80 %. (Fig. 129). Destaca por tanto en esta superficie que con los adhesivos MS y con PUR, tiene el mejor comportamiento de todos.

4.8.3.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO, respecto al CLINCHADO.

Tabla 14. Influencia del clinchado en la resistencia mecánica. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con clinchado con respecto a la resistencia del clinchado sólo.

| INFLUENCIA DEL CLINCHADO (Relación entre la Resistencia de la unión mixta y la Resistencia del CL solo (%)) | | | | | |
|---|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+CL | 169 | 162 | 115 | 280 | 170 |
| EPO+CL | 128 | 111 | 109 | 318 | 148 |
| MS+CL | 76 | 64 | 98 | 137 | 88 |
| PUR+CL | 73 | 61 | 113 | 182 | 97 |
| Promedio | 112 | 100 | 109 | 229 | 126 |

| | |
|---------|----------|
| MEJORA | %>110 |
| NEUTRO | 90<%<110 |
| PÉRDIDA | %<90 |

4.8.4.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con CLINCHADO, respecto del Adhesivo.

Tabla 15. Influencia del clinchado en la resistencia mecánica. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con clinchado con respecto a la resistencia del adhesivo sólo.

| INFLUENCIA DEL CLINCHADO (Relación entre la Resistencia de la unión mixta y la Resistencia del Adhesivo solo (%)) | | | | | |
|---|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+CL | 72 | 71 | 109 | 72 | 81 |
| EPO+CL | 92 | 72 | 160 | 72 | 99 |
| MS+CL | 152 | 132 | 195 | 170 | 162 |
| PUR+CL | 109 | 91 | 151 | 120 | 118 |
| Promedio | 106 | 91 | 154 | 108 | 115 |

| | |
|---------|----------|
| MEJORA | %>110 |
| NEUTRO | 90<%<110 |
| PÉRDIDA | %<90 |

4.9.- Influencia del remache sobre la resistencia mecánica, en la unión adhesiva.

4.9.1.- Valores de resistencia de las uniones realizadas con remache.

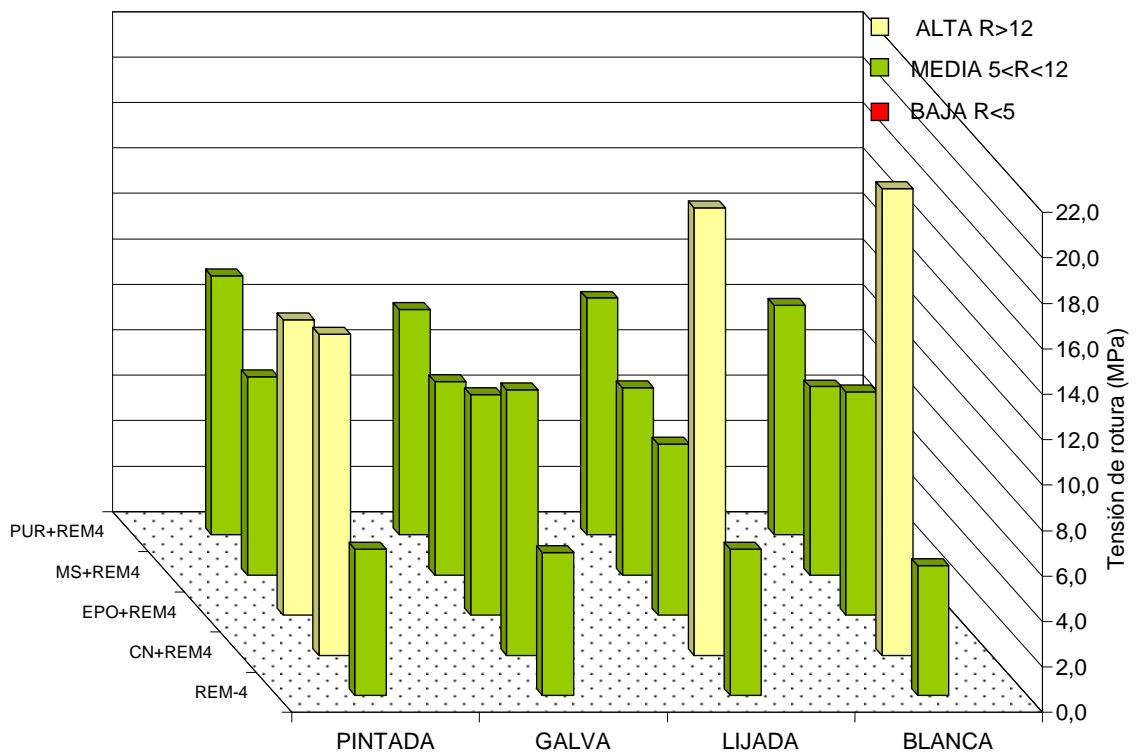


Figura 130. Resistencia mecánica de las uniones realizadas con remache.

Tabla 16. Resistencia mecánica de las uniones realizadas con remache.

| RESISTENCIA (R) (MPa) | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| REM-4 | 5,7 | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,2 |
| CN+REM4 | 20,5 | 19,7 | 11,7 | 14,1 | 16,5 |
| EPO+REM4 | 9,8 | 7,5 | 9,7 | 13,0 | 10,0 |
| MS+REM4 | 8,3 | 8,2 | 8,5 | 8,7 | 8,4 |
| PUR+REM4 | 10,1 | 10,4 | 9,9 | 11,4 | 10,5 |
| Promedio | 10,9 | 10,5 | 9,2 | 10,7 | 10,3 |

| | |
|-------|------------|
| ALTA | R > 12 |
| MEDIA | 5 < R < 12 |
| BAJA | R < 5 |

4.9.2.- Análisis de resistencia relativa de la unión mixta con remache, con respecto a la suma de las resistencias de las uniones REMACHE sola y el Adhesivo solo.

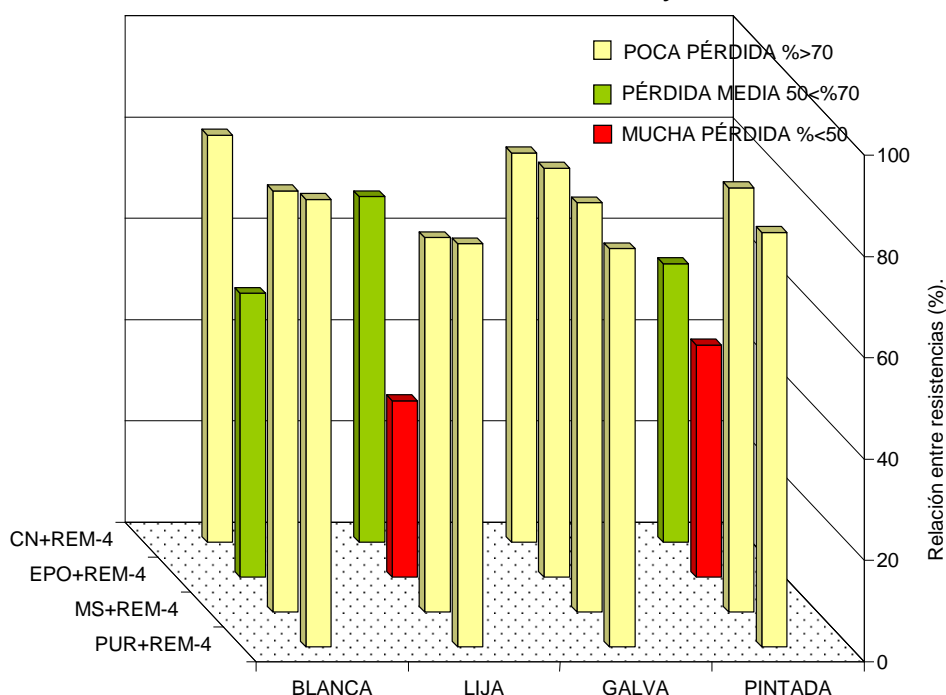


Figura 131. Influencia del remache en la resistencia mecánica. La altura de las barras indica el % que representa la resistencia de la unión mixta con remache, con respecto a la suma de las resistencias por separado del remache más el adhesivo correspondiente.

Tabla 17. Influencia del remache en la resistencia mecánica. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con remache, con respecto a la suma de las resistencias por separado del remache más el adhesivo correspondiente.

| Relación entre resistencias (%) | | | | | |
|---------------------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+REM-4 | 80 | 68 | 77 | 55 | 70 |
| EPO+REM-4 | 56 | 35 | 81 | 46 | 54 |
| MS+REM-4 | 83 | 74 | 81 | 84 | 80 |
| PUR+REM-4 | 88 | 80 | 79 | 82 | 82 |
| Promedio | 77 | 64 | 79 | 67 | 72 |

| | |
|---------------|---------|
| POCA PÉRDIDA | %>70 |
| MEDIA PÉRDIDA | 50<%<70 |
| MUCHA PÉRDIDA | %<50 |

El resultado de añadir la unión mecánica de remache junto con un adhesivo, ha sido en primer lugar que en ninguna unión se suma la resistencia que proporciona el remache cuando se realiza de forma individual, a la que proporciona el adhesivo de forma independiente (Fig. 131). En muchos casos incluso disminuye la resistencia a valores inferiores a los que proporciona el adhesivos sólo. En general la reducción que se produce en la resistencia mecánica respecto de la suma de las resistencias de la unión mecánica y del adhesivo por separado hace que la resistencia de la unión mixta quede con una resistencia del orden del 50 % por ciento de la suma de ambas. Con las variaciones que se indican en la tabla 17.

Puede verse que el efecto que produce el remache es mejor que el que produce la unión con clinchado pues la reducción que tiene lugar es inferior, aunque hay algunas excepciones.

Se han agrupado según su efecto poca **pérdida**, **media pérdida**, **mucha pérdida**, quedando estos valores reflejados en la Tabla 15 y Fig. 131.

De la Tabla 12 se deduce lo siguiente:

a) En cuanto a superficies se refiere no hay grandes diferencias entre ellas, pero destaca la superficie GALVANIZADA, porque no tiene excepciones y todos sus valores son altos. Y la lijada destaca por tener el valor medio mas bajo.

b) En cuanto a adhesivos hay dos que no tienen excepciones y que todos sus valores están en la gama alta, son el SILANO MODIFICADO y el POLIURETANO. El adhesivo que peor se comporta en todos los casos es el EPOXI, porque tiene tres de las superficies con valores muy bajos, lo cual le hace ser el del valor medio menor.

Análisis de la influencia del remache desarrollado por tipo de superficies.

1. SUPERFICIE BLANCA

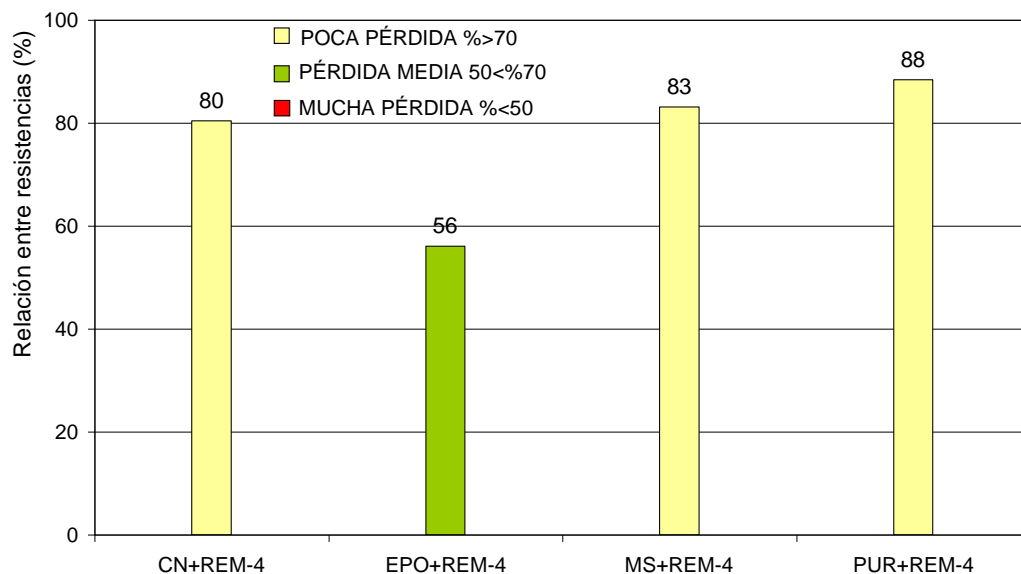


Figura 132. Influencia del remache en la resistencia de la unión mixta con substrato BLANCA.

Los resultados son buenos y de gran uniformidad salvando la excepción del adhesivo EPOXI, que da 56 %. (Fig. 132).

2. SUPERFICIE LIJADA

Los resultados son buenos y de gran uniformidad salvando la excepción del adhesivo EPOXI, que da 35 %. (Fig. 133).

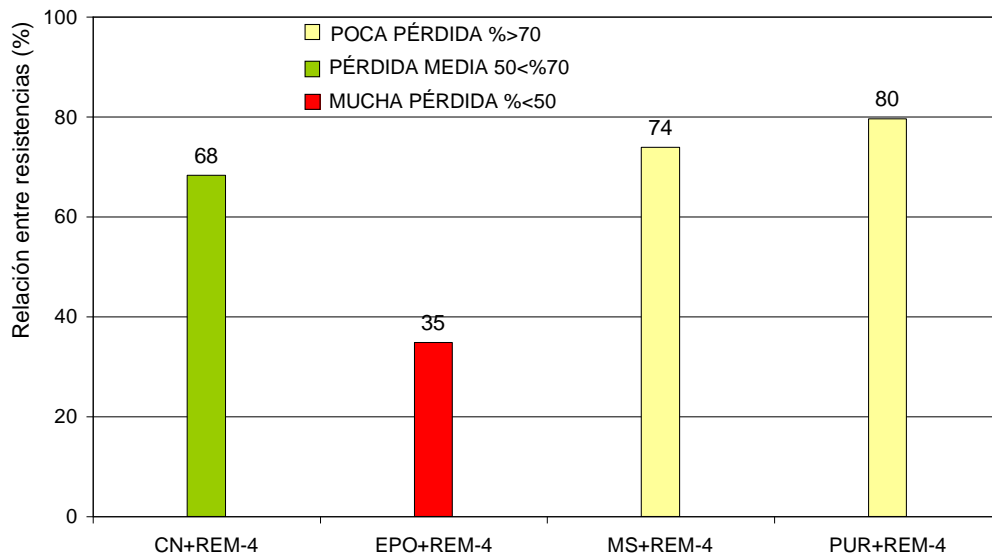


Figura 133. Influencia del remache en la resistencia de la unión mixta con sustrato LIJADA.

3. SUPERFICIE GALVANIZADA

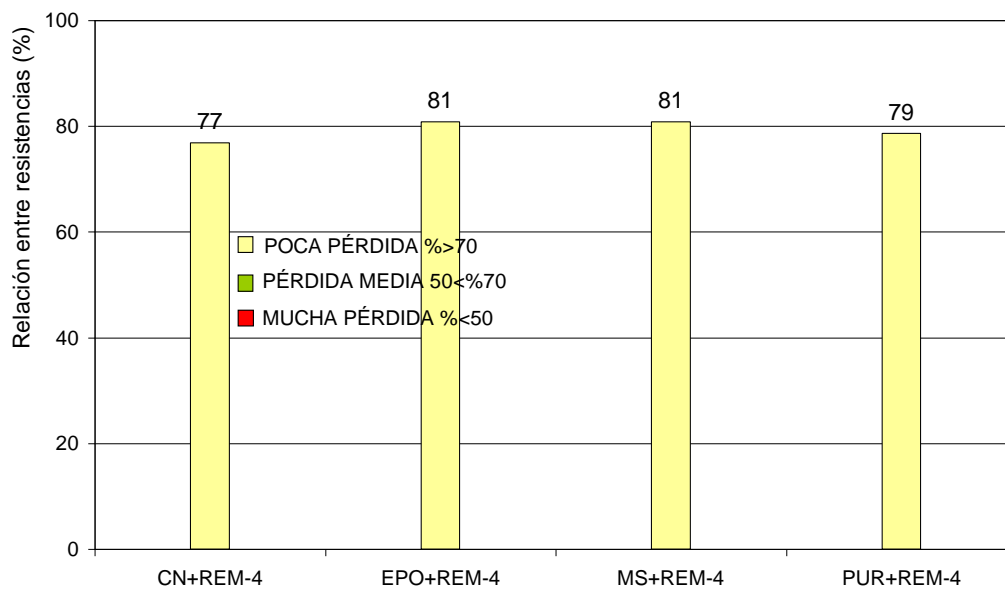


Figura 134. Influencia del remache en la resistencia de la unión mixta con sustrato GALVANIZADA.

Los resultados son buenos y muy uniformes sin excepciones. (Fig. 134).

4. SUPERFICIE PINTADA.

Se puede decir que hay dos resultados buenos, con valores superiores al 80% y dos resultados malos que corresponden al adhesivo EPOXI y al CIANOACRILATO, con valores respectivos de 46 y 55 %. (Fig. 135).

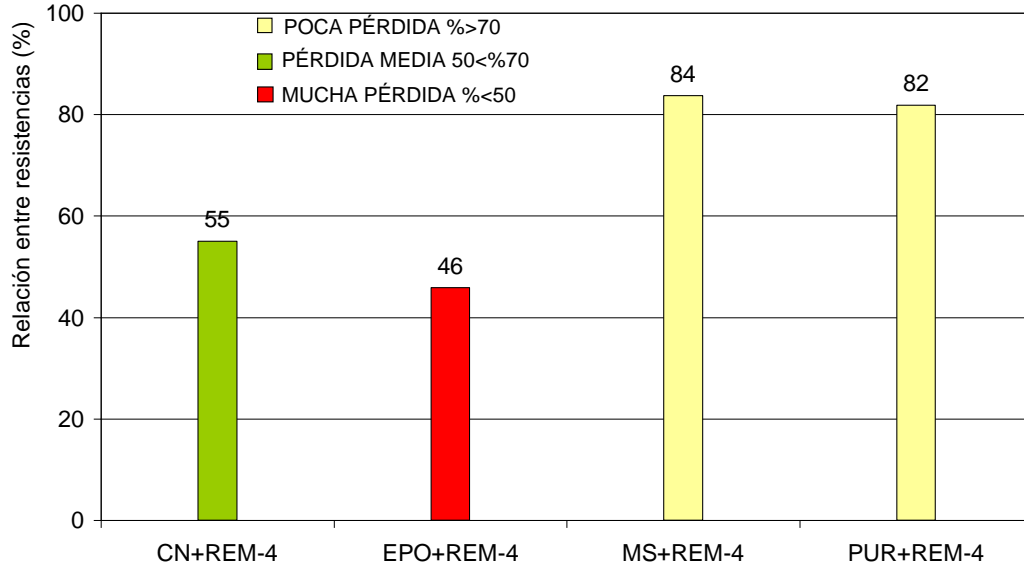


Figura 135. Influencia del remache en la resistencia de la unión mixta con substrato PINTADA.

4.9.3.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con REMACHE, respecto al REMACHE solo.

Tabla 18. Influencia del remache en la resistencia mecánica de la unión mixta. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con remache con respecto a la resistencia del remache sólo.

| INFLUENCIA DEL REMACHE (Relación entre la Resistencia de la unión mixta y la Resistencia del REMACHE solo (%)) | | | | | |
|--|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+REM-4 | 359 | 305 | 186 | 219 | 265 |
| EPO+REM-4 | 172 | 117 | 154 | 201 | 161 |
| MS+REM-4 | 145 | 128 | 135 | 135 | 135 |
| PUR+REM-4 | 176 | 161 | 157 | 177 | 168 |
| Promedio | 213 | 178 | 158 | 183 | 182 |

| | |
|---------|----------|
| MEJORA | %>110 |
| NEUTRO | 90<%<110 |
| PÉRDIDA | %<90 |

4.9.4.- Influencia relativa de la unión mixta realizada con REMACHE, respecto al Adhesivo solo.

Tabla 19. Influencia del remache en la resistencia mecánica de la unión mixta. Los valores indican el % que representa la resistencia de la unión mixta con remache con respecto a la resistencia de la unión adhesiva sola.

| INFLUENCIA DEL REMACHE (Relación entre la Resistencia de la unión mixta y la Resistencia del Adhesivo solo (%)) | | | | | |
|--|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+REM-4 | 104 | 88 | 131 | 74 | 99 |
| EPO+REM-4 | 83 | 50 | 170 | 59 | 90 |
| MS+REM-4 | 195 | 175 | 201 | 221 | 198 |
| PUR+REM-4 | 177 | 157 | 157 | 152 | 161 |
| Promedio | 140 | 117 | 165 | 126 | 137 |

| | |
|---------|----------|
| MEJORA | %>110 |
| NEUTRO | 90<%<110 |
| PÉRDIDA | %<90 |

4.10.- Influencia del estado del adhesivo, fresco o curado, sobre la resistencia mecánica, al realizar la unión mixta con remache.

4.10.1.- Influencia de tipo de adhesivo.

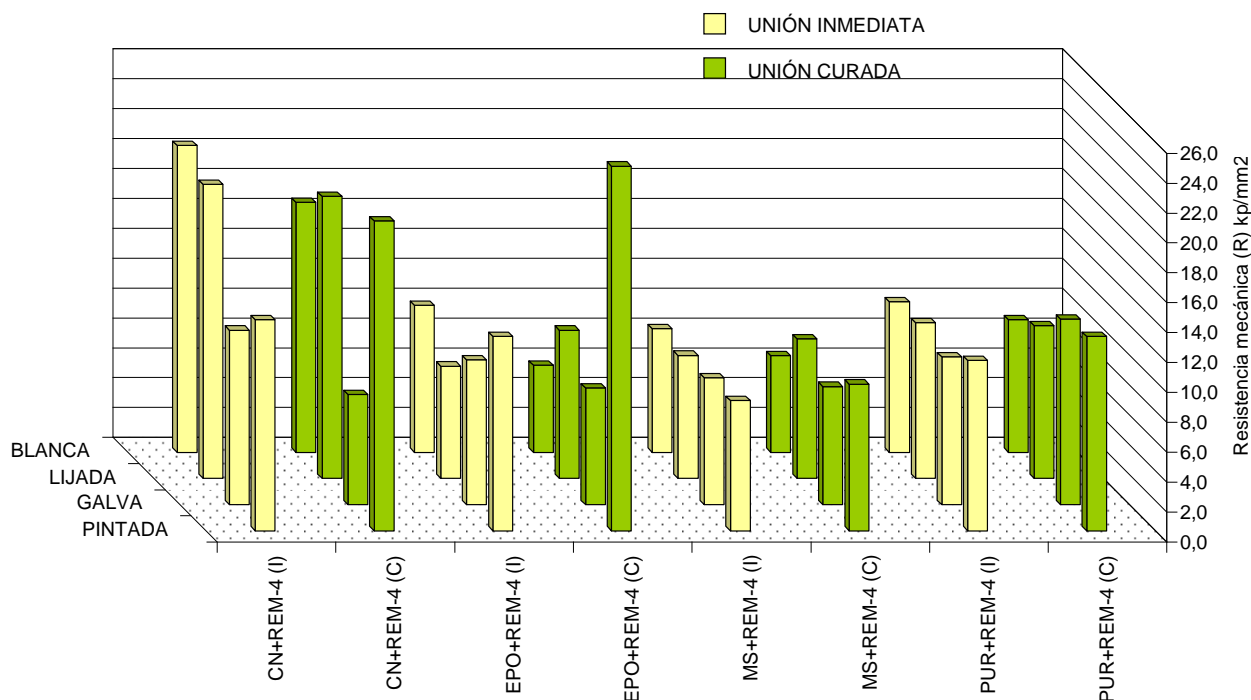


Figura 136. Influencia de las condiciones de aplicación del adhesivo (fresco o curado) en cada adhesivo, sobre la resistencia mecánica de las uniones mixtas.

Tabla 20. Influencia de las condiciones de aplicación del adhesivo (fresco o curado) en cada adhesivo, sobre la resistencia mecánica de las uniones mixtas.

| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
|----------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| CN+REM-4 (I) | 20,5 | 19,7 | 11,7 | 14,1 | 16,5 |
| CN+REM-4 (C) | 16,7 | 18,9 | 7,4 | 20,7 | 15,9 |
| EPO+REM-4 (I) | 9,8 | 7,5 | 9,7 | 13,0 | 10,0 |
| EPO+REM-4 (C) | 5,8 | 9,9 | 7,8 | 24,4 | 12,0 |
| MS+REM-4 (I) | 8,3 | 8,2 | 8,5 | 8,7 | 8,4 |
| MS+REM-4 (C) | 6,5 | 9,3 | 7,9 | 9,8 | 8,4 |
| PUR+REM-4 (I) | 10,1 | 10,4 | 9,9 | 11,4 | 10,5 |
| PUR+REM-4 (C) | 8,9 | 10,2 | 12,4 | 13,0 | 11,1 |
| Promedio | 10,8 | 11,8 | 9,4 | 14,4 | 11,6 |

unión inmediata
unión en curado

4.10.2.- Influencia del tipo de superficie.

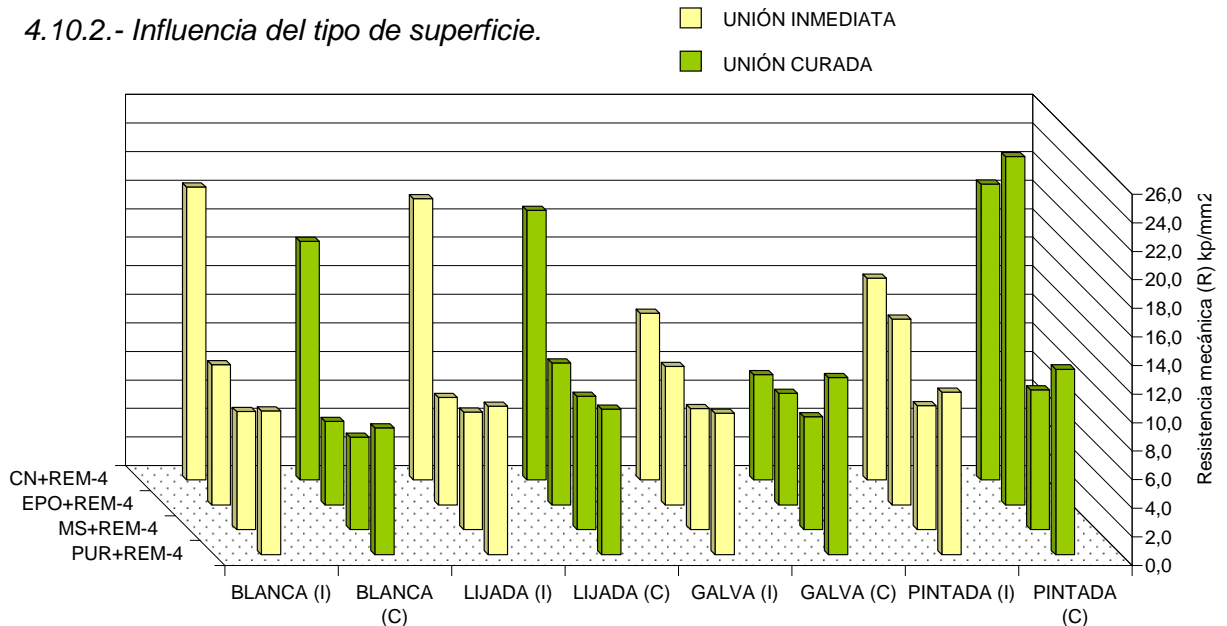


Figura 137. Influencia de las condiciones de aplicación del adhesivo (fresco o curado) en cada superficie, sobre la resistencia mecánica de las uniones mixtas.

4.10.3.- Análisis general de la influencia de la unión inmediata (fresco).

Al realizar la unión mixta de remache con adhesivos se ha realizado por dos métodos, primero adicionando el remache cuando el adhesivo ya había curado (curado), y otra adicionando el remache inmediatamente después de aplicar el adhesivo en la unión (fresco). Las proporciones de los resultados de las resistencias obtenidas se muestran en la Fig. 138 y en la Tabla 17.

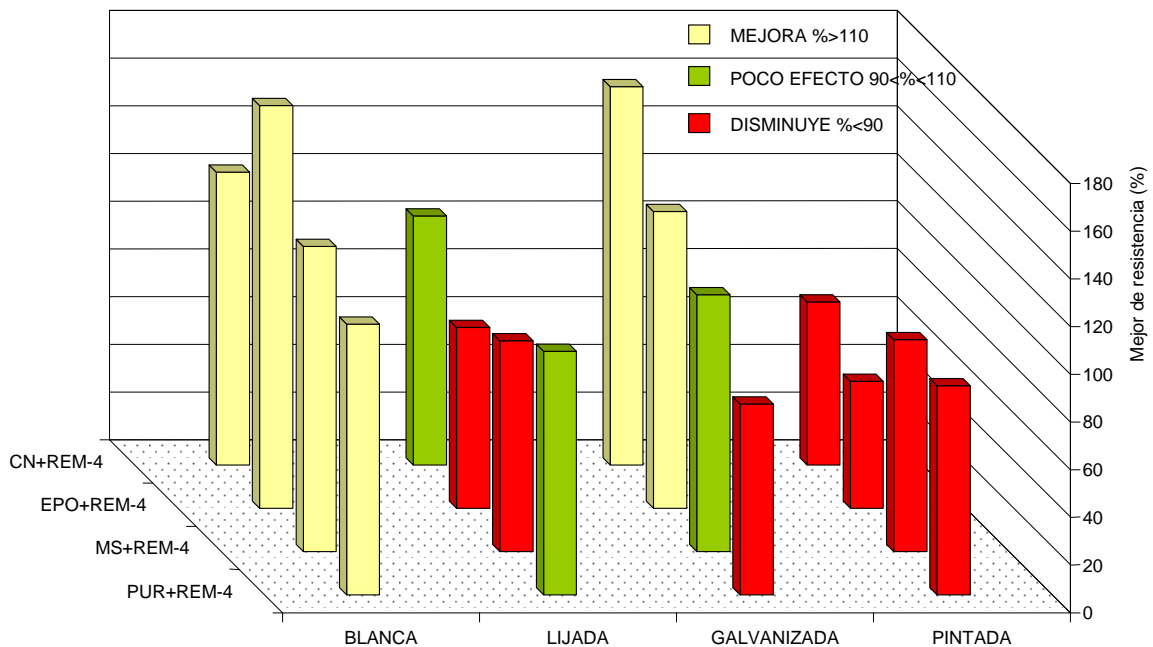


Figura 138. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache. La altura de las barras representa el % del valor de la resistencia obtenida al realizar la unión de forma inmediata con respecto a la resistencia obtenida si se hace la unión después de curado el adhesivo.

Tabla 21. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache. Los valores representan el % del valor de la resistencia obtenida al realizar la unión de forma inmediata con respecto a la resistencia obtenida si se hace la unión después de curado el adhesivo.

| AUMENTO DE RESISTENCIA POR UNIÓN INMEDIATA CON RESPECTO A CURADA (%) | | | | | |
|---|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN+REM-4 | 123 | 104 | 158 | 68 | 113 |
| EPO+REM-4 | 169 | 76 | 124 | 53 | 106 |
| MS+REM-4 | 128 | 88 | 108 | 89 | 103 |
| PUR+REM-4 | 113 | 102 | 80 | 88 | 96 |
| Promedio | 133 | 93 | 118 | 74 | 104 |

| | |
|-------------|----------|
| Mejora | %>110 |
| Poco efecto | 90<%<110 |
| Disminuye | %<90 |

De la Tabla 17 se puede deducir lo siguiente:

- a) En el adhesivo MS y en el PUR la influencia de realizar la unión inmediata es muy pequeña.
- b) En el sustrato LIJADA la influencia de realizar la unión inmediata es muy pequeña.
- b) Donde mas influye el realizar la unión inmediata es en el sustrato PINTADA y lo hace negativamente, sobre todo con los adhesivos CN y EPO.
- c) Donde la acción es mayor es en el sustrato BLANCA, pero su aumento no es muy grande ni con todos los adhesivos.

4.10.4.- Análisis detallado de la influencia de la unión inmediata (fresco).

Para un estudio más detallado se representan los resultados ordenados por tipo de superficie.

1) SUPERFICIE BLANCA

La **superficie blanca** da mejores resultados en fresco que en seco con todos los adhesivos (Fig. 139). Mejor con el adhesivo epoxi, aunque también tienen valores destacados el adhesivo cianoacrilato y el silano modificado, y la mejoría es menor con el adhesivo poliuretano.

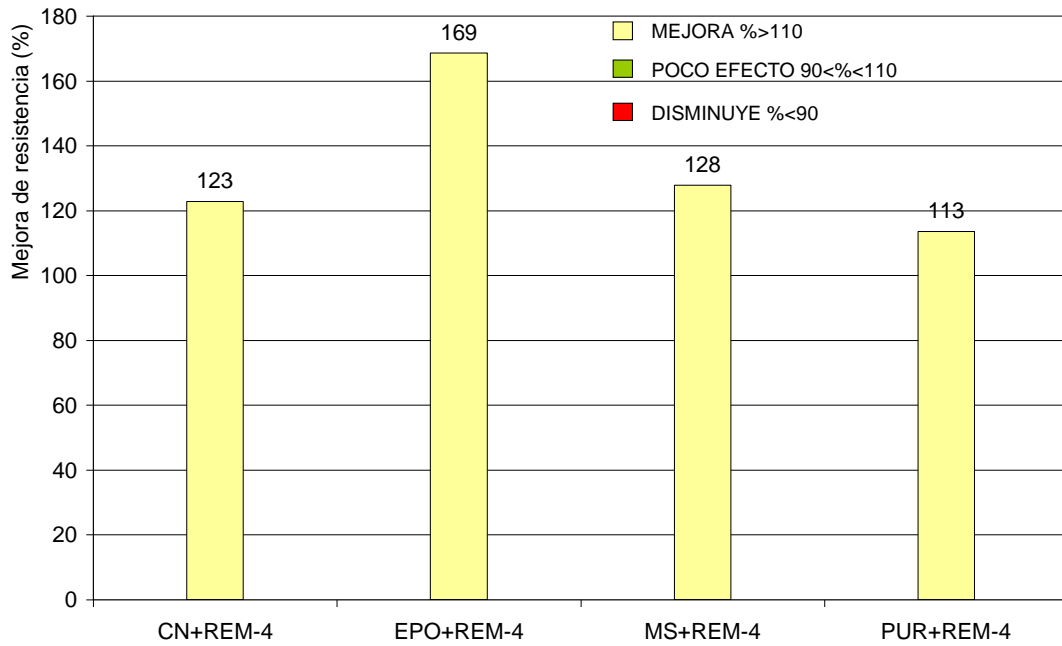


Figura 139. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache con respecto a la unión curada, en substrato BLANCA.

2) SUPERFICIE LIJADA

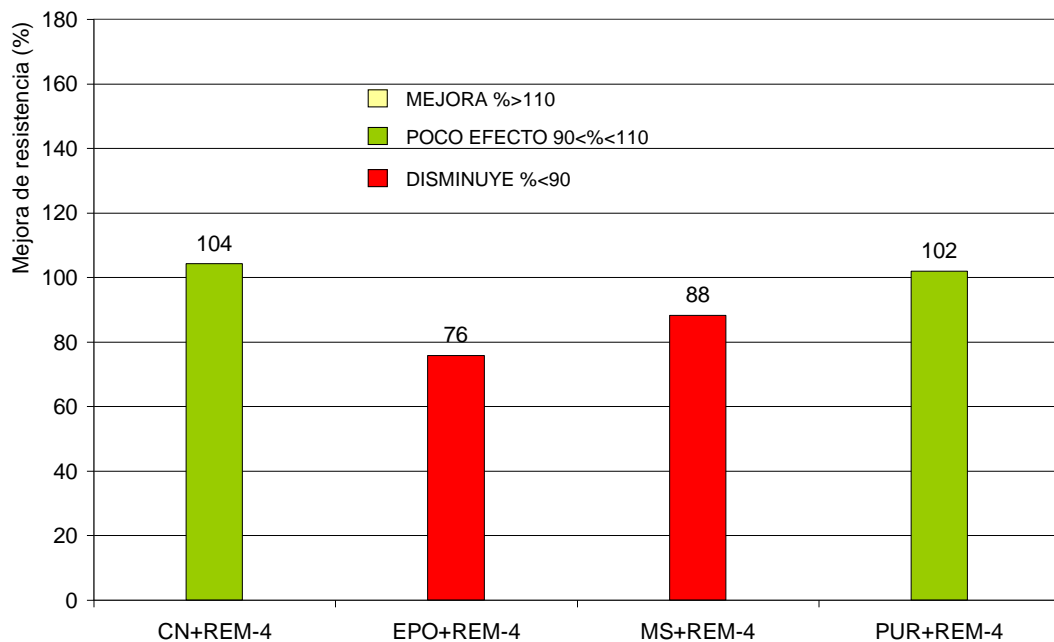


Figura 140. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache con respecto a la unión curada, en substrato LIJADA.

La **superficie lijada** mejora con dos de los adhesivos y empeora con los otros dos (Fig. 140). Lo que mejora y empeora es muy poco en todos los casos. Mejora con cianoacrilato y poliuretano. Empeora con epoxi y con silano modificado. Véanse los efectos mencionados en el siguiente gráfico:

3) SUPERFICIE GALVANIZADA

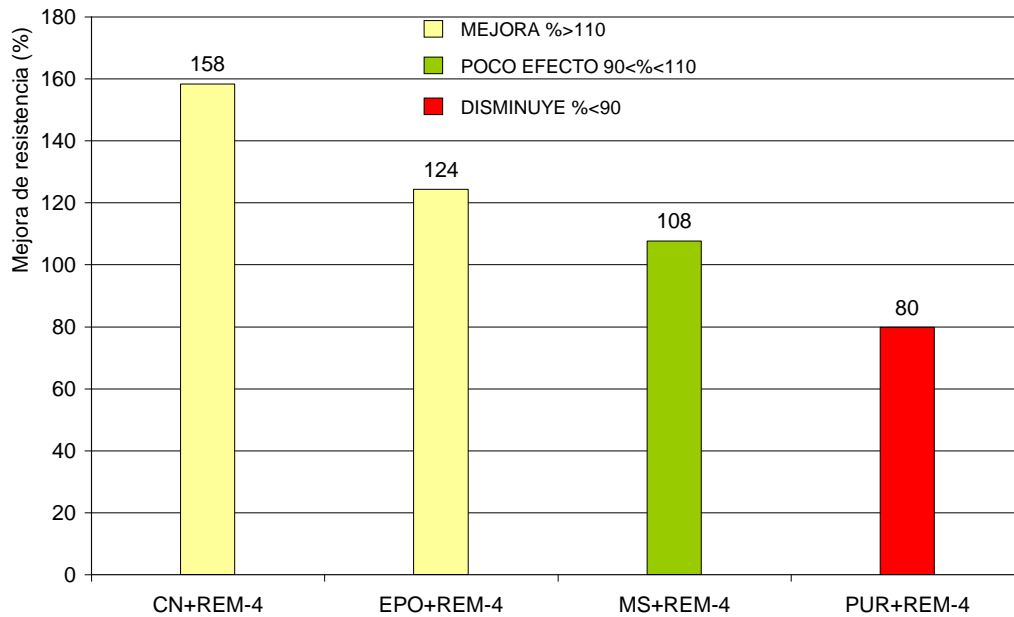


Figura 141. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache con respecto a la unión curada, en sustrato GALVANIZADA.

La **superficie galvanizada** da mejores resultados en fresco que en seco con 3 de los adhesivos y peor con poliuretano (Fig. 141). Por orden de importancia en la mejoría son cianoacrilato, epoxi, silano modificado.

4) SUPERFICIE PINTADA

La **superficie prepintada** empeora los resultados en fresco con respecto a en seco con todos los adhesivos (Fig. 142). Empeora mucho con el adhesivo epoxi y con cianoacrilato, también empeora aunque poco con los adhesivos poliuretano y con silano modificado.

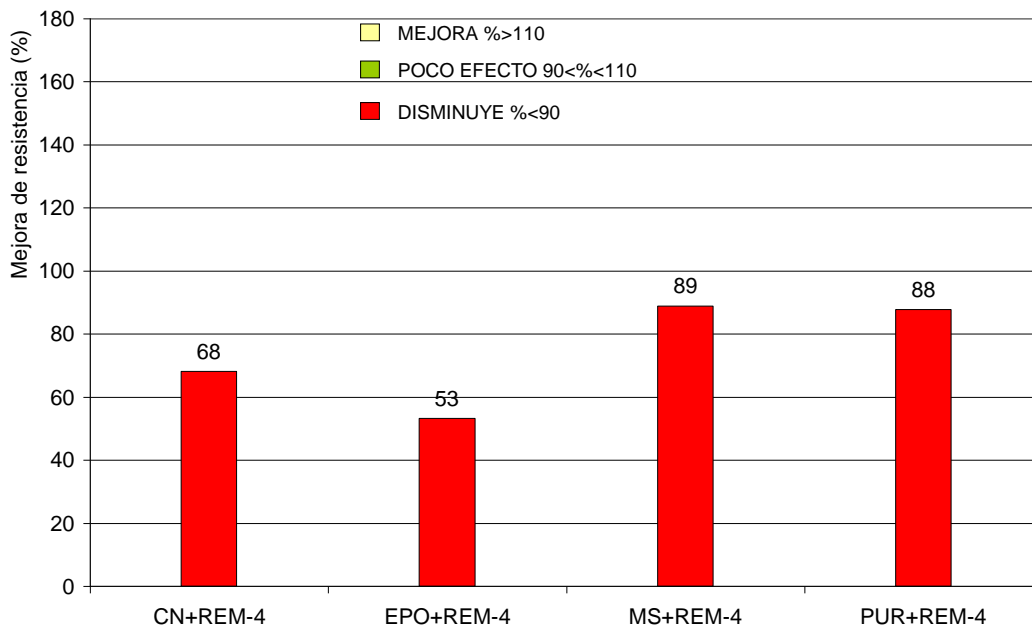


Figura 142. Mejora de resistencia por unión inmediata con remache con respecto a la unión curada, en sustrato PINTADA.

4.11.- Aprendizajes conseguidos.

Los valores de **resistencia** a cortante de las uniones ensayadas son muy diferentes de unas a otras (Tab. 9). Los tipos de uniones que proporcionan mayores valores son las realizadas con sólo CN, con sólo EPO, y las mixtas con CN, mejor la mixta CN+REM-4 que la CN+CL. Las resistencias más pequeñas se obtienen con la unión simple de adhesivo MS.

La **resistencia** a cortante de una unión realizada sólo con adhesivo se puede expresar analíticamente mediante la siguiente ley:

$$Y = 19.8 \times (C_{adh} + C_{sub})$$

Y: valor de la resistencia en N/mm².

C_{adh} : Coeficiente correspondiente al adhesivo, cuyos valores son los siguientes:

CIANOACRILATO: 1
EPOXI: 0.6
SILANO MODIFICADO: 0.21
POLIURETANO: 0.29

C_{sub} : Coeficiente correspondiente a la superficie, cuyos valores son los siguientes:

BLANCA: 0
LIJADA: 0.13
GALVANIZADA: $-0.55 \cdot C_{adh}$
PINTADA: este tipo de sustrato es el que presenta mayores irregularidades en este coeficiente, vale -0.03 para los adhesivos CN y MS, vale 0.86 cuando el adhesivo es EPOXI, y vale 0.31 cuando el adhesivo es PUR.

La influencia que ejercen el **adhesivo y la superficie** en la resistencia de la unión están relacionados entre sí y son dos factores decisivos en la resistencia final de la unión. El adhesivo influye en función de sus características internas. Las superficies pueden disminuir mucho la capacidad teórica del adhesivo; la superficie que sobre todo disminuye mucho la capacidad del adhesivo es la GALVANIZADA. Los adhesivos a los cuales les influye más el tipo de superficie son el CN y en segundo lugar el EPO. El adhesivo al que menos le influye el tipo de superficie a utilizar es el PUR. La superficie LIJADA, presenta una pequeña mejora de los adhesivos en general en torno al 13 % con respecto a la BLANCA. La superficie GALVANIZADA, tiene un efecto desfavorable con respecto a la BLANCA que es tanto más desfavorable cuanto mayor es la capacidad de carga del adhesivo. La proporción de aumento de efecto negativo es proporcional a una constante que vale 0.55. La superficie pintada tiene un leve efecto negativo del orden del 3% en dos adhesivos, en el CIANOACRILATO y en el SILANO MODIFICADO, y un efecto de aumento del 86% en el adhesivo EPOXI, y un aumento del 31 % en el adhesivo POLIURETANO. El aumento que producen estos dos adhesivos se justifica porque ambos tienen gran afinidad con la superficie pintada, la cual es de tipo EPOXI. Sin embargo se ha comprobado que con otros tipos de pinturas el efecto puede llegar incluso a ser también negativo como en los otros tipos de superficies.

El **tipo de adhesivo** influye mucho en la **resistencia** a cortante de las uniones simples (Tab. 10). Dos de los adhesivos proporcionan valores altos, el CN, seguido muy de cerca del EPO, y los otros dos, uno valores bajos, el adhesivo PUR y valores muy bajos el adhesivo MS.

Cada **tipo de superficie** tiene un comportamiento diferente con respecto a la resistencia a cortante de las uniones simples (Tab. 10). La superficie GALVANIZADA se caracteriza porque presenta resultados bajos pero muy uniformes, es decir que varía muy poco de unas uniones a otras. Las otras tres superficies presentan resultados muy variables dependiendo del tipo de unión que se realice, van desde valores muy altos a valores muy bajos. La superficie GALVANIZADA, disminuye mucho la resistencia de los adhesivos más resistentes y disminuye menos e incluso nada en ocasiones la resistencia de los adhesivos con menos capacidad de carga. Esto es debido a que los más resistentes son más frágiles, y esta superficie tiene mal comportamiento con los adhesivos frágiles, sin embargo no influye demasiado en los adhesivos de baja resistencia porque suelen ser menos frágiles. La superficie que presenta mejores resultados de forma general es la PINTADA, seguida muy de cerca por la LIJADA, y seguida esta por la BLANCA.

La unión simple realizada con **CLINCHADO** proporciona muy poca resistencia cuando se realiza en chapa PINTADA (4.9 N/mm^2) (Tab. 11), muy inferior a cualquiera de los otros substratos utilizados. Esto se explica porque esta chapa es más delgada, ya que la resistencia de este tipo de uniones depende en gran medida del espesor de la chapa.

La unión simple realizada con **REMACHE** proporciona valores de resistencia muy similares en todos los substratos (Tab. 11), aunque son valores un poco inferiores que los obtenidos con clinchado.

La **resistencia mecánica de las uniones mixtas** realizadas con adhesivo y unión mecánica, es siempre inferior que la **suma de las uniones simples por separado** (Tab. 13 y Tab. 17). Esta pérdida de resistencia sobre la esperada es mayor en las uniones mixtas realizadas con CLINCHADO, que en las realizadas con REMACHE. La resistencia mecánica de la unión mixta realizada con clinchado, recupera un valor medio de resistencia con respecto a la suma de las dos uniones por separado del 55%, que en el mejor de los casos llega hasta el 76 % (MS+CL en chapa PINTADA) y en el peor de los casos se consigue el 37% (PUR+CLIN en chapa LIJADA). Cuando se realiza una unión mixta con remache la resistencia mecánica de la unión recupera un valor medio de 72% que puede llegar hasta el 88% (PUR+REM en chapa BLANCA) y en el peor de los casos se queda en un 35% (EPO+REM en chapa LIJADA).

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y clinchado, es en la mayoría de los casos superior a la resistencia obtenida con **solo clinchado** (Tab. 14). La superficie PINTADA es la que más favorece a la resistencia del clinchado sólo cuando se realiza la unión mixta, también la superficie galvanizada se comporta bien. De entre los adhesivos el que más favorece al clinchado es el CN, seguido del EPOXI. Los adhesivos MS y PUR tienen mal comportamiento en la unión mixta clinchada.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y clinchado, es en la mayoría de los casos superior a la resistencia obtenida con **solo adhesivo** (Tab. 15). Con chapa galvanizada y con adhesivo MS la resistencia es siempre superior a la del adhesivo. El adhesivo CN es el que más disminuye la resistencia de él mismo al realizar la unión mixta con clinchado.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y remache, es en todos los casos superior a la resistencia obtenida con **solo remache** (Tab. 18). El adhesivo que más favorece a la resistencia del remache es el CN (265%), y el que menos es el MS (135%). La superficie que más favorece a la resistencia del remache es la BLANCA (213%) y la que menos favorece es la GALVANIZADA (158%).

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y remache, en algunos casos es superior a la del **adhesivo solo** y en otros es inferior (Tab. 19). Con la chapa GALVANIZADA, es siempre superior. También es siempre superior con los adhesivos MS y PUR. Los adhesivos CN y EPO, cuando se realizan uniones mixtas con remache, en general pierden parte de su capacidad de resistencia, salvo la excepción en la superficie galvanizada.

La superficie GALVANIZADA, cuando se une con sólo adhesivo es la que proporciona peores resultados (Tab. 10), sin embargo al realizar la unión mixta con clinchado es de las que recupera un mayor porcentaje de la suma de las resistencias de uniones adhesivas y clinchada por separado (63%) (Tab. 13), por lo tanto la unión mixta con clinchado aporta un gran valor a las uniones realizadas con superficie GALVANIZADA. Algo parecido e incluso mejor ocurre cuando en esta superficie se realiza unión mixta con remache, en este caso el porcentaje de resistencia recuperado en esta chapa mayor que en cualquier otra (79%) (Tab. 17).

Se ha comprobado que el estado del adhesivo, ya **sea fresco o ya sea curado** durante la aplicación del remache en la unión mixta tiene bastante influencia en los resultados obtenidos (Tab. 21). Cuando este porcentaje es superior a 100 indica que es mejor el resultado de la unión cuando se realiza de inmediato (fresco) que cuando la unión del remache se realiza después de un cierto tiempo de haber realizado la unión simple con adhesivo (curado el adhesivo). Los resultados obtenidos son muy distintos según el tipo de adhesivo y según el tipo de superficie a unir, en unos casos aumenta la resistencia de la unión al realizarla de inmediato y en otros casos disminuye. De las 16 uniones realizadas en 9 casos han dado valores superiores a 100 y en 7 de los casos han dado valores inferiores a 100. El tipo de adhesivo no es un factor determinante en la resistencia que se obtienen en fresco o curado. Esto se comprueba al analizar los porcentajes de relación fresco/curado porque el valor medio de todos los adhesivos es muy cercano al 100 %. El tipo de superficie sí que tiene bastante influencia en el estado del adhesivo fresco o curado. La superficie PINTADA, tiene peor comportamiento realizando la unión con adhesivo fresco, siendo el valor medio de esta 74%. La superficie que mejor se comporta en este sentido es la superficie BLANCA, con un valor de 133%. En la GALVANIZADA el comportamiento también es bueno (118%), aunque hay una excepción con el adhesivo PUR (80%). La superficie LIJADA también tiene un buen comportamiento pero algo inferior a las anteriores (93%).

5.- DEFORMACIONES.

5.1.- Análisis general de deformaciones.

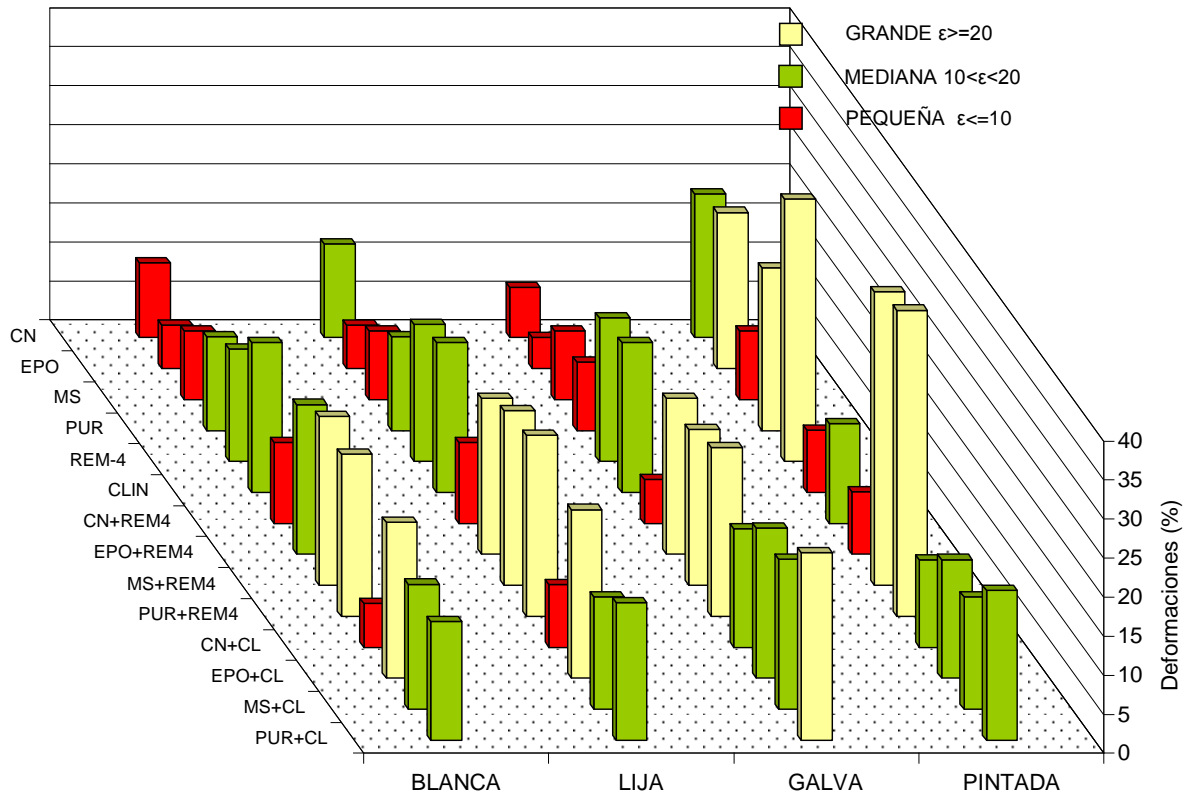


Figura 143. Deformaciones en el momento de la rotura.

Tabla 22. Deformaciones en el momento de la rotura.

| DEFORMACIONES (%) | | | | | |
|-------------------|--------|------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJA | GALVA | PINTADA | Promedio |
| CN | 10 | 12 | 6 | 18 | 12 |
| EPO | 6 | 6 | 4 | 20 | 9 |
| MS | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| PUR | 12 | 12 | 9 | 21 | 13 |
| REM-4 | 14 | 18 | 18 | 34 | 21 |
| CLIN | 19 | 19 | 19 | 8 | 16 |
| CN+REM4 | 10 | 10 | 6 | 13 | 10 |
| EPO+REM4 | 19 | 20 | 20 | 8 | 17 |
| MS+REM4 | 22 | 22 | 20 | 38 | 25 |
| PUR+REM4 | 21 | 23 | 22 | 39 | 26 |
| CN+CL | 6 | 8 | 15 | 11 | 10 |
| EPO+CL | 20 | 22 | 19 | 15 | 19 |
| MS+CL | 16 | 14 | 19 | 14 | 16 |
| PUR+CL | 15 | 18 | 24 | 19 | 19 |
| Promedio | 14 | 15 | 15 | 19 | 16 |

| | |
|---------|---------------|
| GRANDE | ≥ 20 |
| MEDIANA | $10 < A < 20$ |
| PEQUEÑA | ≤ 10 |

Las deformaciones que se han tenido en cuenta son las deformaciones totales que tienen las probetas en el momento de la rotura de la misma, es decir cuando ha habido separación total de ambos substratos. Estas deformaciones se han dividido por la longitud del adhesivo según la dirección del esfuerzo realizado, 12,5 mm, y se multiplica por 100, para dar los datos en tanto por ciento. Además se han agrupado las deformaciones en tres categorías, GRANDES, MEDIANAS y PEQUEÑAS (Fig. 143 y Tabla 18).

De lo anterior se deduce que:

- El tipo de sustrato tiene poca influencia, si acaso en la superficie PINTADA se comprueba un ligero aumento con respecto al otro tipo de superficies.
- Todas las uniones realizadas con cianoacrilato dan valores muy pequeños de alargamientos.
- El adhesivo MS, cuando se usa sólo también tiene valores muy pequeños de alargamientos.
- Los alargamientos grandes están muy asociados con las uniones mixtas, sobre todo cuando se realizan con REMACHE, y sobre todo con los adhesivos MS y PUR.

5.2.- Análisis detallados de las deformaciones.

1) SUPERFICIE BLANCA (Fig. 144).

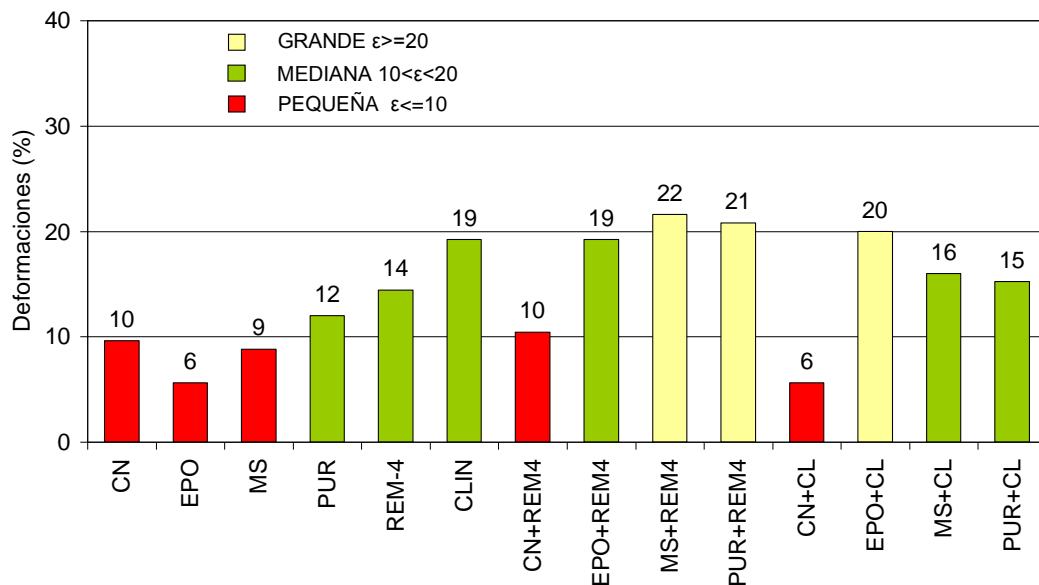


Figura 144. Deformaciones en la rotura en superficie BLANCA.

2) SUPERFICIE LIJADA (Fig. 145).

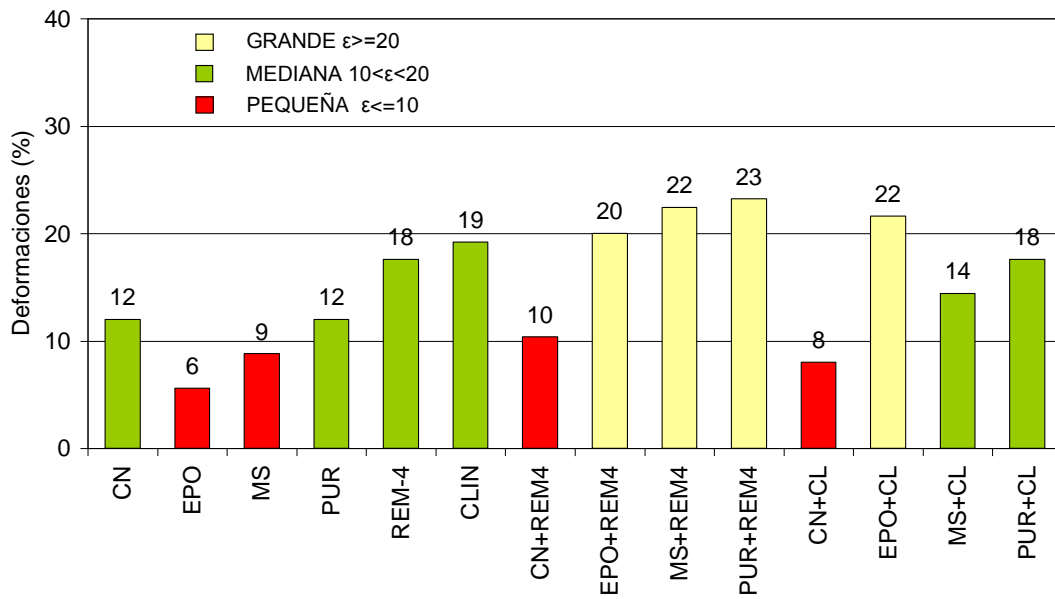


Figura 145. Deformaciones en la rotura en superficie LIJADA.

3) SUPERFICIE GALVANIZADA (Fig. 146).

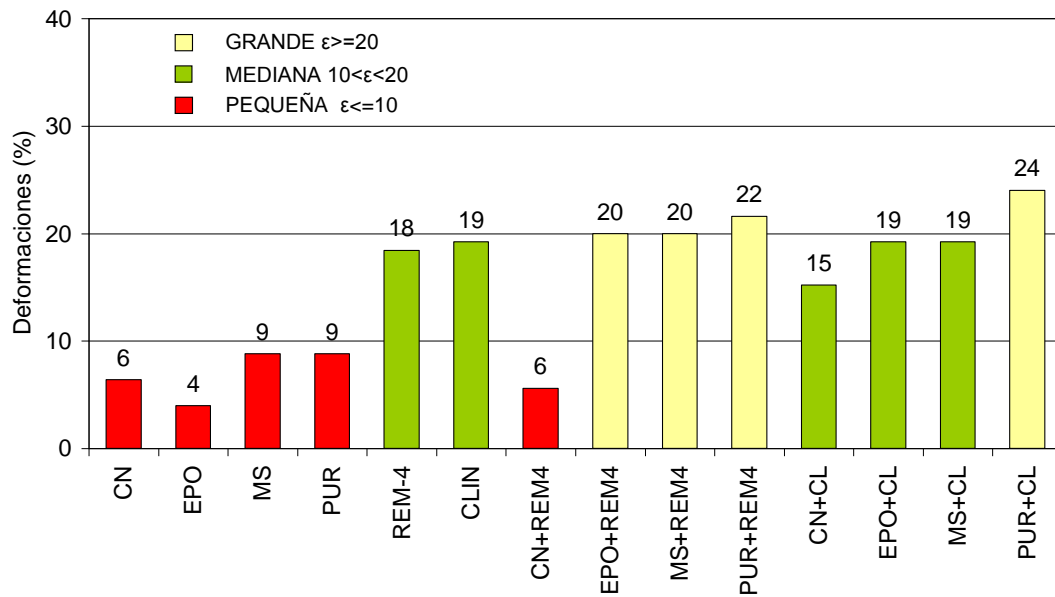


Figura 146. Deformaciones en la rotura en superficie GALVANIZADA.

4) SUPERFICIE PINTADA (Fig. 147).

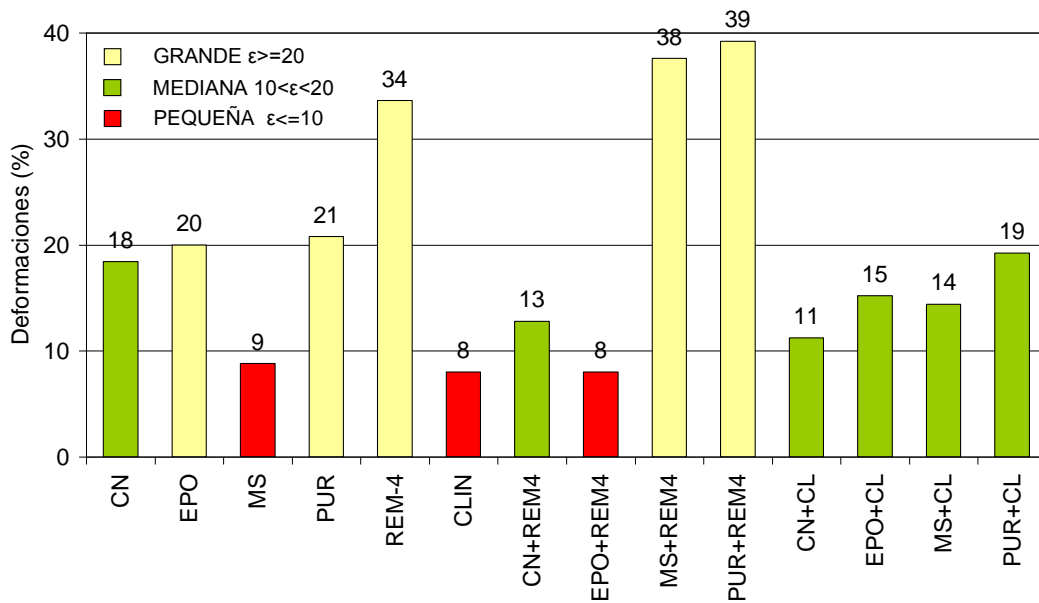


Figura 147. Deformaciones en la rotura en superficie PINTADA.

5.3.- Análisis de valores medios de deformaciones para cada unión.

Se ha realizado el valor medio de cada tipo de unión en los diferentes substratos y se han obtenido los resultados que se muestran en la Fig. 148.

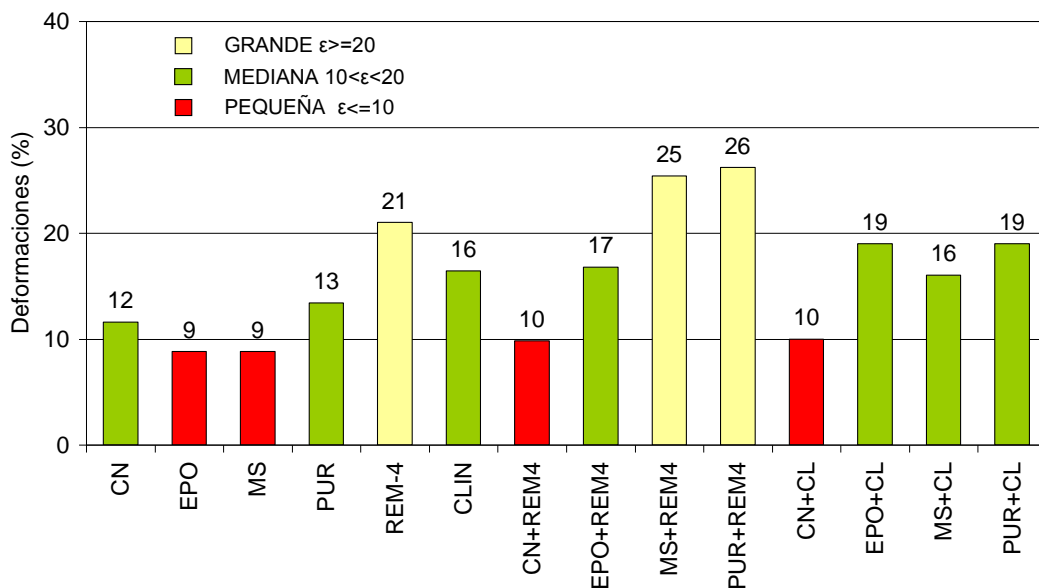


Figura 148. Deformaciones medias en la rotura por tipos de UNIONES.

De los cuales se deduce lo siguiente:

- El adhesivo CN, presenta siempre pequeñas deformaciones, ya sea sólo o con uniones mixtas.
- Los adhesivos EPO y MS, cuando actúan solos también tienen siempre pequeñas deformaciones.

- c) Los mayores alargamientos están asociados siempre a la unión mecánica del REMACHE, y a las uniones mixtas de éste con adhesivos.
- d) De entre los adhesivos el que mayor deformación tiene es el PUR.

5.4.- Análisis de valores medios de alargamiento para cada sustrato.

Se ha realizado el valor medio del alargamiento en cada tipo de sustrato en las diferentes uniones y se han obtenido los resultados indicados en la Fig. 149.

De donde se deduce lo siguiente:

- a) El tipo de sustrato utilizado no tiene prácticamente influencia en el alargamiento, ya que al hacer valores medios los resultados obtenidos son correspondientes a los del grupo MEDIO.
- b) Hay una excepción que es la chapa PINTADA, que destaca un poco de los demás aunque no significativamente. Es posible incluso que esta pequeña diferencia sea debida no al tipo de sustrato sino a que el espesor de esta chapa es menor que el de las otras tres.

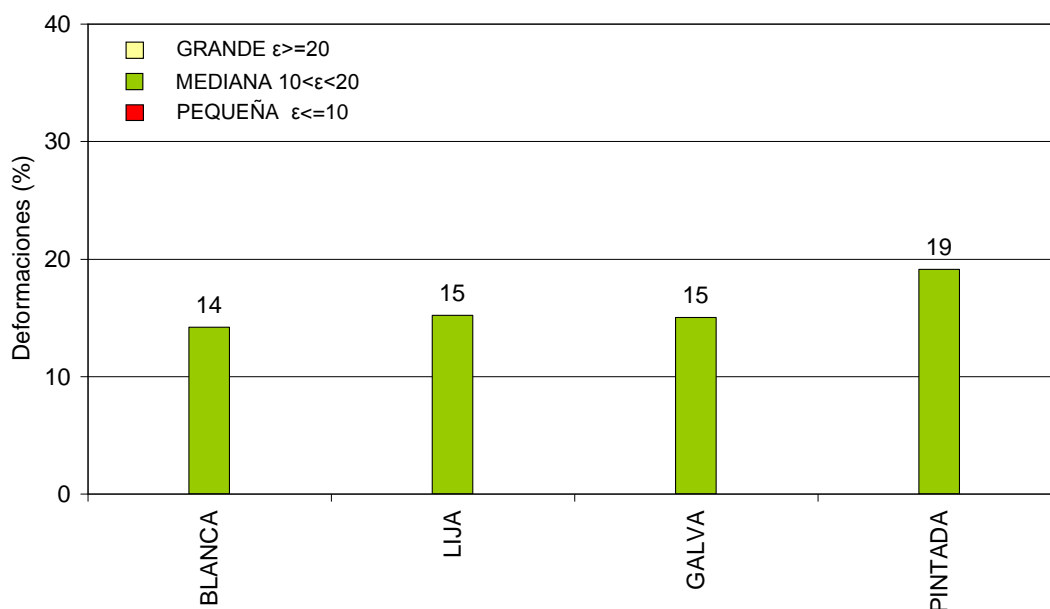


Figura 149. Deformaciones medias en la rotura de los distintos SUBSTRATOS.

5.5.- Aprendizajes conseguidos.

Las deformaciones grandes están muy asociadas con dos uniones mixtas (Tab. 22), las que se realizan con REMACHE junto con los adhesivos MS y PUR. Las deformaciones pequeñas están muy asociadas al adhesivo MS solo y al adhesivo EPO solo, en este último caso hay una excepción que corresponde a la unión de EPO en sustrato pintado en el que la deformación es muy grande. Los adhesivos solos en superficie GALVANIZADA dan valores muy pequeños de deformación y aumentan mucho sus deformaciones cuando se emplean en uniones mixtas. Las uniones mecánicas dan mayores deformaciones que las uniones adhesivas. Las uniones mixtas dan mayores deformaciones en general, con la excepción de las uniones realizadas con cianoacrilato, las cuales en algunos casos al realizar la unión mixta dan menores deformaciones que solos.

El tipo de adhesivo influye decisivamente en las deformaciones de la unión. El adhesivo poliuretano es el que presenta mayor deformación, debido a que este adhesivo es ya de por sí más elástico que los demás. También se obtienen buenos alargamientos con el adhesivo CN, lo cual no es debido a que él sea elástico pues es todo lo contrario, es mas bien debido a que ofrece gran capacidad de resistencia y lo que se deforma no es el adhesivo sino el propio metal base, por eso el adhesivo CN en el sustrato pintada que es la mas delgada tiene alargamientos también muy grandes del 18 %, aunque no tanto como el PUR que tiene 21 %. El adhesivo MS, cuando se usa sólo tiene valores de deformación muy pequeños. El adhesivo EPO solo, tiene deformaciones muy pequeñas, aunque en este caso hay una excepción que tiene lugar con la chapa pintada y sus valores son muy altos, 20 %, lo cual se debe en este caso a la deformación del sustrato y no al adhesivo.

El tipo de superficie tiene poca influencia en las deformaciones. Aunque en la superficie PINTADA, se puede destacar que se obtienen valores medios de deformación superiores a los de las demás superficies. En este caso es debido a que el espesor de esta chapa es menor y por tanto se alarga más que las más gruesas.

La acción de la unión mixta en las deformaciones es muy variable. Cuando la unión mixta se hace con adhesivos MS, PUR y EPO aumentan la deformación de la unión mecánica. Y en el caso del CN mantienen la misma deformación que tenía el adhesivo.

6.- ADHERENCIA EN CADA TIPO DE SUPERFICIE.

6.1.- Consideraciones generales.

El grado de adherencia que tiene una unión con adhesivo se ha medido por el porcentaje de rotura cohesiva que ha tenido cada unión (Tabla 19). Los distintos tipos de unión se han clasificado en tres grupos atendiendo al tipo de rotura, **rotura cohesiva**, **mixta** y **adhesiva**.

Tabla 23. Grado de adherencia en cada tipo de unión con adhesivo.

| ROTURA COHESIVA (%) | | | | | Promedio |
|---------------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA | |
| CN | 61 | 76 | 0 | 98 | 59 |
| EPO | 0 | 0 | 0 | 100 | 25 |
| MS | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| PUR | 60 | 90 | 0 | 100 | 63 |
| Promedio | 55 | 66 | 25 | 100 | 62 |

| | |
|----------|---------|
| COHESIVA | %>75 |
| MIXTA | 25<%<75 |
| ADHESIVA | %<25 |

La representación gráfica de los valores de cohesión se muestran en la Fig. 150.

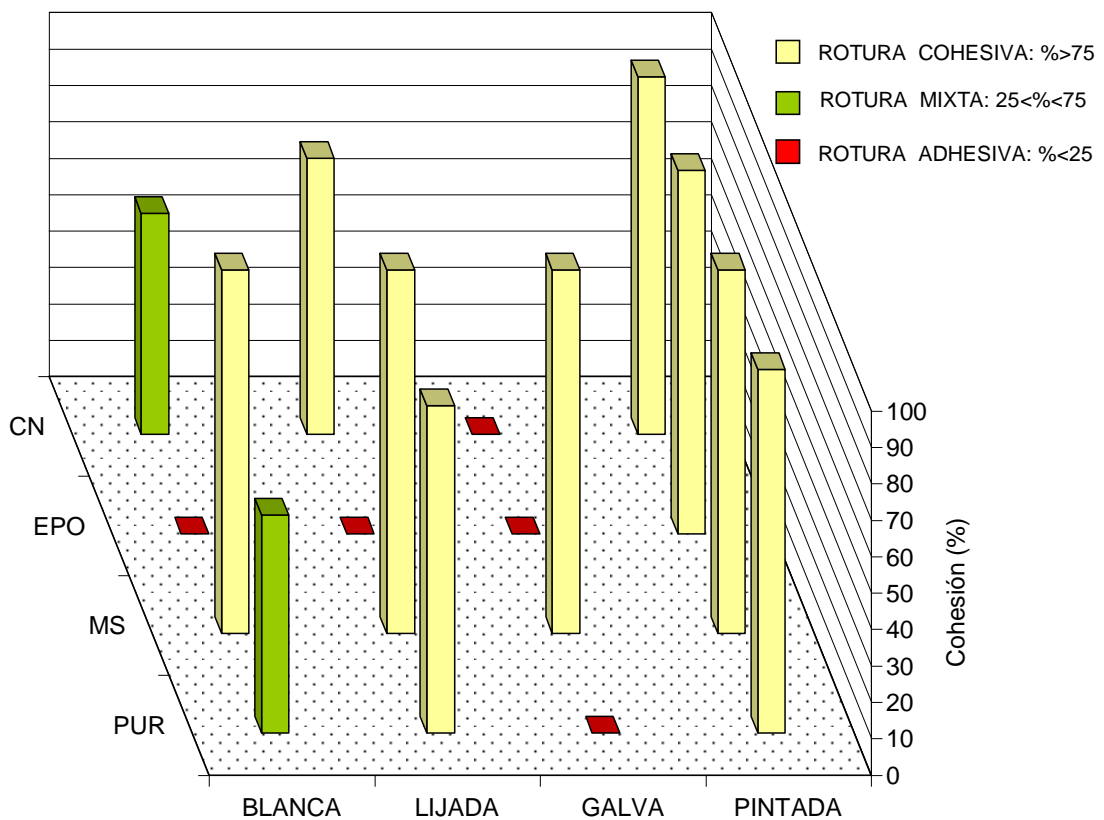


Figura 150. Representación gráfica del grado de adherencia de cada tipo de unión con adhesivo.

6.2.- Aprendizajes conseguidos.

El sustrato que presenta mejor adherencia es el PINTADO (Tab. 23), ya que los resultados indican que la rotura en casi todos los casos ha sido cohesiva independientemente del tipo de adhesivo utilizado. Y la peor adherencia se da en el sustrato GALVANIZADO, no obstante en este sustrato y con el adhesivo MS la adherencia es muy buena (100 % cohesiva). Los sustratos BLANCA y LIJADA dan valores intermedios y muy parecidos.

El adhesivo que proporciona mejor adherencia es el MS, que en todos los casos incluido el sustrato GALVANIZADO, consigue unión cohesiva 100%. El peor adhesivo en cuanto a la adherencia es el EPOXI, que a excepción del sustrato PINTADO, en todos los casos se obtienen roturas de tipo adhesiva. Los otros dos adhesivos CN y PUR dan valores intermedios muy similares.

7.- TIPO DE ROTURA, DÚCTIL O FRÁGIL.

7.1.- Introducción.

La separación de los substratos unidos tiene lugar en cada probeta de formas variadas. Atendiendo a la forma de romperse la unión se han clasificado las probetas según tres tipos: un grupo de ellas rompe en el instante en que la tensión cortante tiene un valor máximo, a estas probetas se les considera que el tipo de rotura que tienen es FRÁGIL (Fig. 151), otras rompen después de haber alcanzado la tensión máxima cuando se han estirado considerablemente, con tensiones inferiores a la máxima, a este grupo de probetas se les ha llamado de rotura DÚCTIL (Fig. 152), y un tercer grupo de probetas que no hay uniformidad en el tipo de rotura, es decir de los 6 ensayos del mismo tipo la mitad dan frágil y la otra mitad dúctil, a estas las hemos llamado de rotura FRÁGIL/DÚCTIL (Fig. 153).

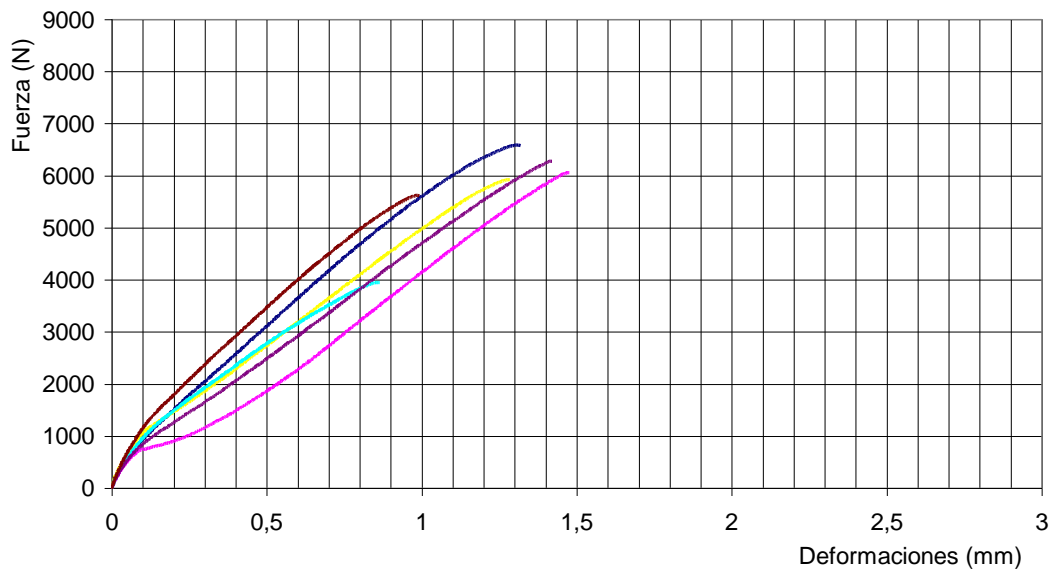


Figura 151. Ejemplo de uniones que presentan rotura FRÁGIL.
(Uniones realizadas con adhesivo cianoacrilato en superficie blanca).

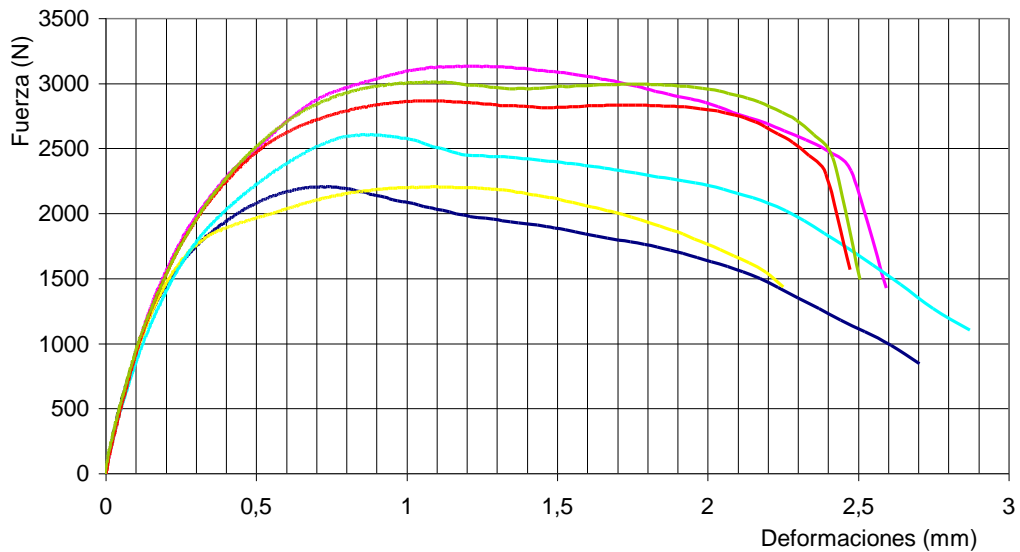


Figura 152. Ejemplo de uniones que presentan rotura DÚCTIL.
(Uniones realizadas por clinchado en superficie blanca).

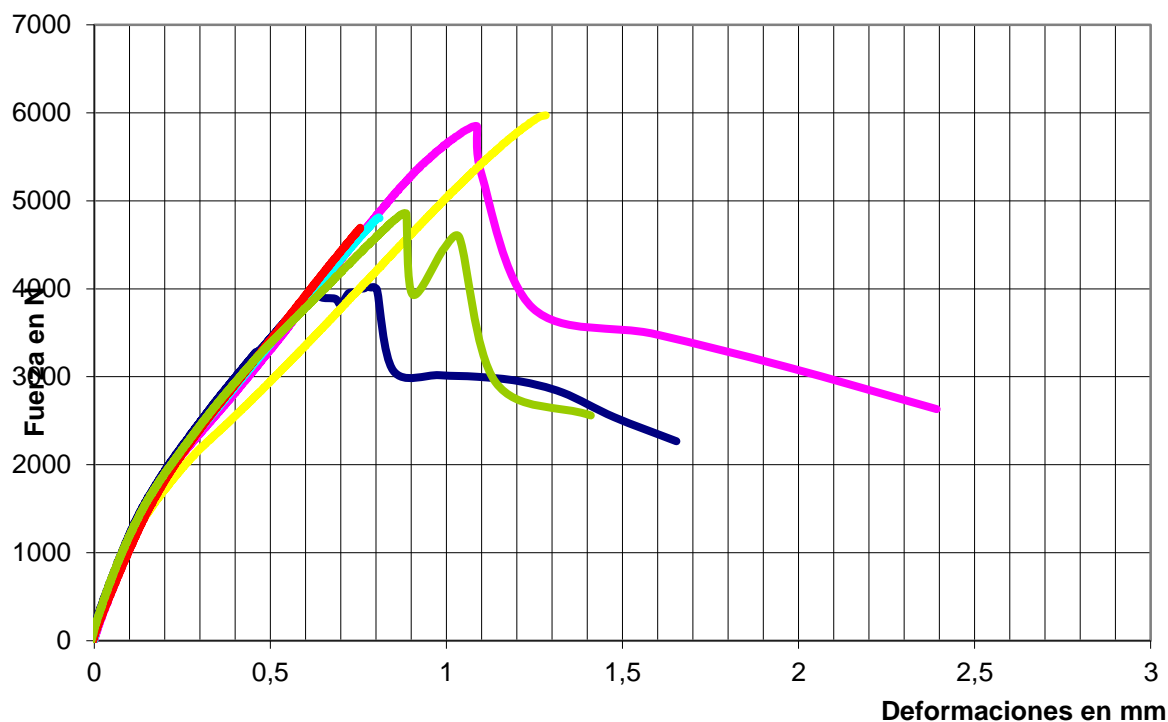


Figura 153. Ejemplo de uniones que presentan rotura FRÁGIL/DÚCTIL.
(Uniones realizadas con adhesivo Cianoacrilato mas Clinchado en superficie Lijada).

7.2.- Análisis y clasificación por tipos de rotura.

A continuación se indican los tipos de rotura DÚCTIL, FRÁGIL/DÚCTIL o FRÁGIL, que han tenido lugar en las diferentes uniones (Tabla 24 y Fig. 154).

Tabla 24. Resultados del tipo de rotura DÚCTIL o FRÁGIL que tiene cada unión.

| TIPO DE ROTURA: DUCTIL O FRÁGIL | | | | |
|---------------------------------|--------|------|-------|---------|
| | BLANCA | LIJA | GALVA | PINTADA |
| CN | 1 | 1 | 1 | 1 |
| EPO | 1 | 1 | 1 | 1 |
| MS | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUR | 1 | 1 | 1 | 1 |
| REM-4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| CLIN | 4 | 4 | 4 | 4 |
| CN+REM4 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| EPO+REM4 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| MS+REM4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| PUR+REM4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| CN+CL | 2 | 2 | 4 | 1 |
| EPO+CL | 4 | 4 | 4 | 1 |
| MS+CL | 4 | 4 | 4 | 4 |
| PUR+CL | 4 | 4 | 4 | 4 |

| | |
|---|---------------|
| 4 | DÚCTIL |
| 2 | FRÁGIL/DÚCTIL |
| 1 | FRÁGIL |

De lo anterior se deduce que:

- Los adhesivos siempre dan rotura frágil.
- Las uniones mecánicas siempre dan rotura dúctil.
- Las roturas F/D se producen sólo en uniones mixtas.
- El tipo de sustrato no influye en el tipo de rotura.

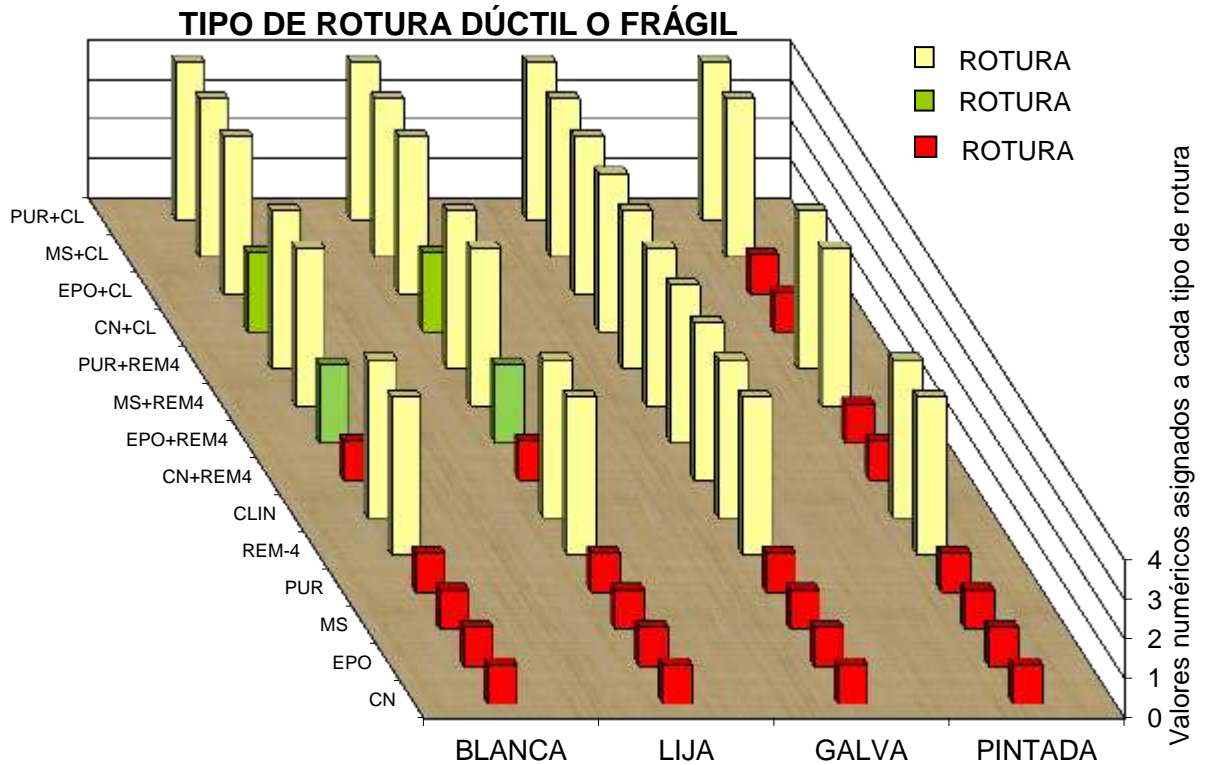


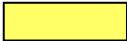


Figura 154. Indicación gráfica del tipo de rotura DÚCTIL o FRÁGIL que tiene cada unión.

7.3.- Aprendizajes conseguidos.

Los adhesivos siempre dan rotura frágil y las uniones mecánicas rotura dúctil. La unión mixta proporciona ductilidad de rotura a la unión. La uniones mixtas que han dado rotura frágil es debido a que el adhesivo tenía mucho mayor resistencia que la unión mecánica, en concreto para valores superiores a 3 siempre da rotura frágil (Tab. 25) y cuando falla el adhesivo la unión mecánica ya no tiene recorrido para realizar la deformación plástica. También se verifica que cuando esta relación es inferior a 2 siempre da rotura dúctil.

Tabla 25. Rotura frágil o dúctil en uniones híbridas. Los valores en la tabla indican el resultado de dividir la tensión de rotura de la unión simple con adhesivo y la unión simple con remache o con clinchado.

| FRAGILIDAD EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA DEL ADHESIVO Y LA UNIÓN MECÁNICA | | | | |
|--|--------|--------|-------|---------|
| | BLANCA | LIJADA | GALVA | PINTADA |
| CN+REM4 | 3,5 | 3,5 | 1,4 | 3,0 |
| EPO+REM4 | 2,1 | 2,3 | 0,9 | 3,4 |
| MS+REM4 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| PUR+REM4 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,2 |
| CN+CL | 2,3 | 2,3 | 1,1 | 3,9 |
| EPO+CL | 1,4 | 1,5 | 0,7 | 4,4 |
| MS+CL | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 |
| PUR+CL | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |

| | |
|---|----------------------|
|  | Rotura dúctil |
|  | Rotura frágil-dúctil |
|  | Rotura frágil |

8.- RIGIDEZ DE LA UNIÓN.

8.1.- Rigidez de las uniones realizadas con adhesivos.

Las uniones realizadas con los adhesivos rígidos (Cianoacrilato y Epoxi), presentan una rigidez similar a la del material base (Fig. 155 y 156). Y cuando las uniones se realizan con adhesivos flexibles (MS y Poliuretano) (Fig. 157 y 158), entonces la rigidez de la unión es sensiblemente inferior a la del sustrato.

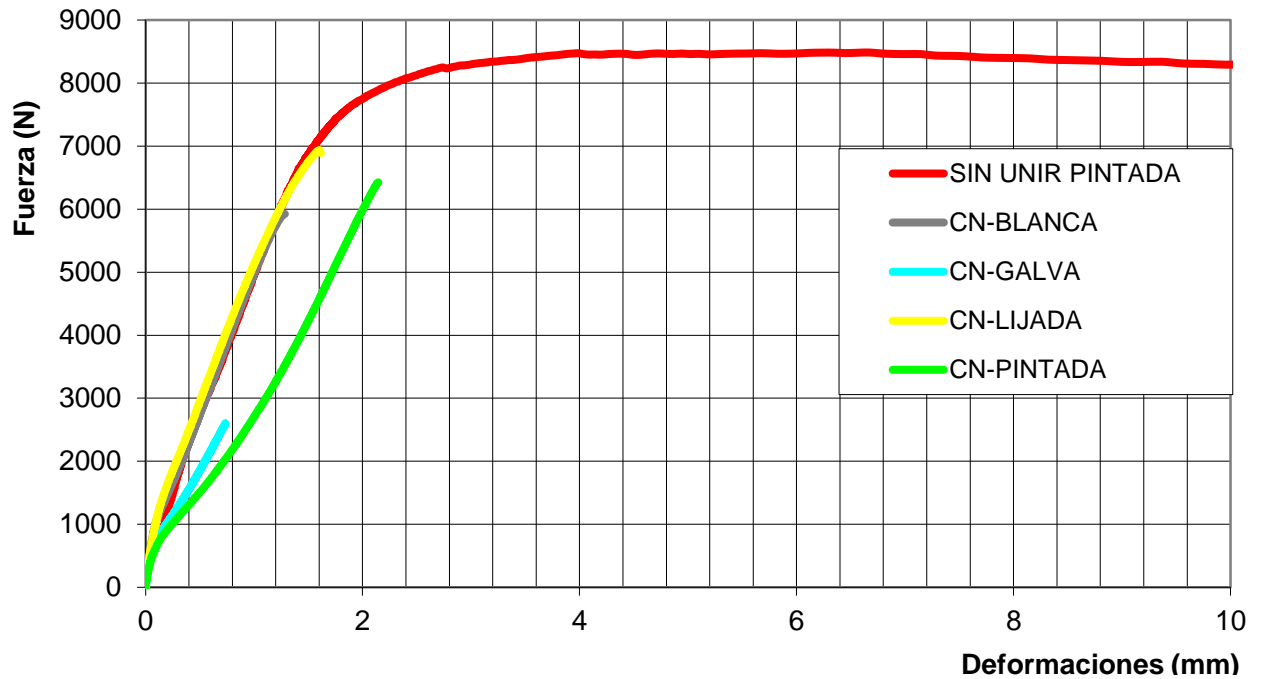


Figura 155. Uniones realizadas con adhesivo CIANOACRILATO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

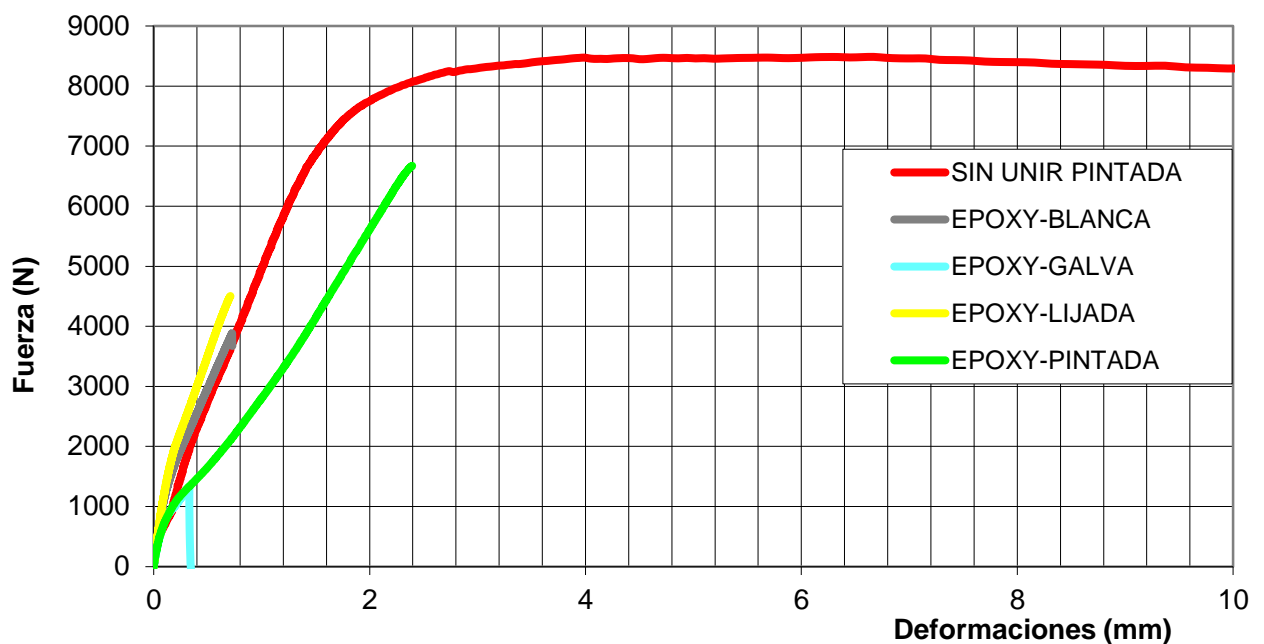


Figura 156. Uniones realizadas con adhesivo EPOXI en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

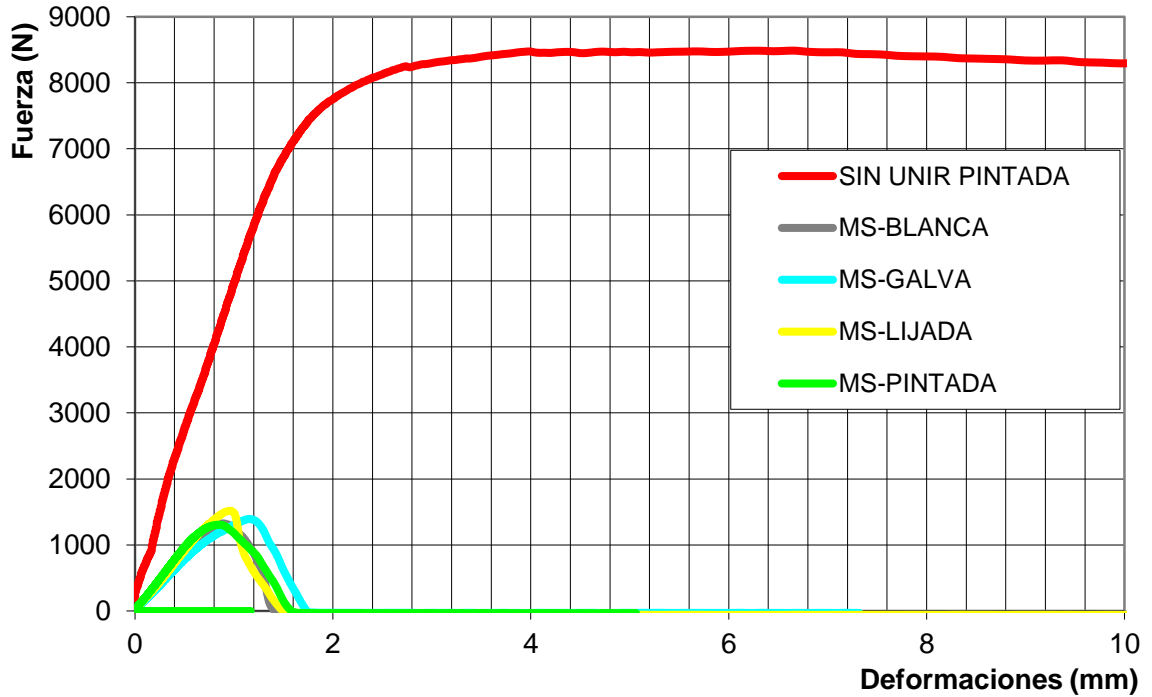


Figura 157. Uniones realizadas con adhesivo SILANO MODIFICADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

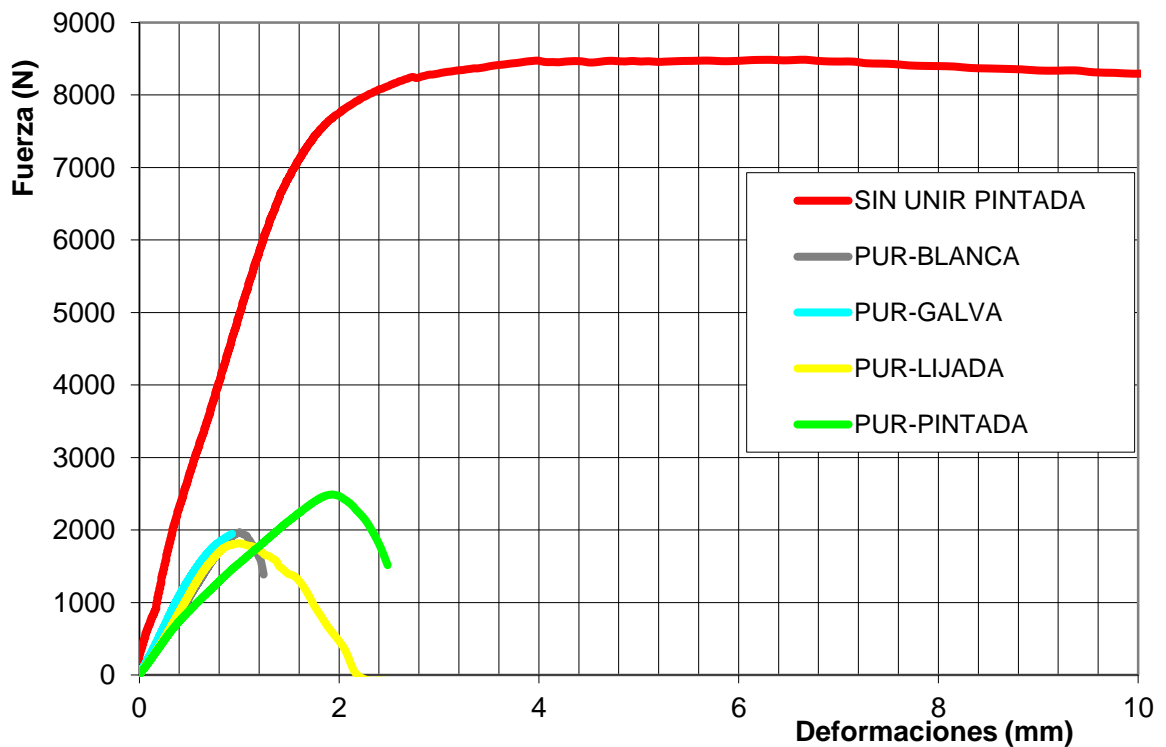


Figura 158. Uniones realizadas con adhesivo POLIURETANO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

8.2.- Rigidez de las uniones de tipo mecánico.

Las dos uniones de tipo mecánico (Clinchado y Remachado), proporcionan buena rigidez en los substratos de acero BLANCA y LIJADA. En el substrato pintado la rigidez es sensiblemente inferior a la del metal base. Y el substrato GALVANIZADO proporciona mejor rigidez con el remache que con el clinchado (Fig. 159 y 160).

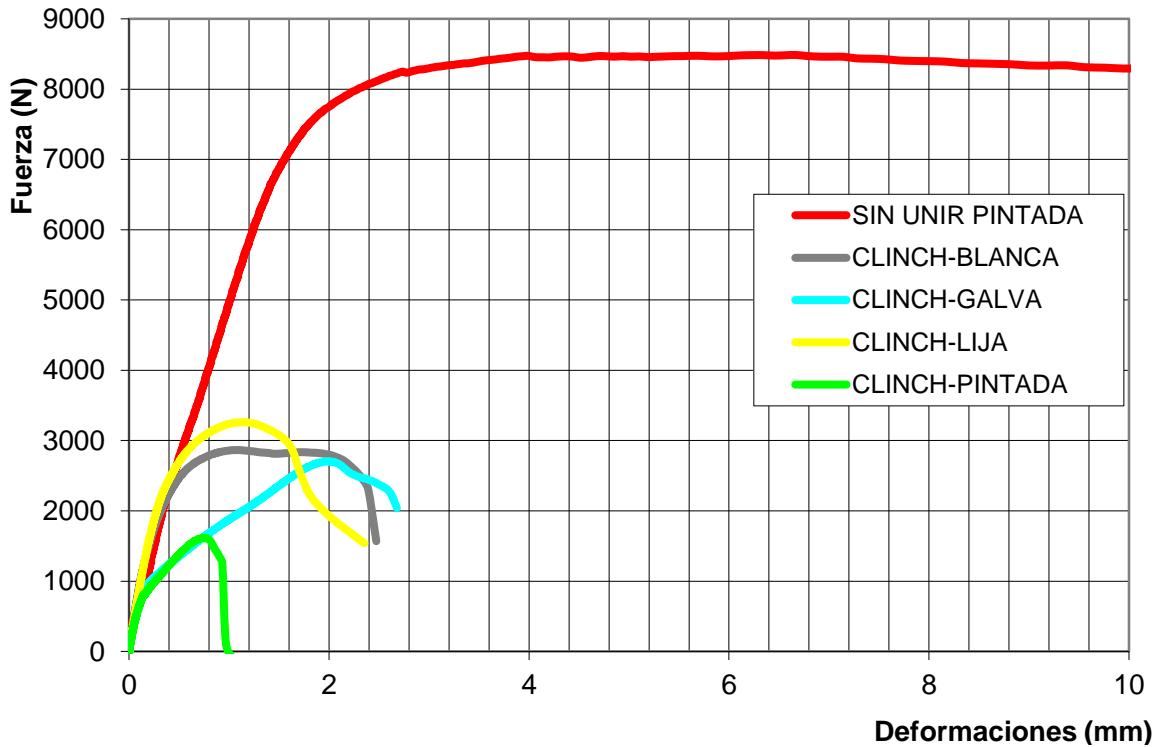


Figura 159. Uniones realizadas con unión mecánica CLINCHADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

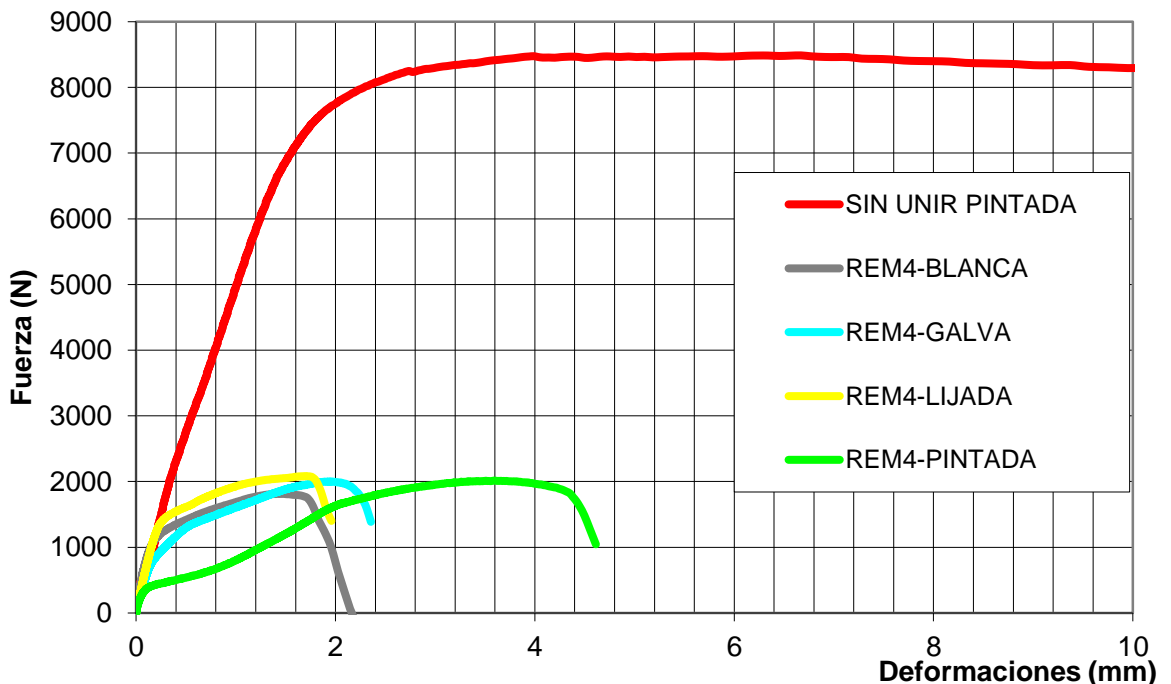


Figura 160. Uniones realizadas con unión mecánica REMACHE en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

8.3.- Rigidez de las uniones híbridas.

Las uniones híbridas realizadas con adhesivo rígido CIANOACRILATO han mejorado la rigidez de la unión con respecto de la unión mecánica tanto en la clinchada como en la remachada (fig.161 y 162), siendo similar a la del sólo adhesivo.

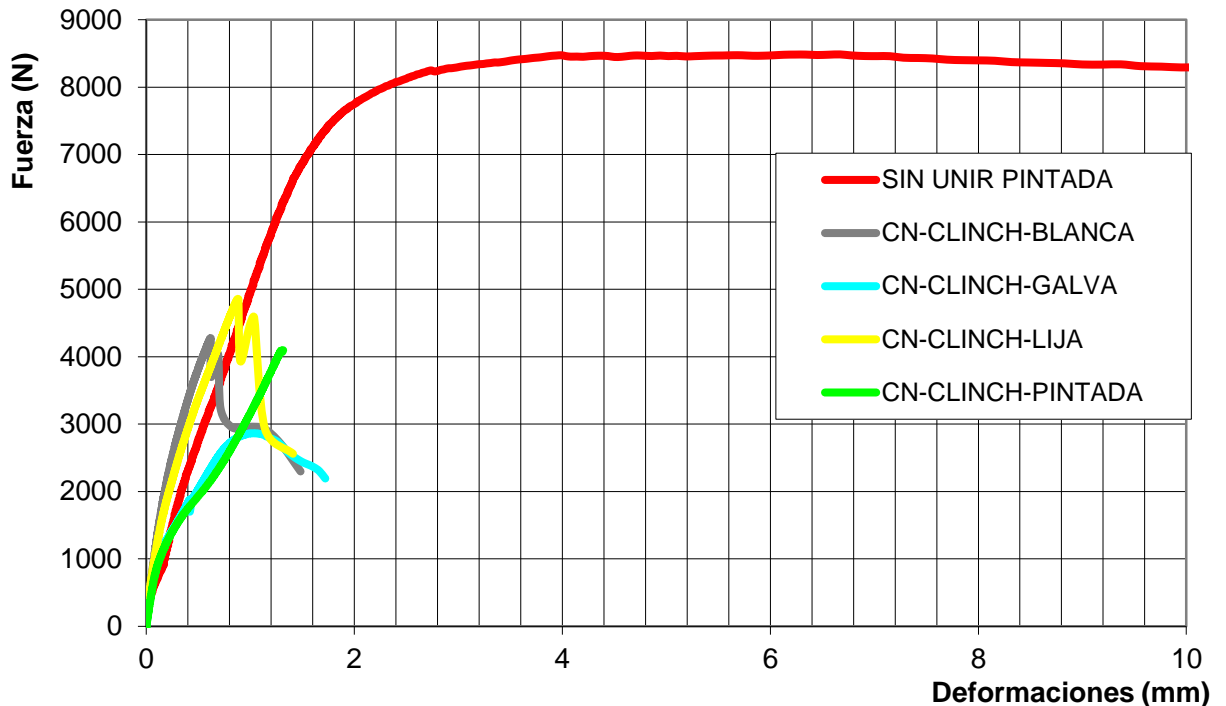


Figura 161. Uniones realizadas con unión híbrida CIANOACRILATO + CLINCHADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

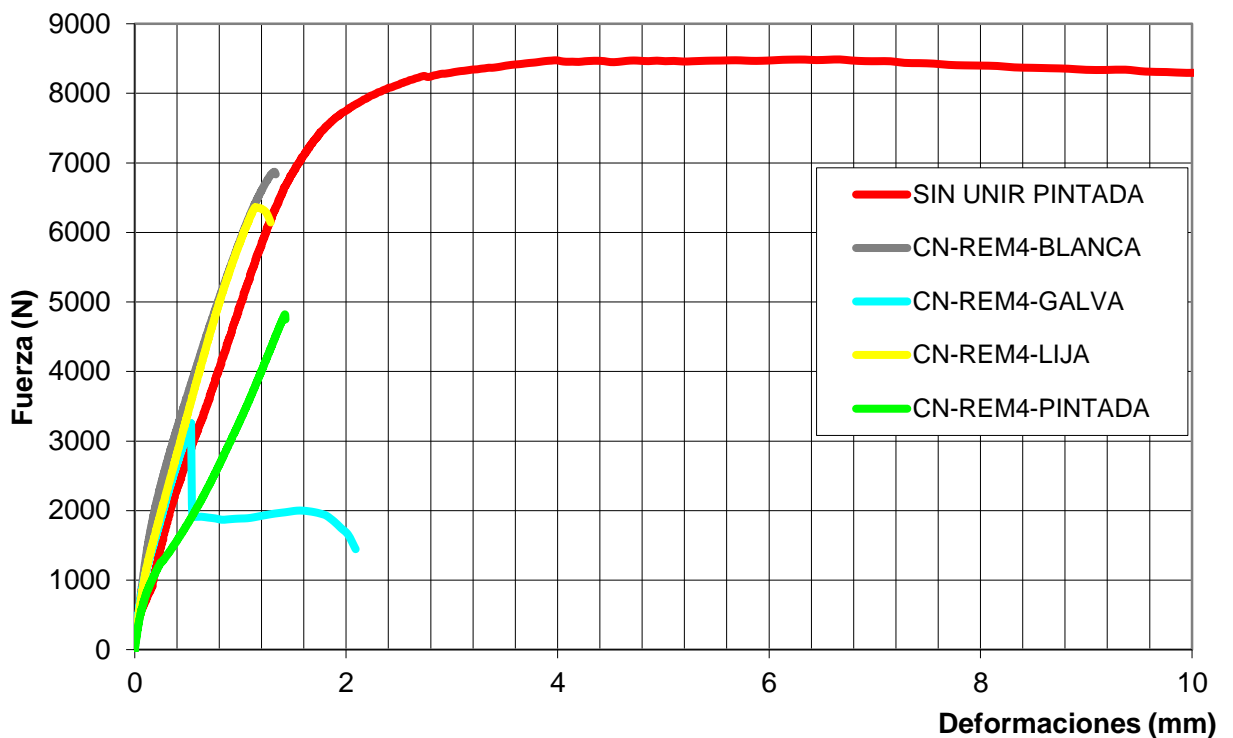


Figura 162. Uniones realizadas con unión híbrida CIANOACRILATO + REMACHE en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

Las uniones híbridas realizadas con adhesivo rígido EPOXY mejoran muy poco la rigidez de la unión con respecto de la unión mecánica, tanto la clinchada como la remachada (Fig.163 y 164), dando resultados de rigidez algo inferiores a los obtenidos con sólo adhesivo.

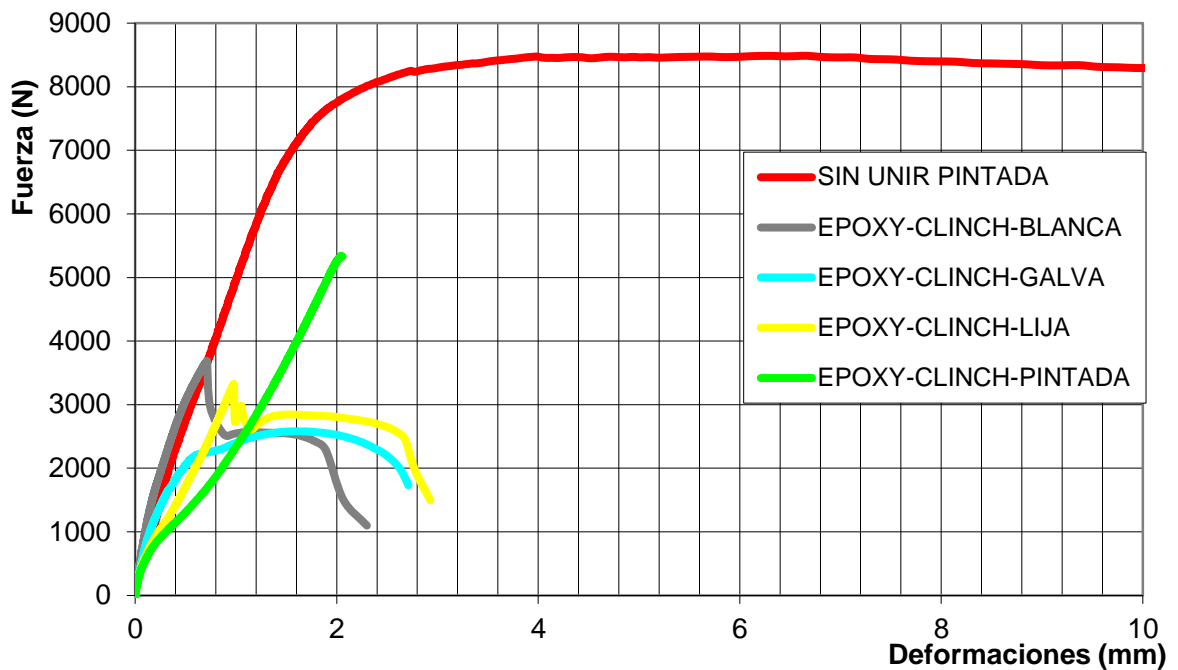


Figura 163. Uniones realizadas con unión híbrida EPOXI + CLINCHADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

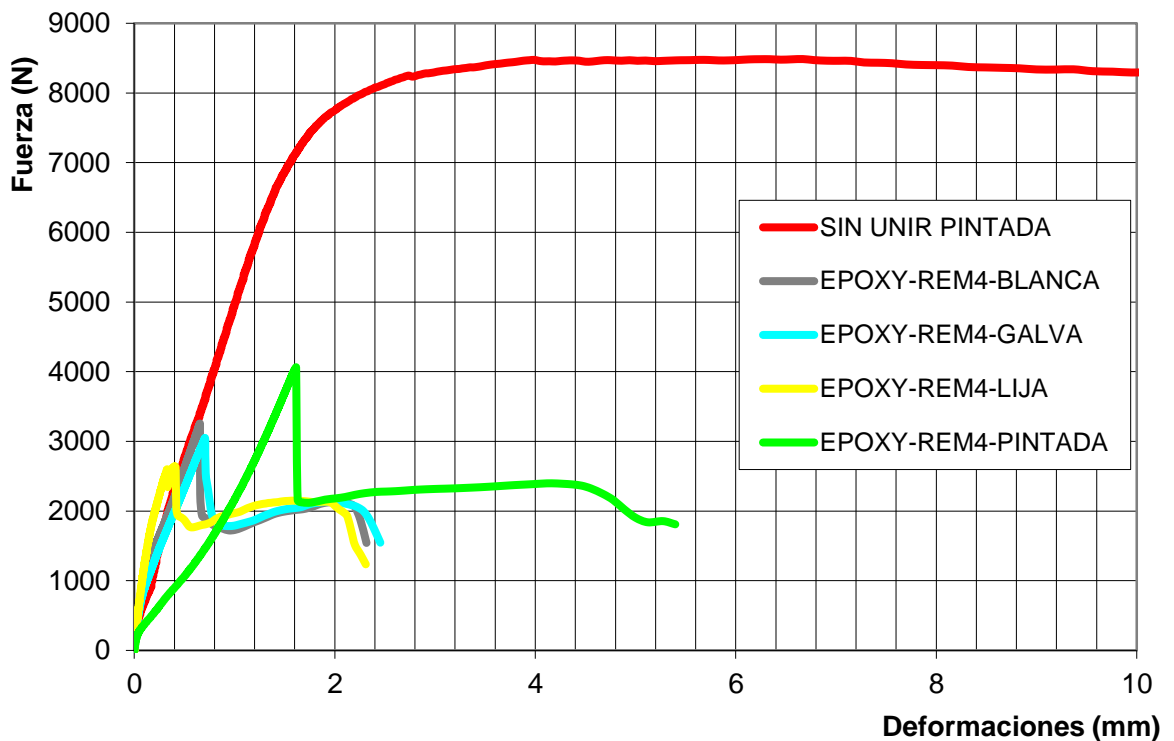


Figura 164. Uniones realizadas con unión híbrida EPOXI + REMACHE en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

Las uniones híbridas realizadas con adhesivo flexible MS, tanto las realizadas con clinchado como las realizadas con remache, mejoran mucho la rigidez de la unión con respecto de la unión adhesiva, e incluso mejoran la rigidez de la unión mecánica, dando mucha uniformidad en la curva de rotura con todos los substratos. (Fig. 165 y 166).

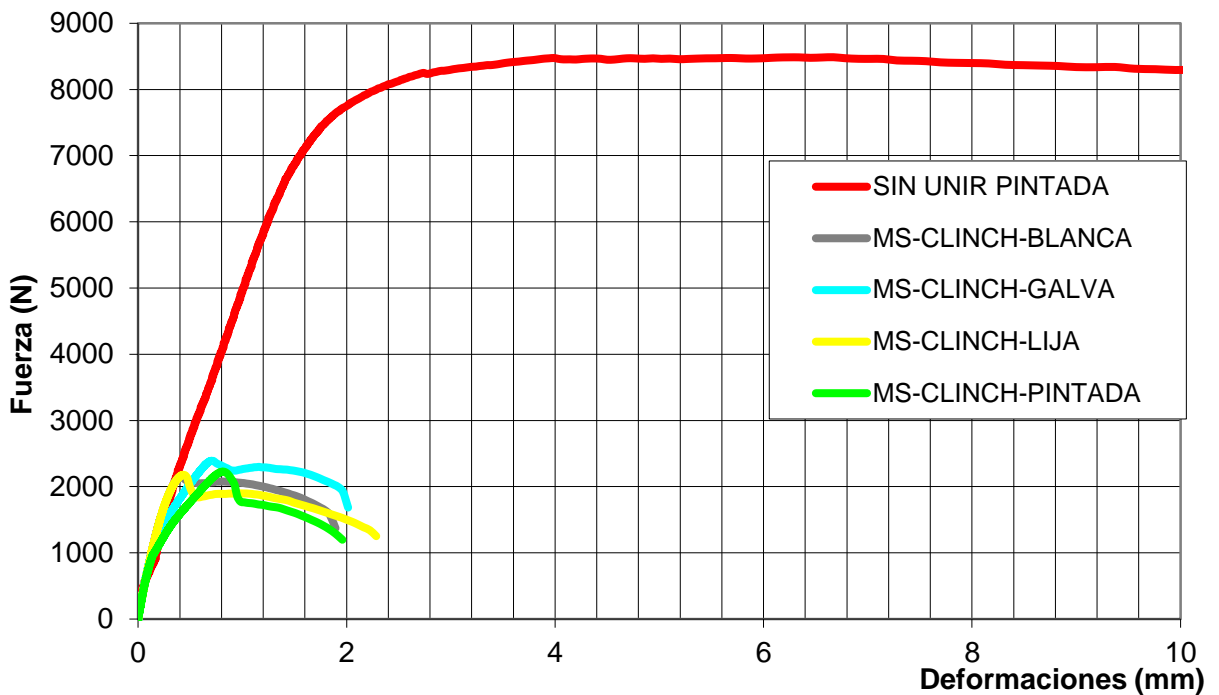


Figura 165. Uniones mixtas realizadas con MS+CLINCHADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

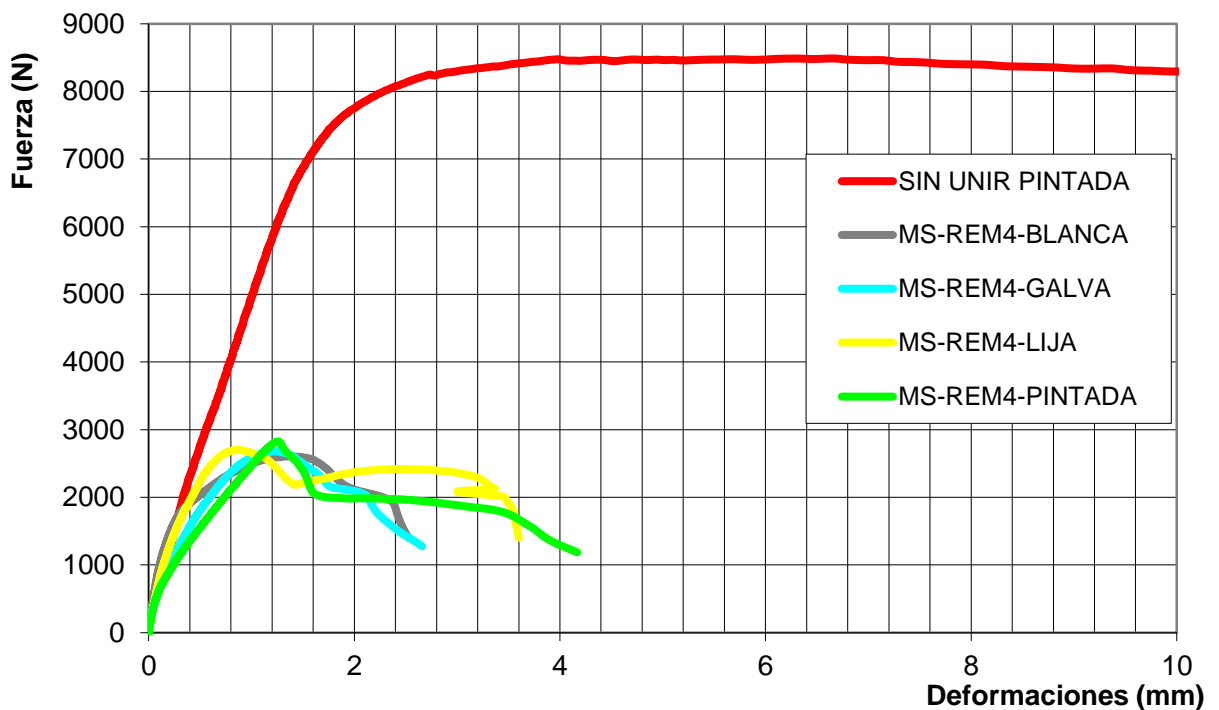


Figura 166. Uniones mixtas realizadas con MS+REMACHE en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

Las uniones híbridas realizadas con adhesivo flexible POLIURETANO, tanto las realizadas con clinchado como las realizadas con remache, aumentan la rigidez de la unión con respecto de la unión adhesiva, e incluso aumentan la rigidez de la unión mecánica. No obstante las mejoras de rigidez son algo inferiores que lo conseguido con las uniones híbridas realizadas con adhesivo MS (Fig. 167 y 168).

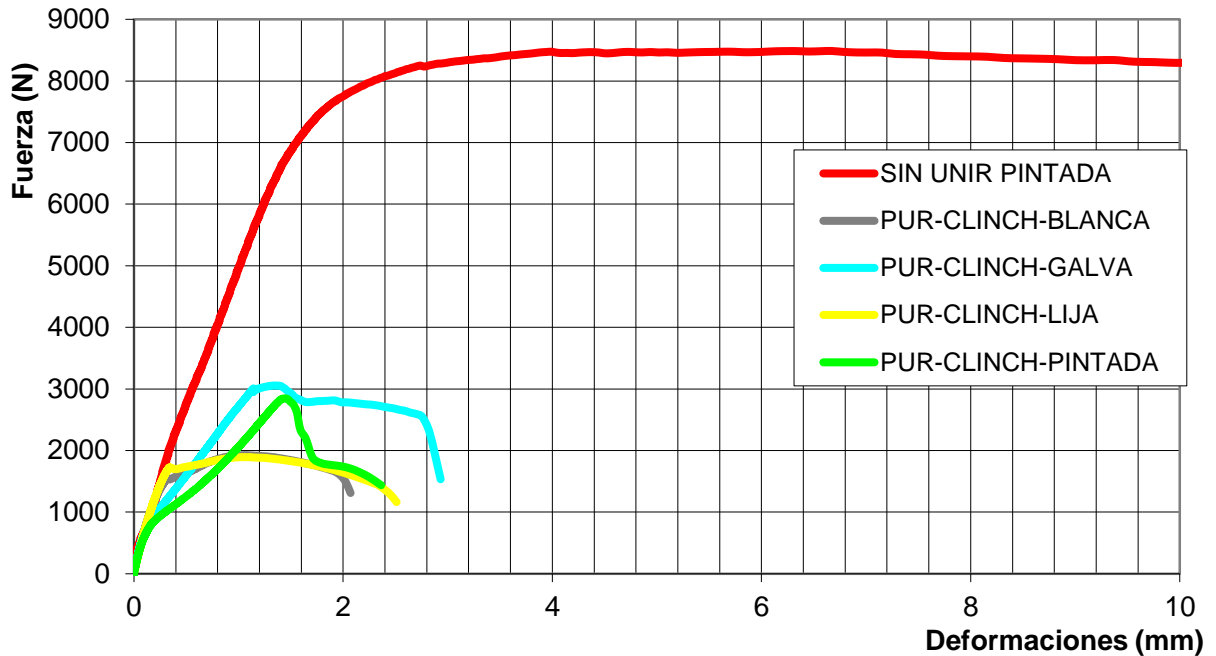


Figura 167. Uniones mixtas realizadas con POLIURETANO+CLINCHADO en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

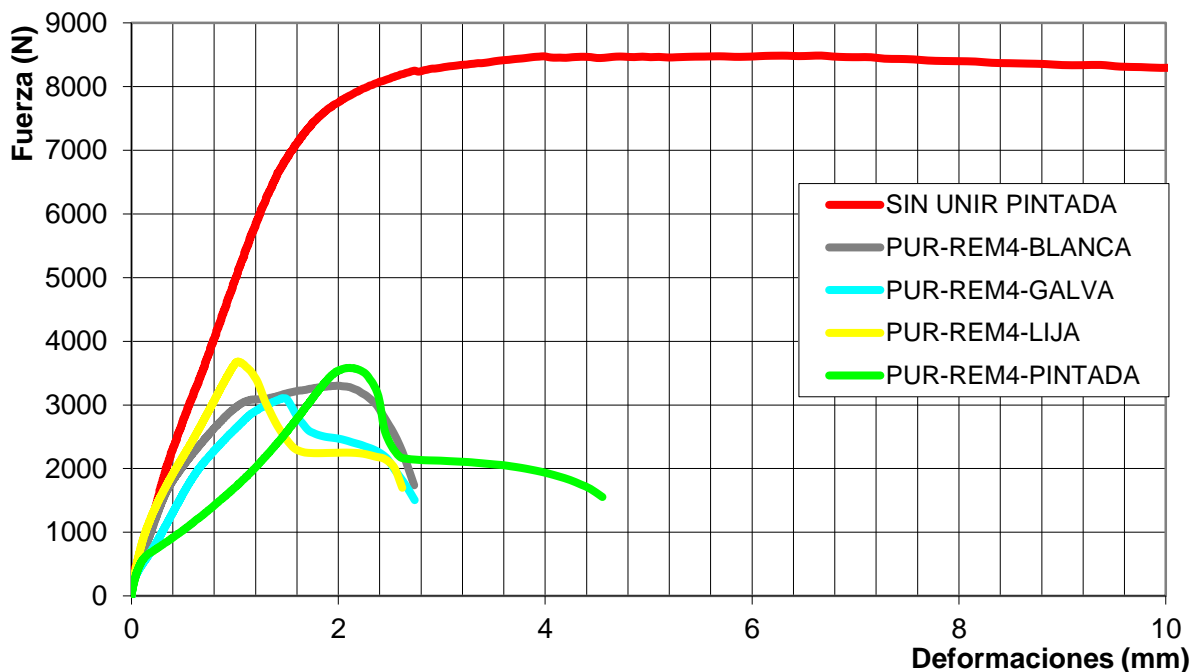


Figura 168. Uniones mixtas realizadas con POLIURETANO+REMACHE en los diferentes tipos de superficies. Se ha representado un ejemplo representativo de cada tipo.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

5.- CONCLUSIONES

1.- Introducción.

La realización de uniones estructurales en chapas de bajo espesor requiere la combinación de un número importante de parámetros para la obtención de uniones fiables y de resistencia adecuadas. Las condiciones de unión y las propiedades obtenidas presentan importantes variaciones ligadas a las condiciones de diseño y ejecución tanto en uniones mecánicas como especialmente en uniones adhesivas o mixtas (unión mecánica más unión adhesiva) también conocidas como uniones híbridas.

La realización de este trabajo ha permitido estudiar y comprender una gran cantidad de variables que afectan a las propiedades de las uniones adhesivas. Se ha comprobado la necesidad de que todos los elementos que intervienen en la unión sean diseñados y fabricados adecuadamente para poder conseguir una unión eficaz que permita obtener las mejores propiedades del adhesivo y de los materiales que une. Las conclusiones obtenidas en el análisis de los parámetros que intervienen en la realización de uniones estructurales, mecánicas y mixtas estudiadas en esta tesis han sido los siguientes:

2.- Espesor del adhesivo.

La resistencia a cortadura de uniones a solape, realizadas con adhesivos flexibles varía notablemente en función del espesor de adhesivo utilizado. Cuanto menor es el espesor del adhesivo mayor resistencia mecánica se obtiene, descendiendo ésta a medida que aumenta el espesor.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el efecto de capa delgada es muy destacado con espesores de adhesivo inferiores a 0,5 mm. A espesores superiores, al ser un adhesivo flexible, además de cortadura van aumentando las fuerzas de pelado, lo que hace que la resistencia del adhesivo vaya descendiendo de forma gradual. En todas las uniones estudiadas, el fallo se ha producido por cohesión, lo que indica la obtención de una buena adhesión metal-adhesivo.

En las uniones realizadas con adhesivo poliuretano, el desplazamiento total a rotura presenta un comportamiento inverso al de resistencia máxima, obteniéndose mayores desplazamientos a mayor espesor del adhesivo. Sin embargo, los desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo presentan un comportamiento proporcional a la resistencia máxima, obteniéndose menores desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo a mayor espesor de adhesivo.

3.- Resistencia a la rotura.

La resistencia se ha determinado por ensayos de cizalladura por tracción a solape simple, sometiendo a las uniones estudiadas a un desplazamiento constante.

La naturaleza del adhesivo tiene una influencia directa en la resistencia de las uniones. De los cuatro adhesivos estudiados en este trabajo, dos proporcionan valores altos, el cianoacrilato (CN), seguido muy de cerca del epoxi (EPO), y los otros dos valores bajos, como el poliuretano (PUR) o muy bajos, como el silano modificado (MS).

La influencia del binomio adhesivo-superficie en la resistencia de la unión es igualmente decisiva. El adhesivo influye en función de sus características internas: cohesión, pero también en la adhesión. La naturaleza de la superficie y su estado (acabado, tratamiento, etc.) condiciona la capacidad de adhesión. El adhesivo que ha mostrado ser más

susceptible a las condiciones superficiales es el CN y en segundo lugar el EPO. Dos de los adhesivos han demostrado menor sensibilidad al estado superficial: el PUR y el MS.

El aumento de la rugosidad de la superficie mediante un tratamiento de lijado ha producido una mejora con respecto a la superficie blanca original en torno a un 13% en sus valores de resistencia. Esta mejora se debe al aumento de la superficie de contacto y por tanto a la mejora de la adhesión mecánica.

La presencia de capas de pintura protectoras sobre la superficie metálica ha producido resultados dispares. Así, la presencia de una capa de pintura de naturaleza compatible con el adhesivo produce una mejora de la adhesión. En cambio, si adhesivo y pintura son poco compatibles la adhesión disminuye. Se ha comprobado como capas de pintura epoxi pueden mejorar muy sensiblemente la adhesión con adhesivos epoxi y en menor medida con adhesivos de poliuretano, mientras que conducen a una reducción de la adhesión con adhesivos de silicona o cianoacrilato.

La presencia de una capa galvanizada ha producido una importante reducción de la capacidad de adhesión del adhesivo.

La unión mecánica simple realizada por clinchado se ha comprobado que depende en gran medida del espesor de la chapa. Las uniones realizadas en chapas de muy bajo espesor alcanzan resistencias muy bajas.

La unión mecánica realizada con remache proporciona valores de resistencia muy similares, dependientes más de las propiedades del remache que de la naturaleza del sustrato. Los valores de resistencia obtenidos en las uniones remachadas son ligeramente inferiores que los obtenidos por clinchado.

Las propiedades mecánicas de las uniones mixtas o híbridas realizadas con adhesivo y unión mecánica presentan un efecto sinérgico parcial. Es decir, en la mayoría de los casos se produce una mejora de las uniones individuales, excepto en los casos que por la naturaleza del adhesivo o del sistema mecánico utilizado se dificulte o perjudique a la otra unión.

La unión mixta alcanza mayores propiedades mecánicas cuando se realiza con el adhesivo recién aplicado (fresco), por el contrario, si la unión se realiza después de cierto tiempo de aplicado el adhesivo (curado parcial o totalmente), se obtienen valores inferiores. Sin embargo, la realización de la unión mecánica sobre la unión adhesiva fresca ha presentado algunas dificultades operatorias como la contaminación de los utillajes.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y clinchado, es en la mayoría de los casos superior a la resistencia obtenida con solo clinchado. Los adhesivos MS y PUR debido a su mayor densidad dificultan las operaciones de clinchado y por tanto la eficacia de las uniones mixtas con estos adhesivos se reduce.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y clinchado, es en la mayoría de los casos superior a la resistencia obtenida con solo adhesivo. El adhesivo CN es el que presenta un peor comportamiento debido a la deformación de la chapa del sustrato producida durante el clinchado que, al modificar la geometría del espacio entre chapas que ocupa el sustrato, reduce la eficacia del adhesivo.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y remache, es en todos los casos superior a la resistencia obtenida con solo remache. El aumento de

resistencia de la unión mixta es directamente proporcional a la resistencia del adhesivo utilizado.

La resistencia mecánica de las uniones mixtas realizadas con adhesivo y remache es en algunos casos superior a la unión solo adhesiva y en otros casos es inferior. Los adhesivos CN y en menor medida los EPO pierden parte de su capacidad de resistencia al realizar la operación de remachado, debido a que se produce una deformación de la chapa del substrato y se modifica la geometría original de la unión adhesiva.

Los substratos galvanizados, que han demostrado una baja capacidad adhesiva, son los que experimentan una mejora más significativa cuando se realizan uniones mixtas, ya sean clinchadas o remachadas.

La resistencia de las uniones mixtas no llega en ningún caso a la suma de las resistencias por separado de ambas uniones la mecánica y la adhesiva. Se pierde más resistencia en la unión con clinchado debido al espacio más grande que ocupa este dentro de la superficie de adhesivo.

4.- Adhesivo Fresco o Curado.

Las condiciones operacionales de realizar la unión del remache con el adhesivo fresco o curado, pueden tener bastante influencia en el comportamiento final de la unión. Se ha comprobado que algunas superficies son más sensibles a estas condiciones operacionales. Por ejemplo la superficie BLANCA mejora con todos los adhesivos al realizar la unión del remache con el adhesivo fresco, y que al contrario la superficie PINTADA mejora cuando se realiza la unión del remache con el adhesivo curado. Las otras dos superficies, la LIJADA, y la GALAVANIZADA no presentan prácticamente sensibilidad a estas condiciones operacionales.

5.- Dispersión de los resultados.

Las uniones adhesivas presentan en términos generales una elevada dispersión de resultados al realizar los ensayos mecánicos. Sin embargo esta dispersión se reduce cuando se utilizan uniones híbridas o mixtas (adhesivo + unión mecánica).

La dispersión de valores de resistencia a cortadura está ligeramente influenciada por las condiciones superficiales. Se ha comprobado como la superficie galvanizada da con todos los adhesivos una elevada dispersión de resultados. En el resto de las superficies la dispersión depende del tipo de adhesivo utilizado.

Las uniones realizadas con CN son las que peor se comportan, con valores de dispersión muy altos, seguidas por las uniones con PUR.

La dispersión de valores de resistencia a cortadura ha presentado valores elevados en las uniones mecánicas realizadas por clinchado. Por el contrario las uniones remachadas han presentado valores pequeños de dispersión.

Las uniones mixtas presentan una menor dispersión de resultados que las uniones adhesivas. De entre los adhesivos el que genera menor dispersión de datos cuando se realiza la unión mixta es el PUR.

6.- Deformaciones.

Las uniones adhesivas presentan bajas deformaciones, aunque la naturaleza del adhesivo influye en este comportamiento. Así, los adhesivos flexibles como el PUR son los que presentan mayor deformación.

En uniones de adhesivos de alta resistencia como los CN y EPO, sobre sustratos de bajo espesor, se ha detectado una deformación plástica del sustrato antes de producirse la rotura de la unión adhesiva, debido a que se ha alcanzado el límite elástico del sustrato antes que la carga de rotura del adhesivo. Esto ha conducido a que las superficies pintadas de bajo espesor den altos valores de deformación.

Las uniones mecánicas dan mayores deformaciones que las uniones adhesivas.

La unión con clinchado da mayores alargamientos que las uniones remachadas. La excepción se produce en el sustrato PINTADA, con el cual tienen un comportamiento inverso, debido al bajo espesor de los sustratos pintados.

Las uniones mixtas producen un proceso de rotura complejo, que a veces se divide en dos etapas diferenciadas: una primera para el adhesivo y después de fallar este, se produce la deformación y rotura de la unión mecánica.

En los casos que se ha conseguido una sinergia de los procesos de unión, la deformación, al igual que la resistencia a la rotura, ha superado los valores de las uniones individuales.

7.- Adherencia.

El sustrato que presenta mejor adherencia ha sido la superficie pintada, que ha presentado rotura cohesiva independientemente del tipo de adhesivo utilizado.

El sustrato LIJADA ha dado mejor adherencia que el sustrato BLANCA, lo que demuestra la eficacia que tiene la preparación de la superficie frente a la adherencia.

El adhesivo que ha proporcionado mejor adherencia ha sido el MS, que en todos los casos analizados ha dado roturas 100% cohesivas.

El peor adhesivo, en cuanto a la adherencia, ha sido el EPOXI, que a excepción de su aplicación en sustrato pintado, en todos los casos se obtienen roturas de tipo adhesiva.

Los otros dos adhesivos analizados CN y PUR dan valores similares de adhesión y en ambos se nota una gran dependencia del tipo de sustrato.

8.- Formas de rotura.

Los adhesivos suelen producir rotura frágil y las uniones mecánicas rotura dúctil. La unión mixta favorece la ductilidad de la unión. Las uniones mixtas pueden dar rotura frágil, esto sucede cuando la resistencia del adhesivo es al menos tres veces superior a la resistencia de la unión mecánica, de forma que primero falla la unión mecánica, o sucede que al fallar la unión adhesiva se produce de forma casi simultánea el fallo de la unión mecánica. También se ha verificado que, cuando la resistencia del adhesivo es inferior a dos veces la de la unión mecánica, se produce a una rotura dúctil de la unión mixta, ya sea la unión mecánica remachada o clinchada.

9.- Rigidez de las uniones.

La rigidez de las uniones realizadas con adhesivos rígidos es similar a la del sustrato. Sin embargo, la rigidez de las uniones realizadas con adhesivos flexibles es inferior. Por otro lado, la rigidez de las uniones realizadas con uniones de tipo mecánico es variable en función del tipo de sustrato utilizado: con sustratos sin capas protectoras (BLANCA y LIJADA) la rigidez es alta, pero cuando el sustrato lleva capas protectoras la rigidez disminuye en muchos casos, dependiendo del tipo de capa y del tipo de unión mecánica.

La rigidez de las uniones híbridas realizadas con adhesivos rígidos mejoran la rigidez de la unión mecánica, mejoran más con adhesivo CIANOACRILATO que con EPOXY.

La rigidez de las uniones híbridas realizadas con adhesivos flexibles, aumenta con respecto de la unión adhesiva y con respecto a la unión mecánica. Los aumentos son mayores con adhesivo MS que con POLIURETANO.

10.- Investigaciones futuras.

Los adhesivos estudiados representan una parte importante pero limitada de los adhesivos estructurales existentes en el mercado. De igual forma las empresas fabricantes de adhesivos están sacando nuevos productos y formulaciones al mercado. Debido al dinamismo de esta tecnología existen muchas oportunidades para trabajar en el campo de investigación abierto en esta tesis.

Las superficies estudiadas han sido las consideradas más utilizadas, sin embargo existen muchos otros tipos de superficies que se usan en la industria y que no están aquí recogidas, lo cual podría dar una ampliación al trabajo aquí realizado.

Otra línea de trabajo de enorme trascendencia en la realización de uniones estructurales es la durabilidad de las uniones adhesivas. Tanto desde el punto de vista de su envejecimiento con el tiempo, como su degradación acelerada por fenómenos ambientales como la lluvia, la humedad, el calor o las radiaciones solares.

CAPITULO 6

BIBLIOGRAFÍA

6.- BIBLIOGRAFÍA

- 1) ABEL, M. L. ADAMS, A.N.N. KINLOCH, A.J. SHAW, S.J. WATTS, J.F. February–April 2006. *The effects of surface pretreatment on the cyclic-fatigue characteristics of bonded aluminium-alloy joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 26, Issues 1–2. Pages 50-61.
- 2) ABOUZAHR, S.M. BALES, J.R. Lo, S.C. Detroit 1994. *Neon Lite. Aluminium intensive vehicle: Development and performance*. International Body Engineering Conference.
- 3) AMO, J.M. DURÁN, J. FDEZ SÁEZ, J. 1996. *Laser welding of Al55-Zn coated steel sheet*. Journal of Materials Science. Vol. 31.
- 4) ASM. 1990. *Adhesives and sealants*. Engineered Materials Handbook. Vol. 3. ASM International.
- 5) ATTEXOR. 2006. *Catálogo de herramientas para clinching*. ATTEXOR Clinch Systems.
- 6) BARROSO HERRERO, S. CARSI CEBRIAÁN, M. 2005. *Procesado y puesta en servicio de materiales*. UNED.
- 7) BERMEJO, R. OÑORO, J. GARCÍA LEDESMA, R. 2008. *Comportamiento a fatiga de uniones a solape simple con adhesivo epoxi de acero y acero prepintado*. Revista de Metalurgia. Vol. 44 (4), Julio-Agosto. p. 310-316.
- 8) BLACKMAN, B.R.K. HADAVINIA, H. J KINLOCH, A. PARASCHI, M. WILLIAMS, J.G. January 2003. *The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 70, Issue 2. Pages 233-248.
- 9) BLACKMAN, B.R.K. KINLOCH, A.J. PARASCHI, M. 2003. *On the mode II loading of adhesive joints*. European Structural Integrity Society, Volume 32. Pages 293-304.
- 10) BLACKMAN, B.R.K. KINLOCH, A.J. PARASCHI, M. TEO, W.S. 2003. *Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin*. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 23, Issue 4. Pages 293-305.
- 11) BLACKMAN, B.R.K. KINLOCH, A.J. RODRIGUEZ-SANCHEZ, F.S. TEO, W.S. WILLIAMS, J.G. December 2009. *The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 76, Issue 18. Pages 2868-2889.
- 12) BLACKMAN, B.R.K. KINLOCH, A.J. RODRIGUEZ-SANCHEZ, F.S. TEO, W.S. June 2012. *The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading*. International Journal of Solids and Structures, Volume 49, Issue 13. Pages 1434-1452.
- 13) BRAITHWAIT, B. 1994. *Unión de materiales en Europa*. Soldadura y Tecnologías de Unión. No. 30, p. 38-48. Nov.-Dic. 1994. Chief Executive. The Welding Institute.
- 14) BREWIS, D.M. COMYN, J. RAVAL, A.K. KINLOCH, A.J. October 1990. *The effect of humidity on the durability of aluminium-epoxide joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 10, Issue 4, Page 243.
- 15) BTM CORPORATION. 2006. *Catálogo de herramientas para clinching*. BTM CORPORATION 300 Davis Road Marysville MI 48040 USA.
- 16) BUDDE, L. HAHN, O. *Adhesive bonding in combination with spot welding or clinching*. Welding in the World. Vol. 30, No. 1/2, p. 26-32, 1992.
- 17) BUNK, H. JOHSON, K. MARS, E. 1993. *Estudio de las relaciones entre el proyecto de revestimiento de acero pre-recubierto y su comportamiento ambiental en servicio*. UK British Steel, EUROFER 1993.
- 18) CIESZKIEWICZ, A. BANAS, G. LAWRENCE, F.V. 1993. Study II – *The effect of weld bonding, adhesive bonding, weld metal expulsion and surface condition on sheet steel spot weld fatigue resistance*. Welding Research Council Bulletin. Improving Steel Spot Weld Fatigue Resistance. Bulletin 384. Agosto 1993.

- 19) CLEARFIELD, H.M. WATSON, T.J. Mc NAMARA, D.K. DAVIS, G.D. 1990. *Surface preparation of metals*. Adhesives and sealants, ASM International.
- 20) COGNARD, P. 2005. *Adhesives and Sealants. Basic Concepts and High Tech Bonding*. Ed. Elsevier. Oxford, U.K. p. 238, 239, 261.
- 21) CORNILLE, H.J. 1994. *The contribution of structural adhesive to body structure NVH*. International Body Engineering Conference. Detroit. 1994.
- 22) DAVY, G. HASHEMI, S. KINLOCH, A.J. April 1989. *The fracture of a rubber-modified epoxy polymer containing through-thickness and surface cracks*. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 9, Issue 2. Pages 69-76.
- 23) DEAN, T.; BEHM AND JOHN GANNON; CIBA-GEIGY CORPORATION. 1990. *Epoxyes. Adhesives and Sealants*. ASM International.
- 24) DESSUREAUTT, M.; SPELT, J.K. 1997. Observations of fatigue crack initiation and propagation in an epoxy adhesive. *Int. J. Adhes. Adhesives*. Vol. 17. p. 183-195.
- 25) DOSTAL, C.A. New York, 1990. *Adhesives and Sealants*. Engineered Materials Handbook. Ed. CRC Press.
- 26) DUNCAN, B. ABBOTT, S. COURT, R. ROBERTS, R. LEATHERDALE, D. 2003. *A Review of Adhesive Bonding Assembly Processes and Measurement Methods*. Ed. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK. p. 25-35.
- 27) DURÁN, J. AMO, J.M. DURÁN, C. OÑORO, J. GARCÍA-LEDESMA, R. 2005. *Comportamiento mecánico de uniones estructurales con adhesivo. Influencia de los parámetros operacionales*. *Rev. Metal. Madrid Vol. Extr*. p. 345-350.
- 28) DURÁN, J. GARCÍA-LEDESMA, R. DURÁN, C.M. AMO, J.M. OÑORO, J. 2004. *Mecanismos de fractura y comportamiento a fatiga en uniones híbridas adhesivo-mecánicas*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 43 (2). p. 277-281.
- 29) ECSC Research. 1990. *Atmospheric corrosion mechanisms in precoated sheet*. 87-F4/F2.04 Project No.7210-KB/309.
- 30) ECSC Research. 1991. *Improvement of atmospheric corrosion resistance of formed galvanized sheet panels, precoated with polyester-type resins*. 91-F7/F4.06. Project No 7210-MB/993, 7210-Mb/934.
- 31) EU 10169. 2000. *Productos planos de acero recubiertos en continuo de materiales orgánicos (precalentados)*.
- 32) FERNADES, A.A. REIS GOMES, C. OLIVEIRA, F. TORRES MARQUES, A. 1996. *Long life public service vehicle study*. 1996. Anales de Mecánica de la Fractura. Vol. 13.
- 33) GARCÍA-LEDESMA, R. OÑORO, J. AMO, J.M. DURÁN, C.M. DURÁN, J. 2005. *Influencia del espesor de adhesivo de poliuretano en la resistencia de uniones sometidas a cortadura*. 2005. *Rev. Metalurgia*. Vol. 41, p. 60-65.
- 34) GARCÍA-LEDESMA, R. OÑORO, J. AMO, J.M. DURÁN, C.M. DURÁN, J. 2002. *Comportamiento de uniones híbridas autorremachadas con adhesivos poliuretano y cianoacrilato sometidas a cortadura*. Congreso EUROCOAT. Barcelona 2002. Proceedings. Vol. II. p. 1139-1146.
- 35) GARCÍA-LEDESMA, R. OÑORO, J. AMO, J.M. DURÁN, M.C. DURÁN, J. 2005. *Comportamiento mecánico de uniones estructurales con adhesivo. Influencia de los parámetros operacionales*. *Rev. Metal. Madrid*. Vol. 41. p. 60-65.
- 36) GARCÍA-ZAYAS, J. 1992. *Desarrollo del empleo de adhesivos en uniones metálicas*. *Soldadura y Tecnologías de Unión*. Año III. Num. 14. Marzo-Abril 1992, p. 51-72.
- 37) GEORGIU, I. IVANKOVIC, A. KINLOCH, A.J. TROPSA, V. 2003. *Rate dependent fracture behaviour of adhesively bonded joints*. European Structural Integrity Society, Volume 32. Pages 317-328.
- 38) GHASEMNEJAD, H. HADAVINIA, H. ABOUTORABI, A. 2010. *Effect of delamination failure in crashworthiness analysis of hybrid composite box structures*. *Materials & Design*, Vol. 31, Issue 3. Pg. 1105-1116.

- 39) GOKLU; SINGH, S.; SONNE, H.M. 1999. *The influence of corrosion on the fatigue strength of joined components from coated steel plate*. Mater. Corros. Pag. 50 y pag. 90-102.
- 40) GÓMEZ, S.; ET AL. 2007. *A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives. Vol. 27, p. 263-267.
- 41) GORDNIAN, K. HADAVINIA, H. MASON, P.J. MADENCI, E. February 2008. *Determination of fracture energy and tensile cohesive strength in Mode I delamination of angle-ply laminated composites*. Composite Structures, Volume 82, Issue 4. Pages 577-586.
- 42) HADAVINIA, H. GHASEMNEJAD, H. June 2009. *Effects of Mode-I and Mode-II interlaminar fracture toughness on the energy absorption of CFRP twill/weave composite box sections*. Composite Structures, Volume 89, Issue 2, , Pages 303-314.
- 43) HADAVINIA, H. KAWASHITA, L. KINLOCH, A.J. MOORE, D.R. WILLIAMS, J.G. November 2006. *A numerical analysis of the elastic-plastic peel test*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 73, Issue 16. Pages 2324-2335.
- 44) HADAVINIA, H.; ET AL. 2003. *The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic-fatigue loading II. Analytical and finite element studies*. Int. J. Adhes. Adhesives. Vol. 23. p. 449-461.
- 45) HOUWINK, R.; SALOMÓN, G. 1978. *Adherencia y Adhesivos*. Ed. Urmo, Tomo I. Bilbao. P.127-130.
- 46) HUANG, Y. KINLOCH, A.J. 1992. *The sequence of initiation of the toughening micromechanisms in rubber-modified epoxy polymers*. Polymer, Volume 33, Issue 24, Pages 5338-5340.
- 47) IRWING, B. Agosto 1995. *Building Tomorrow's automobiles*. Welding Journal, Agosto 1995. p. 29-34.
- 48) IRWING, B. Julio 1994. *Weld bonding finds new applications on automotive assembly lines*. Welding Journal, Julio 1994. p. 41-42.
- 49) IRWING, B. Sept. 1994. *Applications widen for structural adhesives in metal- to metal bonding*. Welding Journal, Sept. 1994. p. 51-56.
- 50) JOHNSEN, B.B. KINLOCH, A.J. MOHAMMED, R.D. TAYLOR, A.C. SPRENGER, S. January 2007. *Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers*. Polymer, Volume 48, Issue 2, 12, Pages 530-541.
- 51) KARAC, A. BLACKMAN, B.R.K. COOPER, V. KINLOCH, A.J. RODRIGUEZ SANCHEZ, S. TEO, W.S. IVANKOVIC, A. April 2011. *Modelling the fracture behaviour of adhesively-bonded joints as a function of test rate*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 78, Issue 6, Pages 973-989.
- 52) KEISLER, C. 1992. *Etude de la resistance à l'impact d'assemblage collés. Influence des états de surface*. Thèse de Docteur. Universite de Bordeaux, I.
- 53) KINLOCH, A.J. LITTLE, M.S.G. WATTS, J.F. December 2000. *The role of the interphase in the environmental failure of adhesive joints*. Acta Materialia, Volume 48, Issues 18–19. Pages 4543-4553.
- 54) KINLOCH, A.J. SHAW, S.J. HUNSTON, D.L. October 1983. *Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 2. Failure criteria*. Polymer, Volume 24, Issue 10. Pages 1355-1363.
- 55) KINLOCH, A.J. WILLIAMS, J.G. 2002. Chapter 8 - *The mechanics of peel tests*. Adhesion Science and Engineering, Volume 2. Pages 273-301.
- 56) KINLOCH, A.J. 2002. Chapter 17 - *The durability of adhesive joints*. Adhesion Science and Engineering, Volume 2. Pages 661-698.
- 57) LACHMANN, E. Sept. 1994. *Durability of bonded metal joints in motor-vehicle construction*. Vide (272). Pag. 277-283. S. Aug-Oct 1994.
- 58) LAWRENCE, F.V. CORTEN, H.T; Mc MAHON, J.C. Agosto 1993. Study I : *The effect of temper cycle, mechanical treatments, weld geometry and welding conditions on*

- sheet spot weld fatigue resistance*. Welding Research Council Bulletin. Improving Steel Spot Weld Fatigue Resistance. Bulletin 384.
- 59) LOCTITE. 1995. *Worldwide Design Handbook*. Ed. Loctite, Munich, Alemania. p. 147-163.
 - 60) LOCTITE. 1998. *Worldwide Design Handbook*. (2ª edición). Ed. Loctite.
 - 61) FERNANDO, M. HARJOPRAYITNO, W.W. KINLOCH, A.J. *A fracture mechanics study of the influence of moisture on the fatigue behaviour of adhesively bonded aluminium-alloy joints*. May 1996. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 16, Issue 2. Pages 113-119.
 - 62) MADRID, M. Madrid, España 2002. *Tecnología de la Adhesión*. Ed. Loctite. p. 18-20, 158-168 y 129-139.
 - 63) MARTÍN-MARTÍNEZ, J.M. 1998. *Adhesión y uniones adhesivas*. Ed. Universidad de Alicante. p. 31.
 - 64) MATSUI, H. 1996. *State of the arte and subjects of reducing automobile weight*. Toyota Motor Corporation. Toyota, Aichi, Japón. Proc. Of the 6th Int. Symp., JWS, Nagoya, Japón.
 - 65) MONTEIRO, D.F. 1995. *Análise do comportamento à fractura de juntas de aço efectuadas com adhesivos estruturais*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
 - 66) MONTEIRO, D.F.; OLIVEIRA, F.F.; FERNANDES, A.A. 1996. *Resistência ao Impacto de Juntas de Aço ao Carbono Coladas*. Anales de Mecánica de la Fractura. Vol. 13.
 - 67) NORLOK TECHNOLOGY INC. 2004. *Manufactures of Clinching Equipmet*. Catálogo. NORLOK TECHNOLOGY INC.
 - 68) OÑORO, J. Madrid 2005. *Adhesivos-El reto de unir todo con todo*. Revista Industria XXI – Volumen 8, pag. inicio: 6, pag. final: 14.
 - 69) OÑORO, J. PORTOLÉS, A. GARCÍA-LEDESMA, R. 2007. *Estudio de la distribución de tensiones en uniones a solape simple con adhesivos elásticos en función del espesor del adhesivo*. Tendencias en adhesión y adhesivos. Ed. Abecedario. Badajoz.
 - 70) OÑORO, J. PORTOLÉS, A. GARCÍA-LEDESMA, R. 2008. *Comportamiento a impacto de estructuras sándwich con núcleo de espuma de aluminio fabricadas con adhesivos*. *Adhesión en materiales compuestos*. Valladolid, p. 299-304.
 - 71) PETRIE, E.M. 1999. *Handbook of Adhesives and Sealants*. Ed. McGraw Hill. New York. p. 26, 61 y 361.
 - 72) PIZZI, A. MITTAL, K.L. 2003. *Handbook of adhesives technology*. Marcel Dekker.
 - 73) POCINS, A.V. 1997. *Adhesion and Adhesives Technology*. Ed. Hanser-Gardner. Cincinnati.
 - 74) POCIUS, A. V. CHAUDHURY, M. 2002. Preface. *Adhesion Science and Engineering*, Pages V-VI. Corporate Scientist. 3M Company. St. Paul, MN, USA.
 - 75) POCIUS, A.V. 2012. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. 8.12 - Adhesives and Sealants. Volume 8. Pg. 305-324.
 - 76) POCIUS, A.V. Hanser, 1997. *Adhesion and Adhesives Technology*.
 - 77) RADAJ, D. ZHENG, Z. MÖHRMANN, W. 1990. *Local stress parameters at the weld spot of various specimens*. Engng. Fracture Mech., Vol. 37, No. 5, p. 993-951.
 - 78) RADAJ, D.; ZHANG, S. 1993. *On the relations between notch stress and crack stress intensity in plane shear and mixed mode loading*. Engng. Fracture Mech., Vol. 44, No. 5. p. 691-703.
 - 79) RADAJ, S.; ZHANG, S. 1991. *Stress intensity factors for spot welds between plates of unequal thickness*. Engng. Fracture Mech., Vol. 39, No. 2 p. 391-413.
 - 80) SANTAMARÍA, F.; JIMÉNEZ, C.; AZPIROZ, X. 1993. *Estudio de la influencia del espesor del adhesivo en superficie de acero con distintas preparaciones superficiales*. INSASMET. Soldadura y Tecnologías de Unión. Año IV, Num. 23. Septiembre-October 1993. p. 44-49.
 - 81) SIKA. 2002. *Uniones elásticas*. Sika.

- 82) SINGH, S. Londres 1992. *Fatigue testing of jointed sheet material specimens*. Doc. IIS / IIW. III-998-92.
- 83) STEGEMANN, T.; HAHN, O.; SCHULTE, A. Paris 1998. *Advanced joining techniques for modern lightweight steel construction*. Rev. Metall-Paris 95. Pag. 95-107.
- 84) UNDERHILL, P.R.; DUQUESNAY, D.L. 2006. *The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation*. Int. J. Adhes. Adhesives. Vol. 26. p. 62-66.
- 85) UNE-EN 1465. 1996. *Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de substratos rígidos*.
- 86) UNE-EN ISO 9664. 1996. *Adhesivos. Métodos de ensayo para resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales*.
- 87) WILLIAMS, J.G. HADAVINIA H. April 2002. *Analytical solutions for cohesive zone models*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Volume 50, Issue 4. Pages 809-825.
- 88) WINKLE, I.E.; COWLING, M.J.; HASHIM, S.A.; SMITH, E.H. Agosto 1991. *What Can Adhesives Offer to Shipbuilding?* Journal of Ship Production. Vol. 7, No. 3. p. 137-152.