



FATIGA TÉRMICA EN UNIONES ADHESIVAS DISIMILARES

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES E
INGENIERÍA QUÍMICA

Juan Alberto Meza Manzaneque

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Tutor: Miguel Ángel Martínez Casanova

Índice

1.-INTRODUCCIÓN	1
1.1.-INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO	1
1.2.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2.1.- <i>Fatiga térmica en autobuses</i>	1
1.2.2.- <i>Uniones adhesivas</i>	3
Definición	3
Fuerzas presentes en la adhesión.....	4
Ventajas e inconvenientes.....	5
Uniones adhesivas disimilares: acero con material compuesto de fibra de carbono.....	6
1.2.3.-TIPOS DE FALLO DE LAS UNIONES ADHESIVAS	7
2.-MATERIALES.....	10
2.1.-CINTAS VHB.....	10
2.1.1.- <i>Cintas adhesivas piezosensibles</i>	10
Naturaleza de los adhesivos sensibles a la presión:	10
Ventajas y desventajas principales.....	10
Ensayos típicos realizados sobre los adhesivos piezosensibles.....	10
Fabricación de las cintas PSA.....	11
2.1.2.- <i>Cintas VHB y propiedades físicas:</i>	11
Definición	11
Método de aplicación de las cintas VHB:.....	12
Resistencia química de las cintas VHB:	12
Propiedades térmicas:	13
Propiedades de los acrílicos:.....	14
2.1.3.- <i>Cinta VHB™ 4991F</i>	15
Características físicas.....	15
Características técnicas.....	16
2.1.4.- <i>Cinta VHB™ 4912F</i>	16
Características físicas.....	16
Características técnicas.....	17
2.2.-SUSTRATOS	17
2.2.1.- <i>Acero</i>	17
Especificaciones técnicas.....	17
2.2.2.- <i>Material compuesto Fibra de Carbono (Sika® Carbodur®)</i>	18
Definición	18
Ventajas	19
Especificaciones técnicas.....	20
2.3.-IMPRIMACIONES	20
2.3.1.- <i>3M™ Adhesion Promoter 111</i>	20
Definición	20
Efectos	20
Especificaciones técnicas.....	21
2.3.2.- <i>3M™ Imprimación 94</i>	21
Definición	21
Especificaciones técnicas.....	21
3.-MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	22
3.1.-ENSAYOS.....	22

3.1.1.-Tratamientos superficiales previos.....	22
Introducción.....	22
Tratamiento superficial de plasma	22
3.1.2.-Fatiga térmica acelerada.....	23
3.1.3.-Ensayos de cizalla por tracción.....	25
Introducción.....	25
Características de las probetas.....	25
Desarrollo teórico	25
Normativa UNE-EN 1465:2009	26
3.2.-ESTUDIOS ESTADÍSTICOS.....	27
3.2.1.-Acerca del estudio estadístico en este trabajo.....	27
3.2.2.-Media aritmética.....	27
3.2.3.-Desviación estándar o desviación típica.....	28
3.2.4.-Varianza.....	28
3.2.5.-Desviación relativa	29
3.2.6.-Distribución de las medidas tomadas.....	29
Distribución normal o Gaussiana.....	29
3.2.7.-Datos Anómalos. Contraste de Grubbs	30
3.2.8.-Análisis de la Varianza.....	31
3.2.9.-Fiabilidad de Componentes.....	32
Ingeniería de la fiabilidad	32
Fiabilidad e Infiabilidad.....	32
Tasa de fallos	33
Fiabilidad: la distribución de Weibull	34
4.-RESULTADOS	36
4.1.-RESULTADOS PROBETAS	36
4.1.1.-Resultados globales.....	36
4.1.2.-Propiedades respecto al número de ciclos	37
4.2.-RESULTADOS ESTADÍSTICOS	43
4.2.1.-Distribuciones	43
Aclaraciones previas	43
Distribución de resultados.....	43
4.2.2.-Contraste de Grubbs.....	43
4.2.3.-Análisis de varianza	44
4.2.4.-Análisis de Weibull.....	44
4.3.-CONCLUSIONES	46
4.4.-LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO I.-GRÁFICAS TENSION-DEFORMACIÓN ANGULAR	50
ANEXO II.-FOTOGRAFÍAS	53
ANEXO III.-FICHAS TÉCNICAS CINTAS VHB.....	55

Agradecimientos

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi tutor en este Trabajo de Fin de Grado, el Dr. Miguel Ángel Martínez Casanova, la oportunidad de realizar este proyecto de investigación, así como la paciencia e inestimable ayuda que me ha proporcionado durante estos meses de trabajo.

Agradecer también al personal del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la UC3M, que ya durante la carrera me hicieron ver que esta era la rama que deseaba estudiar y conocer.

A mis amigos del colegio con los que he compartido y aún comparto grandes momentos. Gracias por vuestra amistad y ojalá que siempre sigamos juntos.

A mis amigos que he conocido en la universidad, gracias a ellos he conseguido seguir adelante y gracias a ellos venir a la universidad se convierte en algo ameno. Por una amistad duradera.

Por último quisiera dedicar este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermana, quienes siempre me han apoyado a lo largo de este Grado que finaliza con este Trabajo. Gracias por todo.

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se han preparado unas uniones disimilares de acero con un material compuesto de fibra de carbono, unidas mediante unas cintas adhesivas específicas (las cintas viscoelásticas VHB™, fabricadas por 3M), que tras curar han sido sometidas a ciclos acelerados de calentamiento-enfriamiento.

Esto se ha hecho para simular los efectos de la fatiga térmica sobre las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas.

Tras haberse realizado estos ciclos sobre las probetas, estas han sido ensayadas a cizalla con el objetivo de conseguir unos resultados experimentales que puedan indicar los cambios sufridos por la unión en función del número de ciclos aplicado sobre las probetas.

1.-Introducción

1.1.-Introducción y estructura del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado trata acerca de los adhesivos visco-elásticos y su comportamiento mecánico frente a fatiga térmica. El objetivo, por tanto, es comprobar si existe alguna relación considerable entre la fuerza de pegado de estos adhesivos y entre las variaciones cíclicas de temperatura a las que están sometidas las probetas.

Así, se ha organizado este trabajo de la siguiente manera:

En el primer punto, se planteará y se describirá el objetivo de este trabajo de manera detallada y de cómo este puede ayudar a comprender el comportamiento de las cintas adhesivas VHB en superestructuras como las de los autobuses. Tras esto, se describirán las uniones adhesivas y, concretamente las uniones adhesivas disimilares. Se finalizará este primer punto describiendo los distintos tipos de fallo de las uniones adhesivas.

En el segundo punto se explicarán los distintos materiales presentes en la unión adhesiva disimilar a estudiar: unión de acero y material compuesto de fibra de carbono mediante cinta adhesiva VHB™ (*Very High Bonding*), concretamente las de la familia 4912F y 4991F. Primero se expondrán las propiedades de las cintas VHB™, luego las de los substratos y por último las de las imprimaciones realizadas como tratamientos superficiales en los adherentes.

En el tercer punto se definirán primeramente los tratamientos superficiales previos realizados sobre el acero y sobre el material compuesto de fibra de carbono. Después se explicarán los ensayos acelerados mediante los cuales se han reproducido las condiciones del modelo real. Más adelante, se describirán los ensayos de cizalla por tracción realizados en las probetas para obtener datos numéricos en el momento de romper estas. Para concluir este tercer punto se estudiará la estadística usada para comprobar la fiabilidad de los datos obtenidos.

En el cuarto y último punto de este trabajo se discutirán los resultados obtenidos, la fiabilidad de estas uniones y la relación de las propiedades mecánicas de la unión adhesiva con el número de ciclos de calentamiento-enfriamiento. También se elaborarán unas conclusiones.

Finalmente se incluirán unos anexos con los datos obtenidos en los ensayos, las fotos tomadas de las probetas en los ensayos de cizalla por tracción y las fichas técnicas de las cintas adhesivas VHB™ utilizadas.

1.2.-Planteamiento del problema

1.2.1.-Fatiga térmica en autobuses

Si bien ya se ha explicado que el presente trabajo consistirá en el estudio de las propiedades de las cintas VHB™ al estar sometidas a ciclos de calentamiento-enfriamiento (fatiga térmica), aún no se ha definido el problema por el que se ha realizado este trabajo.

El objetivo fundamental será tratar de conseguir estructuras más ligeras en autobuses y autocares, lo que se traducirá en un ahorro de combustible. Al mismo tiempo se conseguirá aumentar las condiciones de seguridad, ya que se optimizará el control de la fiabilidad y durabilidad de los elementos de la estructura del vehículo. En las estructuras de autobús y autocar existen puntos en los que se van a producir concentraciones de tensiones debido a las condiciones de servicio del vehículo (giros, aceleraciones, frenazos...). Esta repetición de tensiones a lo largo de la vida útil del vehículo, generan un proceso de fatiga que no va a poder ser asumido por las estructuras soldadas o por las uniones mecánicas, ya que presentan una alta rigidez.

Los fallos en la carrocería debido a niveles elevados de tensiones y a la fatiga mecánica pueden minimizarse sustituyendo uniones soldadas por uniones realizadas empleando piezas de material compuesto fibra de carbono-epoxi unidas mediante adhesivos debido a que son capaces de disipar mayor cantidad de energía cinética asociada con un choque que un diseño metálico convencional. [1]

Por ello se recurre a las uniones adhesivas viscoelásticas en sustitución de las soldaduras. De esta manera se consigue una mayor absorción de los esfuerzos de fatiga en las uniones donde se produzcan esfuerzos más críticos, pues mientras que las uniones soldadas son tan rígidas que con su consecuente fragilidad no conseguirían aguantar largos períodos de fatiga, el uso de adhesivos viscoelásticos confiere a la unión una tenacidad mucho más alta.

Otras ventajas resultantes de usar adhesivos de este tipo son la ausencia de corrosión localizada en las uniones o la posibilidad de unir distintos materiales. Esto último resulta de lo más útil a la hora de intentar rebajar peso en una estructura como las del autobús. Al disponer de la posibilidad de unir distintos materiales, podemos sustituir algunos por otros que sean más ligeros, que es lo que se busca al unir acero con material compuesto de fibra de carbono.

Sin embargo, en otros trabajos ha quedado demostrada la baja energía superficial del material compuesto de fibra de carbono, por lo que la unión adhesiva se plantea más difícil. Es por ello que previamente al pegado del acero y el material compuesto, se aplicarán tratamientos superficiales sobre ambos adherentes con el objetivo de mejorar la adhesión y mejorar la unión adhesiva.

A continuación se muestra una unión típica en un autobús de material compuesto con una chapa de acero:

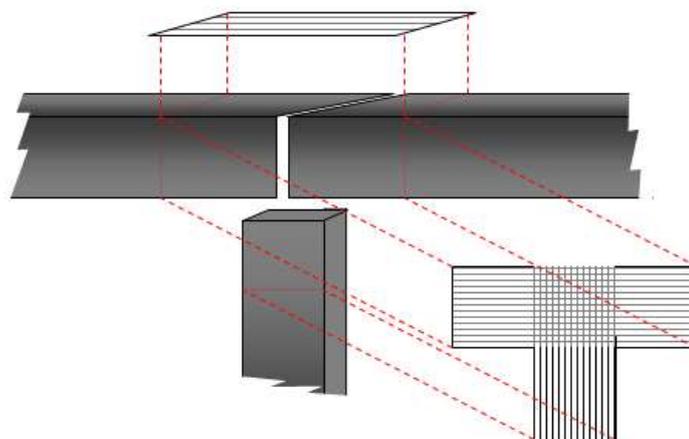


Figura 1: Esquema de las uniones planteadas en el nuevo diseño de la superestructura del autobús con adhesivos y material compuesto.

La carrocería de los autobuses debe cumplir ciertos requisitos de diseño entre los cuales destaca un bajo peso y una determinada rigidez a flexión y torsión. Como antes se ha mencionado, la reducción del peso tiene un impacto positivo en el consumo de combustible, la rigidez a flexión permite esencialmente una circulación segura, y la rigidez a torsión mejora el comportamiento dinámico lateral del autobús así como el confort de los pasajeros. [2]

Además se han de tener en cuenta las distintas propiedades físicas de los materiales que constituyen la unión para que esta sea fiable, tanto las de los adherentes como las del adhesivo pues el material compuesto tiene propiedades mecánicas diferentes a las de los metales así que en la unión de diferentes sustratos, se debe prestar atención también a las diferencias entre ellos, incluyendo coeficientes de expansión térmica y resistencia a la fractura. [3]

Esto último es importante debido a que en este trabajo se estudiará en gran medida la influencia de los cambios de temperatura en estas uniones adhesivas. En un autobús se dan condiciones de calentamiento-enfriamiento a lo largo del día, esto afecta a las uniones adhesivas antes descritas.

Al estar expuestos al sol en un día cotidiano de verano en un ambiente urbano de altos cambios de temperatura, la temperatura del autobús, y por ende de la unión, puede cambiar drásticamente. En un ciclo de calentamiento-enfriamiento, un día, en la noche la temperatura puede descender hasta los 3-4°C y al mediodía llegar a aumentar hasta los 40°C.

Si bien el caso descrito previamente es uno de los más extremos, es perfectamente posible en otra ciudad cambios importantes de la temperatura a lo largo del día, estos cambios afectarán a las propiedades de las uniones adhesivas fibra de carbono-acero. Este fenómeno es el que denominaremos como fatiga térmica: los sucesivos ciclos de calentamiento-enfriamiento a lo largo del tiempo que sufrirá la unión adhesiva.

1.2.2.-Uniones adhesivas

Definición [4]

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

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



Figura 2: Esquema de una unión adhesiva disimilar

Fuerzas presentes en la adhesión [5]

En una unión adhesiva intervienen distintos tipos de fuerzas, debido a que se forman distintas zonas dentro de la unión. Se pueden diferenciar la zona de los adherentes, la zona del adhesivo y por último las interfases formadas entre los adherentes y los adhesivos, las cuales son críticas para caracterizar el comportamiento de la unión. Es por ello que se debe hablar siempre de la unión adhesiva como conjunto completo, pues pese a que los distintos materiales que conforman la unión adhesiva pueden presentar unas propiedades físicas concretas, al formarse el sistema adhesivo, este puede tener unas propiedades diferentes.

Con el objetivo de facilitar la comprensión de este apartado, se debe tener muy claro qué son y cómo van a afectar a la unión las fuerzas adhesivas y las fuerzas cohesivas:

- **Fuerzas Adhesivas:** comprenden todas las fuerzas o mecanismos que mantienen unido el adhesivo al sustrato. El término de adhesión hace referencia al conjunto de los mecanismos y fuerzas situadas en una fina capa (capa límite o interfase) existente entre el sustrato y el propio adhesivo. La máxima adhesión se consigue cuando el adhesivo está en contacto íntimo con las zonas a unir. Este es el motivo por el que el adhesivo debe penetrar totalmente en la rugosidad superficial y mojar toda la superficie.

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 del sustrato va a reducir notablemente esta energía, por lo que la correcta limpieza de las superficies a unir es un factor fundamental en una buena unión adhesiva.

- **Fuerzas Cohesivas:** Resistencia ejercida en el interior del propio adhesivo. Corresponde a todas las fuerzas o mecanismos que mantienen unido el propio adhesivo. Estas fuerzas incluyen los enlaces interatómicos fuertes (enlaces covalentes) 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.

La unión adhesiva depende principalmente de 3 factores: mecánico (rugosidad y acabado superficial), físico y químico (naturaleza y afinidad entre el sustrato y el adhesivo).

Generalmente el adhesivo 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 hasta varias semanas. Hasta que el curado no se completa, la unión adhesiva se debe manejar con precaución para evitar su deterioro. Para el caso particular de las cintas sensibles a la presión, no existirá este proceso de curado. Sin embargo, será necesario aplicar sobre la cinta una fuerza en forma de presión que active completamente los mecanismos de adhesión y cohesión.

Las estructuras con uniones adhesivas de materiales disimilares pueden fallar de forma ocasional antes de llegar a su carga prevista o antes de terminar su vida de servicio estimada, incluso a pesar de que se hayan pensado cuidadosamente los procesos de control. Es por ello que poder predecir las posibles causas de fallo y saber cómo corregirlos es una importante consideración a tener en cuenta.

La tensión de rotura de una unión pegada está 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 de las capas del contorno (regiones internas o interfases) que estarán presentes y que van a constituir la unión o se formarán en el adhesivo durante la fabricación de la unión.

Difícilmente se va a producir una curva de tensión uniforme en una unión adhesiva de materiales disimilares por la aplicación de una fuerza externa, iniciándose la fractura cuando las tensiones locales exceden el límite de rotura local. Esto no está reconocido en la expresión usual de la tensión de rotura (la cual se va a determinar dividiendo la fuerza aplicada entre el área de la junta). Las tensiones locales, que en numerosas ocasiones serán el promedio de tensiones, y que determinan la fuerza actual que la junta puede soportar, no se conocen. Por tanto, el diseñador debe tratar de compensar o minimizar sus efectos.

Podemos encontrar también tensiones en una unión adhesiva de materiales disimilares por las diferencias de expansión térmica entre el adhesivo y los adherentes, o durante el curado o en servicio, y por la disminución de volumen del adhesivo cuando pasa del estado líquido al sólido. Hay que tener en cuenta que una unión mal diseñada o procesada puede contener tantas tensiones internas que su capacidad para soportar una carga externa puede llegar a ser nula.

Ventajas e inconvenientes [6]

Respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales, las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas:

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

Por otra parte, como inconvenientes a la hora de usar este tipo de uniones:

- Es necesaria una elaborada preparación superficial de los sustratos para asegurar una buena unión.
- El desmontaje de la unión se antoja muy difícil una vez ha curado el adhesivo.
- Inexistencia de ensayos no destructivos a la hora de testear los adhesivos.
- La resistencia térmica de estas uniones generalmente es limitada, sin embargo las usadas en este trabajo cumplen los requisitos necesarios (se detallará este asunto posteriormente).

Uniones adhesivas disimilares: acero con material compuesto de fibra de carbono.

En uniones adhesivas con materiales disimilares se opera con un conjunto o sistema adhesivo más complejo aún si cabe que en uniones adhesivas con el mismo material sustrato. Tal y como se muestra en la Figura 2, en este tipo de uniones existe un sistema complejo formado por al menos 5 zonas con diferentes comportamientos mecánicos. Esto es debido a que las interfases presentan una estructura diferente a las del adhesivo y por tanto su comportamiento mecánico difiere. La misión de los tratamientos superficiales es conseguir que un único adhesivo sea capaz de unir dos tipos de materiales diferentes.

Se han realizado estudios acerca de uniones adhesivas de acero y polímero reforzado con fibra de carbono tal como se muestra en la Figura 3. Las distintas investigaciones han revelado que el adhesivo suele ser más débil que el material compuesto y los elementos de acero que han sido unidos. Esto suele ser debido a que el espesor de los adherentes es bastante mayor que el espesor del adhesivo.

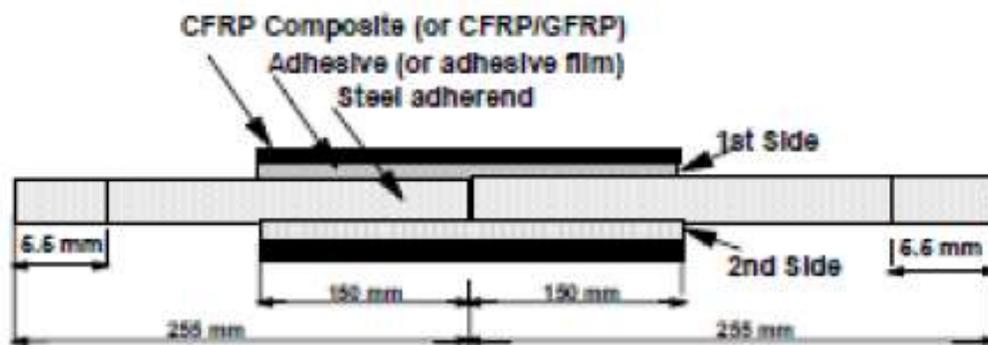


Figura 3: Esquema de una unión adhesiva de acero y polímero reforzado con fibra de carbono

Como resultado de tener un bajo espesor, las tensiones en la unión se vuelven relativamente grandes, hasta que la unión consecuentemente falla a menor carga que a la que habría fallado el adherente. Este efecto sin embargo se puede disminuir incrementando la longitud de solapamiento de la unión adhesiva.

En una unión correctamente adherida de acero y material compuesto, el modo de fallo debería ser cohesivo o dentro del adherente (fallo interlaminar en el material compuesto). Los modos de fallo que iniciados en cualquiera de las interfases adhesivo/adherente implican que deberá realizarse una unión adhesiva más fuerte.

1.2.3.-Tipos de fallo de las uniones adhesivas [7]

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

Así, las uniones por adhesivo, pueden fracasar adhesiva o cohesivamente. La evaluación de la unión adhesiva una vez producida la fractura puede desvelar fallos que hayan sido producidos por un tratamiento inadecuado de las superficies a unir, por una falta de cohesión, por un curado inadecuado o porque el adhesivo no tenga las propiedades mecánicas deseadas.

Los posibles modos de fallo que se pueden presentar en las uniones adhesivas se pueden resumir en tres posibles tipos, como se puede observar en la imagen 4:

- Fallo adhesivo: Fallo de la unión de interfase entre el sustrato y el adhesivo.
- Fallo cohesivo: Fallo del adhesivo. Se rompen las fuerzas de cohesión del mismo.
- Fallo del sustrato: En algunos casos se produce la fractura del sustrato antes que la unión.

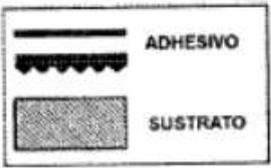
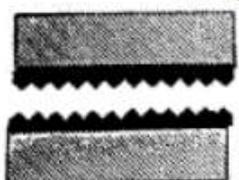
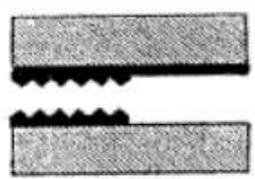
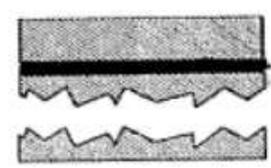
Tipo de fallo	
 <p>ADHESIVO</p> <p>SUSTRATO</p>	<p>Fallo cohesivo Rotura cohesiva del material de unión Este tipo de rotura es la más deseable.</p> 
	<p>Fallo adhesivo Separación en la interfase sustrato adhesivo Este tipo de rotura es el más desfavorable y el menos deseable.</p>  <p>Es muy difícil predecir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

Figura 4: Tipos de fallo en uniones adhesivas

En la norma UNE-EN ISO 10365, “Designación de los principales modelos de rotura”, se encuentra la siguiente designación de los modelos de roturas:

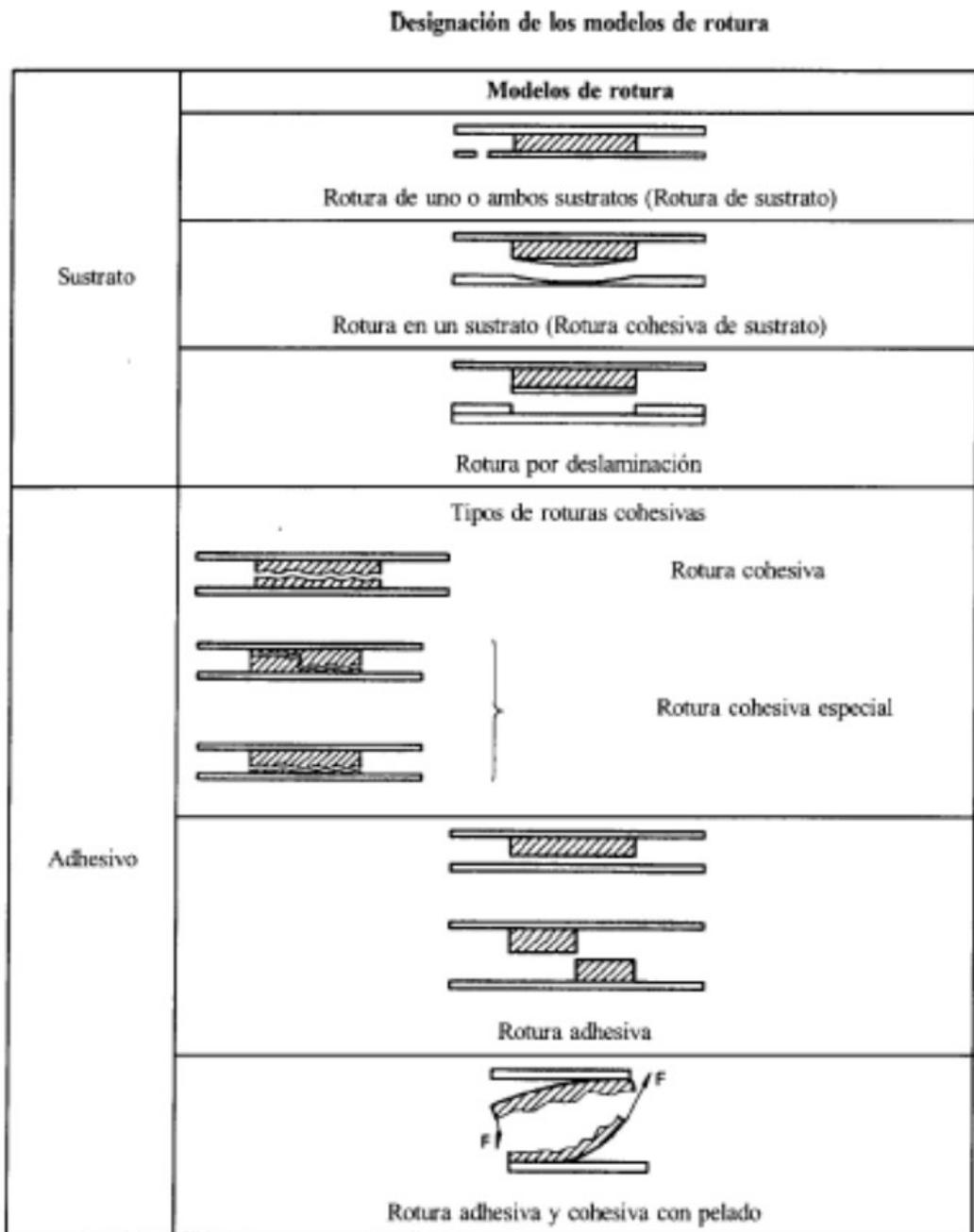


Figura 5: Modelos de rotura adhesivas según la norma UNE-EN ISO 10365

En el presente trabajo también se han registrado los tipos de fallo del adhesivo de cada una de las probetas ensayadas. Además, en el anexo II se podrán encontrar fotografías realizadas a las probetas tras haber sido ensayadas a cizalla.

2.-Materiales

2.1.-Cintas VHB

2.1.1.-Cintas adhesivas piezosensibles

Naturaleza de los adhesivos sensibles a la presión:

Los adhesivos sensibles a la presión o adhesivos piezosensibles (PSA) son materiales peculiares debido a que se encuentran en un estado entre viscoso y elástico a temperatura ambiente. Muestran comportamiento suficientemente líquido para ser deformados o fluir en una superficie lisa con un contacto mínimo (el proceso de unión), y sin embargo son resistentes al flujo durante la separación o proceso de desunión. La fuerza de la unión (fuerza o energía de separación) depende de la obtención de un delicado equilibrio entre las propiedades viscoelásticas en el polímero adhesivo y la energía superficial entre adhesivo y adherente.

Ventajas y desventajas principales

Las principales ventajas de los adhesivos sensibles a la presión en comparación con otros tipos de adhesivos son su comodidad a la hora de ser usados. La activación del adhesivo es únicamente sensible a la presión necesaria y no es necesario esperar por un proceso de curación, es decir, la unión es prácticamente instantánea.

Las desventajas que presentan estos adhesivos son su baja fuerza de adhesión (tanto su fuerza de pelado como su resistencia a cizalla son bajas), no son los más adecuados para superficies rugosas y son caros en términos de coste por área de unión unitaria. [8], [9]

Ensayos típicos realizados sobre los adhesivos piezosensibles

Los adhesivos sensibles a la presión normalmente se ayudan de materiales “apoyo” y se venden como cintas, etiquetas y productos de lámina. Sus propiedades de adhesión a menudo se ensayan con cintas cortadas directamente de tales productos. Como la mayoría de las propiedades de adhesión están influenciados por la naturaleza y el espesor de los adhesivos y la influencia de los materiales de “apoyo”, los resultados obtenidos no pueden considerarse como propiedades intrínsecas de los adhesivos sensibles a la presión, pero sí pueden considerarse como propiedades de la cinta compuesta, es decir, del sistema adhesivo más material de “apoyo”.

Las pruebas estándar utilizadas para caracterizar las propiedades de adhesión de las cintas son:

- Ensayos de cizalla: usados para la evaluación de resistencia a la cizalladura (la capacidad de una cinta adhesiva para resistir una carga aplicada a cizalla). Más adelante se explicará más detalladamente este tipo de ensayo puesto que será el utilizado para ensayar las probetas en este trabajo.
- Ensayos de resistencia al pelado (la resistencia de una cinta adhesiva al pelado en unas condiciones determinadas por la norma de ensayo)
- Ensayos Tack (la capacidad de un adhesivo sensible a la presión para formar un enlace inmediatamente al contacto con otro material).

Existen multitud de especificaciones distintas para los ensayos normalizados establecidas por las diferentes autoridades para evaluar estas propiedades. Igualmente existen muchas diferencias de detalle entre ellas. [10]

Fabricación de las cintas PSA [11]

Los adhesivos sensibles a la presión se fabrican tanto con un portador líquido como en forma sólida al 100%. Las cintas y etiquetas con portador líquido están hechas gracias al recubrimiento del adhesivo sobre un soporte y la posterior evaporación del disolvente orgánico o el agua, generalmente en un secador de aire caliente. El adhesivo puede ser calentado adicionalmente para iniciar una reacción de reticulación y aumentar el peso molecular.

Los PSA 100% sólidos pueden ser polímeros de baja viscosidad que se recubren y luego se hacen reaccionar con la radiación para aumentar el peso molecular y formar el adhesivo (PSA curado por radiación); o pueden ser materiales de alta viscosidad que se calientan para reducir la viscosidad de forma suficiente para permitir el recubrimiento, y después enfriarlo hasta su forma final (PSA fundido en caliente o HMPSA). Varios sistemas adhesivos se utilizan para la fabricación de PSA. Entre estos se incluyen en base disolvente, de fusión en caliente y emulsión.

-Disolvente: en los procesos basados en disolventes, los componentes del adhesivo se disuelven en un disolvente y este es aplicado a una banda de material. Después del recubrimiento, el disolvente se seca, dejando el adhesivo.

-Fusión en Caliente: en los procesos de fusión en caliente, los cauchos termoplásticos se componen de pegajosas resinas, aceites y antioxidantes. El adhesivo se reviste sobre una banda de material a temperaturas de hasta 150°C.

-Emulsión: en los sistemas de emulsión, los componentes del adhesivo se emulsionan en agua, se aplica a una banda y luego se seca.

2.1.2.-Cintas VHB™ y propiedades físicas:

Definición

Las cintas VHB™ (*Very High Bonding*) son cintas adhesivas fabricadas a partir de espuma acrílica, por lo que presentan una naturaleza viscoelástica que confiere a las cintas VHB™ una alta capacidad de absorción y distribución uniforme de esfuerzos mecánicos.

Son cintas de doble cara con adhesivo acrílico, válidas para la unión de la mayoría de materiales, tales como: vidrio, aluminio, metales, ABS, PVC, Nylon, acrílicos, maderas, composites en general y superficies pintadas. Sin embargo, la cinta adhesiva acrílica está diseñada para la unión de elementos de alta energía superficial, entre los que se incluyen metales, vidrios y algún polímero plástico. Para corregir esta adversidad en el material compuesto fibra de carbono-epoxi, en este trabajo se han usado los tratamientos superficiales adecuados para buscar la mayor fuerza de adhesión posible.

Estas cintas son usadas en uniones estructurales y suponen un buen remplazo para las uniones mecánicas, las cuales concentran los esfuerzos en ellas, o para uniones mediante soldadura, las cuales pueden alterar las propiedades físicas del material y producir también problemas de fatiga. Así, las uniones adhesivas elásticas conseguidas gracias a este tipo de cintas permiten una alta distribución de los esfuerzos generados por las fuerzas y momentos dinámicos de la estructura, consiguiendo reducir los graves problemas ocasionados por la fatiga mecánica en los materiales.

Los adhesivos PSA se suministran a menudo como películas pre-polimerizadas, que se pueden cortar a medida y están formadas por espumas de diferentes polímeros que permiten pegar y sellar simultáneamente, proporcionando una distribución uniforme en toda la línea donde sea aplicada la cinta. En particular, las espumas acrílicas de celda cerrada presentan un comportamiento viscoelástico que permite que su adherencia aumente con el tiempo sobre las superficies al fluir en los resquicios de las mismas. [12]

Esta característica les permite absorber energía y relajar la tensión frente a movimientos de fatiga, vibración y migración de plastificantes y gracias a los distintos espesores en que se pueden fabricar, permiten trabajar irregularidades entre las distintas superficies de unión.

En este Trabajo de Fin de Grado se han usado para crear las uniones adhesivas entre el acero y el material compuesto de fibra de carbono las cintas VHB™: 4991F y 4912F (nombre del fabricante, 3M).

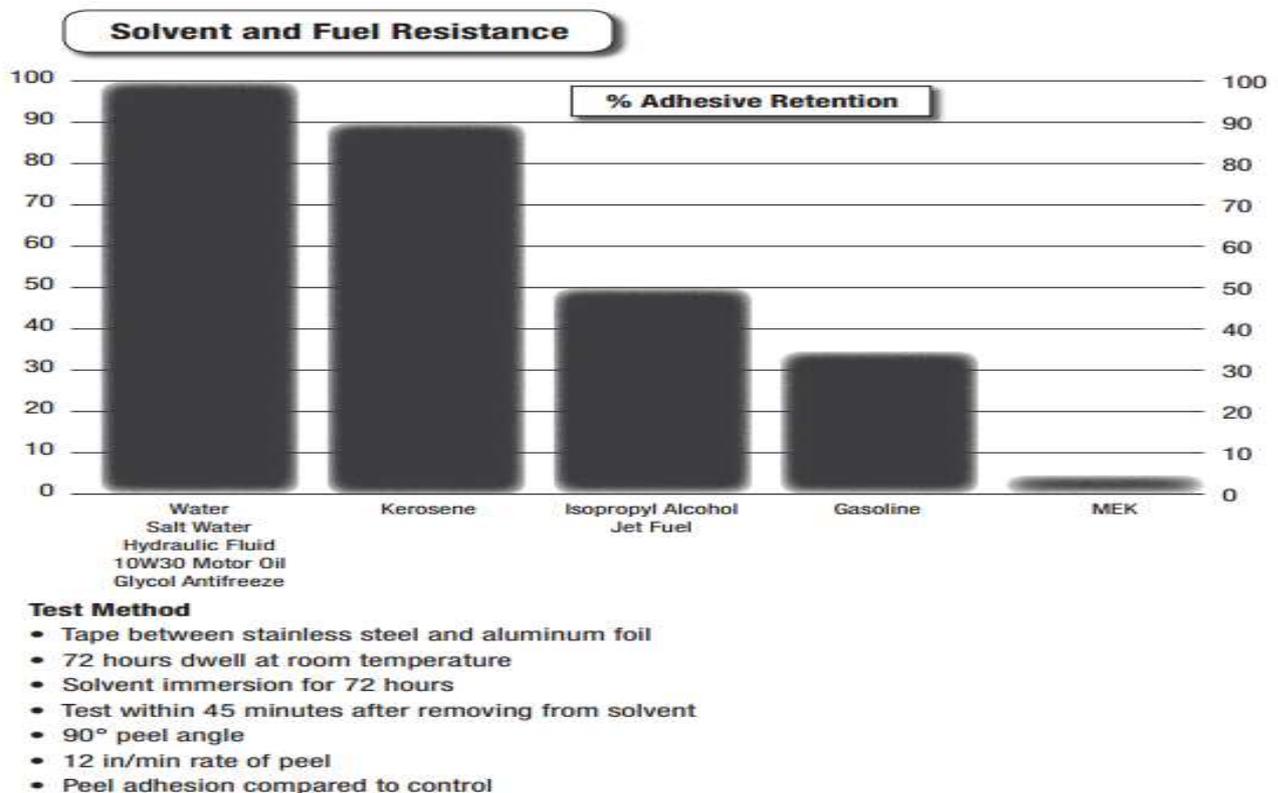
Método de aplicación de las cintas VHB™:

El fabricante, 3M en este caso, recomienda una temperatura de aplicación entre los 21°C y los 38°C, y dejar un tiempo de curado de unas 72 horas, pese a que la unión sea instantánea tras ser aplicada una presión leve. No es recomendable que la temperatura durante la aplicación sea inferior a los 10°C, pues a esa temperatura las cintas VHB se vuelven más rígidas, dificultando su pegado.

Resistencia química de las cintas VHB:

Estas cintas tienen una buena resistencia a solventes comunes tales como gasolina, queroseno o acetona, en la tabla (Tabla 1) a continuación se muestra dicha resistencia realizado el ensayo descrito:

Tabla 1: Resistencia de las cintas VHB frente a distintos solventes



Pese a los resultados de esta tabla no es recomendable mantener inmersa la unión adhesiva en estos disolventes por períodos muy prolongados (>72 horas), para situaciones cotidianas se pueden aplicar los resultados de la Tabla 1.

En la tabla 1 también se puede apreciar que las cintas VHB™ poseen una buena resistencia a la humedad ambiental. Además mantienen buen comportamiento frente a radiación UV. [13]

No se evidencia aparente degradación al ponerse en contacto con solventes comunes como combustibles (gasolina, gasoil, queroseno...), solventes minerales, aceite de motor, solución de amoníaco y MEK. Estas cintas muestran además excelente resistencia a los rayos ultravioleta en ensayos en exteriores y en simuladores para envejecimiento acelerado en ambientes agresivos. Es necesario indicar que los fabricantes exponen que estos datos son sólo orientativos, por lo que deberán ser verificados para cada supuesto.

Propiedades térmicas:

Cabe destacar para la realización de este trabajo el comportamiento de las cintas adhesivas frente a la temperatura.

Por lo general las cintas VHB™ tienen una alta resistencia a la temperatura (desde los -35°C hasta los 90° ó 93°C), es decir, que mantienen sus propiedades mecánicas en unos amplios rangos de temperatura.

En la tabla a continuación se resumen los rangos de temperatura típicos en los que pueden trabajar las cintas VHB con los distintos sustratos:

Tabla 2: Rango de temperaturas aceptado por la familia de cintas VHB

3M™ VHB™ Tapes UL746C Listings - File MH 17478 Category Q0QW2 Component - Polymeric Adhesive Systems, Electrical Equipment			
3M™ VHB™ Tapes/ Product Families	Substrates	Temperature Rating	
		Minimum	Maximum
4919F, 4926, 4936, 4936F, 4941, 4941F, 4947F, 4956, 4956F, 4979F	Ceramic	-35°C	110°C
	Aluminum, Galvanized Steel, Stainless Steel, Enameled Steel, Nickel Coated ABS, Glass (with or without Silane Coating) PVC, Glass/Epoxy, PBT, Polycarbonate, Acrylic/Polyurethane Paint, Polyester Paint	-35°C	90°C
	ABS	-35°C	75°C
4991	Polycarbonate, Aluminum, Acrylic/Polyurethane Paint, Polyester Paint	-35°	90°C
5915, 5915P, 5915WF, 5925, 5925P, 5925WF, 5930, 5030P, 5930WF, 5952, 5952P, 5952WF, 5962, 5962P, 5962WF	Polycarbonate, Primer 94 Coated Polycarbonate, Aluminum, Acrylic/Polyurethane Paint, Galvanized Steel, Polyester Paint, Epoxy Paint, Silane Coated Glass, Uncoated Glass, Stainless Steel, Enameled Steel, Glass Epoxy, Polybutylene Terephthalate, Nylon, Polyphenelene Ether (PPE), Acrylic	-35°C	90°C
	Rigid PVC, ABS	-35°C	75°C
5952, 5952P, 5952WF	Cellulose Acetate Butyrate	-35°C	90°C
RP16	Aluminum, Silane Coated Glass	-35°C	90°C
	PVC, ABS	-35°C	75°C
RP16F, RP25, RP32, RP45, RP62	Galvanized Steel, Enameled Steel, Nylon, Polycarbonate, Glass Epoxy, Phenolic, PPE/PS Blend, PBT, Epoxy Paint, Polyester Paint, Adhesion Promoter 111 Coated Epoxy Paint, Promoter 111 Coated Polyester Paint, Acrylic Urethane Paint, Epoxy/Polyester Paint	-35°C	90°C
RP62	Stainless Steel, Glass, Acrylic	-35°C	90°C
	PVC, ABS	-35°C	75°C

Propiedades de los acrílicos:

Todas estas características pueden explicarse gracias a la composición química de las cintas VHB™. Como se ha dicho antes, son cintas cuya base es de espuma acrílica, es decir, son soluciones poliméricas de base acrílica que tras un proceso de espumación, ya sea mecánico o químico, pasan a ser espumas con un diámetro medio de celdilla en torno a los 300µm con una desviación típica de 115µm.

Al ser de base acrílica, la solución precursora de la espuma contiene una resina sintética en la cual una mezcla polimerizable que contiene monómeros que incluyen ácido acrílico y/o éster de acrilato (polimetacrilato) se polimeriza parcialmente hasta una viscosidad tal que la composición precursora pueda contener celdillas estables. [14]

El polimetacrilato (Figura 6), posee una alta resistencia química y ambiental, es por ello que las cintas VHB™ presentan tan buena estabilidad química. Se trata además de un polímero termoplástico amorfo y de cadena poco flexible, lo que provoca que sea rígido y tenga unas propiedades ideales para aguantar esfuerzos mecánicos.

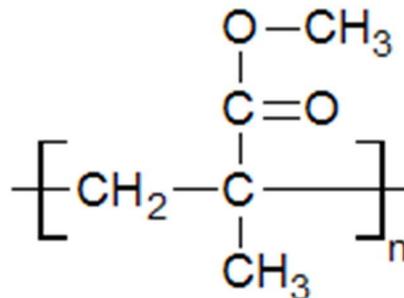


Figura 6: Polimetacrilato

Por tanto, el hecho de ser una espuma cuya base sea un polímero rígido, hace que las cintas VHB combinen alta elasticidad con buena resistencia al impacto y alta tenacidad, pues son espumas cuyo material de celdilla es rígido y resistente.

2.1.3.-Cinta VHB™ 4991F [15]

La VHB™ 4991F es una cinta de doble cara de espuma acrílica con un espesor de 2 mm, que sirve para unir metales pintados y no pintados, y plásticos de alta energía superficial. La VHB™ 4991 es adecuada para aplicaciones que requieran productos de alto espesor y conformables.

Características físicas

- Tipo de Adhesivo: Acrílico. Resistente a plastificantes.
- Densidad de la espuma: 720 kg/m³
- Espesor (ASTM D-3652): 2 mm
- Soporte: Espuma acrílica (celdilla cerrada)
- Protector: Polietileno rojo
- Color de la cinta: Gris Oscuro
- Vida Límite y condiciones de mantenimiento: 24 meses desde la fecha de fabricación. Almacenar en las cajas originales a 21°C y 50% de humedad relativa.

Características técnicas

Tabla 3: Características técnicas cinta VHB 4991F

Adhesión a pelaje sobre acero inoxidable (ángulo de 90°, t° ambiente, a las 72 horas, velocidad el ensayo de 300 mm/min)	35 N/cm
Resistencia a tracción (probetas en forma T de aluminio, t° ambiente, área de 6.45 cm ² y velocidad del ensayo de 50 mm/min)	415 kPa (4.2 kg/cm ²)
Resistencia a cizalladura dinámica sobre acero inoxidable	450 kPa (4.5 kg/cm ²)
Resistencia a cizalladura estática (pesos soportados durante 10000 minutos sobre acero inoxidable y por un área de 3.23 cm ²)	a 22°C 1000 g a 66°C 500 g a 93°C 500 g
Resistencia a disolventes	Alta
Resistencia a temperatura Periodos cortos (min, h) Periodos largos (días, semanas)	120°C 93°C

2.1.4.-Cinta VHB™ 4912F [16]

La VHB™ 4912F es una cinta de doble cara de espuma acrílica con un espesor de 2 mm, que muestra excelente fuerza de unión a largo plazo. La adhesión a pelado y resistencia a la tracción de los productos de la familia VHB™ son claramente superiores a los de los productos sensibles a la presión típicos. Su resistencia a los disolventes, a las temperaturas extremas y a los rayos U.V. los hacen indicados para numerosas aplicaciones de interior y exterior.

Características físicas

- Tipo de adhesivo: A-30
- Densidad de la espuma: 730 kg/m³
- Espesor (ASTM D-3652): 2 mm
- Soporte: Espuma acrílica (célula cerrada)
- Protector: Película de polietileno de color rojo
- Color de la cinta: Blanco
- Vida Límite y condiciones de mantenimiento: 24 meses desde la fecha de despacho por parte de 3M si se conserva en el envase original a 21°C y un 50% de humedad relativa.

Características técnicas

Tabla 4: Características técnicas cinta VHB 4912F

Adhesión a pelaje sobre acero inoxidable (ángulo de 90°, t° ambiente, a las 72 horas, velocidad el ensayo de 300 mm/min)	30 N/cm
Resistencia a tracción (probetas en forma T de aluminio, t° ambiente, área de 6.45 cm ² y velocidad del ensayo de 50 mm/min)	65,5 N/cm ²
Resistencia a cizalladura dinámica sobre acero inoxidable	No facilitado
Resistencia a cizalladura estática (pesos soportados durante 10000 minutos sobre acero inoxidable y por un área de 3.23 cm ²)	a 20°C 1500 g a 65°C 1000 g a 90°C 750 g
Resistencia a U.V.	Excelente
Resistencia a disolventes	Sin degradación aparente con la mayoría de los disolventes

2.2.-Sustratos

2.2.1.-Acero

Especificaciones técnicas

En este Trabajo Fin de Grado se han utilizado probetas de acero comercial sin ningún tipo de característica especial. La Tabla 5 muestra un resumen de las propiedades mecánicas obtenidas mediante ensayo (UNE EN ISO 6892-1:2010) facilitadas por la empresa Castrosua S.A.

Tabla 5: Propiedades mecánicas de probetas de acero como las utilizadas en este Trabajo Fin de Grado

Perfil (mm)	Límite Elástico (MPa)	Resistencia a la Rotura (MPa)	Alargamiento a la rotura (%)
80x25x4 (1)	377	550	25,81
80x25x4 (2)	373	546	24,69
80x25x4 (3)	382	539	23,81
Media	377	545	24,77
Desviación Estándar	4	6	1



Figura 7: Chapa de acero a partir de la cual se ha extraído el sustrato de acero

2.2.2.-Material compuesto Fibra de Carbono (Sika® Carbodur®) [17]

Definición

Los materiales compuestos, y más concretamente el material compuesto de fibra de carbono-epoxi, cada vez son más utilizados en el sector del transporte público, donde las mejoras de rendimiento y reducción de costes resultantes son significativas.

Su empleo presenta ventajas como un ahorro de peso de hasta el 50% para aplicaciones estructurales en sustitución del acero [18], o bien reduciendo el número y peso de perfiles que conforman la carrocería del vehículo. En aplicaciones no estructurales supone una reducción del peso de hasta el 75% traduciéndose por tanto en una reducción del consumo de energía, menor inercia, menor desgaste de neumático y aumento de la capacidad para transportar mayores cargas útiles.

El empleo de material compuesto fibra de carbono-epoxi, junto con otros materiales, unidos mediante adhesivos, es un proceso de re-ingeniería en el diseño de los procesos de conjuntos. A medida que el uso de estos materiales compuestos se ha ido extendiendo, también lo ha hecho la variedad en los procesos de producción. Esto va a implicar un cambio en el proceso de unión, afectando también al diseño de las piezas y al proceso de fabricación en su conjunto. Los cambios en equipamiento, tiempos de manejo, tratamientos superficiales, etc., son necesarios para alcanzar este objetivo. Por otra parte, la utilización de uniones adhesivas estructurales, permite una mayor eficiencia y flexibilidad en los procesos de producción (reduciendo el tiempo de fabricación), mejorando así la competitividad de las empresas que apuestan por esta tecnología.



Figura 8: Material compuesto de fibra de carbono

La utilización de esta tecnología requiere estudios dirigidos fundamentalmente al empleo de uniones adhesivas entre materiales disimilares mediante cálculos de tensiones, simulación, diseño, tratamientos superficiales, fiabilidad de las uniones y durabilidad.

El material compuesto Sika Carbodur se compone de láminas de polímero reforzado con fibras de carbono fabricadas mediante un proceso de pultrusión, diseñadas para actuar como refuerzo o sustitución de componentes estructurales metálicos en estructuras. Se trata de un laminado de gran resistencia a tracción pegado por medio de un adhesivo de base de resina epoxi.

Ventajas

Las principales ventajas en el uso de este material son:

- No es corrosible.
- Resistencia muy alta.
- Excelente durabilidad.
- Bajo peso propio.
- Disponible en cualquier longitud (no requiere juntas).
- Muy bajo espesor del sistema (puede pintarse o recubrirse).
- Fácil manejo y transporte (en rollos).
- Gran facilidad para ejecutar cruces o intersecciones de las láminas.
- Extremadamente fácil de instalar.
- Sobresaliente resistencia a la fatiga.
- Requiere mínima preparación de la placa.
- Alta resistencia a la alcalinidad.
- Bordes libres de fibras expuestas gracias al proceso de fabricación por pultrusión.
- Elevados módulos de elasticidad.
- Se trata de un sistema aprobado por la industria en numerosos países.

Especificaciones técnicas

-Tipo: Matriz de polímeros (resina epoxi) reforzada con fibras de carbono tipo C

-Color: Negro

-Dimensiones: Espesor: 1,2 mm.

Anchura: 50 mm x 80 mm.

-Densidad: 1.6 g/cm³

-Resistencia a Tracción: 2800 MPa (28000 Kg/cm²)

-Resistencia a la Temperatura: >500°C

-Contenido de Fibras en Volumen: >68%

-Módulo de elasticidad (valor medio): 165000 MPa (1650000 Kg/cm²)

-Resistencia a la tensión (valor medio): 3100 MPa (31000 Kg/cm²)

-Deformación a la rotura (valor mínimo): >1.69%

2.3.-Imprimaciones

2.3.1.- 3M™ Adhesion Promoter 111 [19]

Definición

Para mejorar la adhesión en los sustratos de las cintas VHB™, se han realizado tratamientos superficiales sobre estos: en el acero se ha usado una imprimación química y en el material compuesto de fibra de carbono se han realizado dos tratamientos superficiales, uno de plasma (explicado más adelante) y otro de una imprimación. De manera que para las probetas usadas en los ensayos se han preparado la mitad con un tratamiento de plasma sobre el sustrato de fibra de carbono, y la otra con una imprimación sobre el sustrato de fibra de carbono.

En las chapas de acero se ha utilizado como tratamiento superficial una imprimación de 3M™, comercialmente denominada Adhesion Promoter 111. Se trata de una solución a base de alcohol isopropilo capaz de mejorar y dar mayor rapidez a la adhesión de cintas adhesivas como las utilizadas en este trabajo. Su uso es muy efectivo en varios tipos de superficies, incluyendo metales sin tratamientos previos, acero galvanizado y superficies pintadas.

Las piezas de acero suelen llevar recubrimientos de grasa para evitar su corrosión. Por ello es necesario realizar tratamientos de desengrase y adecuación de la superficie para la unión. En el caso particular de este Trabajo Fin de Grado se realiza un tratamiento de lijado y desengrasado con MEK previo a la aplicación de la imprimación.

Efectos

Sus principales efectos sobre la superficie de la chapa de acero: aumenta la resistencia de la unión, incrementa la capacidad de adhesión de la cinta tanto a temperatura ambiente como a menores temperaturas, se trata de un sistema a base de alcohol isopropilo, no desprende mal olor, se seca muy rápidamente y puede limpiar y favorecer la adhesión en una única etapa (libre de cera, grasa, aceite y partículas sueltas).

Especificaciones técnicas

-Disolvente: Alcohol Isopropilo (IPA)

-Ingredientes Activos: Menos de un 5% en peso

-Compuestos orgánicos volátiles: 780 g/l

-Color: Claro

-Punto de inflamación: 11°C

-Poder Cubriente: Aproximadamente 19 m²/l basado en un espesor del recubrimiento de 0,005 cm. Esta medida puede variar de forma sustancial dependiendo del método de aplicación.

-Tiempo de secado: Aproximadamente un minuto, dependiendo del espesor de la capa, la temperatura y la humedad. Sin embargo, se recomienda dejar pasar una hora desde su aplicación para asegurar una buena adhesión posterior.

2.3.2.-3M™ Imprimación 94

Definición

Para el material compuesto se ha optado por una imprimación de 3M™, comercialmente conocida como Imprimación 94. Se trata de una imprimación específicamente desarrollada para cintas. Se utiliza para potenciar la adhesión de las cintas de 3M™ a superficies tales como polietileno, propileno, ABS, mezclas de PET/PBT, cemento, vidrio, metal, superficies metálicas pintadas y diversos materiales compuestos de fibra de carbono.

Previamente al uso de la imprimación, se realiza un pretratamiento de desengrasado y limpieza de la superficie con MEK.

Especificaciones técnicas

-Sólidos: 6% aproximadamente

-Color: Ámbar

-Punto de inflamación: -20°C

-Poder cubriente: 15 m²/l

-Densidad: 0,75 g/cm³

-Viscosidad: 35±5 mPa.s

3.-Métodos experimentales

3.1.-Ensayos

3.1.1.-Tratamientos superficiales previos

Introducción

En este Trabajo de Fin de Grado se comprobará la fuerza de pegado de las uniones adhesivas mediante ensayos de cizalla por tracción. Previamente a este ensayo se han hecho una serie de tratamientos superficiales previos a la unión de los adherentes con la cinta VHB°.

Estos tratamientos se han aplicado con el objetivo de conseguir la máxima adherencia entre los adherentes y la cinta VHB°, en otros trabajos previos a este ya se buscaron cuáles eran los tratamientos superficiales que más favorecían la adhesión. [20]

En total se han utilizado dos tratamientos superficiales distintos para las probetas que se ensayarán: el Tratamiento 1 consiste en una imprimación sobre el acero adecuada para metales y una imprimación distinta sobre el material compuesto de fibra de carbono específica para polímeros; el Tratamiento 2 sin embargo trata de sustituir la imprimación sobre el material compuesto por un tratamiento de plasma que mejore la energía superficial de este sustrato, sobre el acero en este tratamiento seguirá usándose una imprimación apta para metales.

Sobre las dos imprimaciones (la del acero y la del material compuesto) ya se han descrito sus características técnicas en el apartado *2.3.-Imprimaciones* de este trabajo. Es por ello que ahora se explicará el tratamiento superficial de plasma que se usará en las probetas pertenecientes al Tratamiento 2.

Tratamiento superficial de plasma [21]

El tratamiento de plasma abarca cualquier forma de tratamiento de superficie en el que un material está expuesto a un gas ionizado (plasma). Dependiendo del gas utilizado para generar el plasma y los parámetros del plasma, el efecto principal es una superficie de reticulación y la eliminación de capas límite débil. Además se introducen dentro de las cadenas superficiales de polímero grupos funcionales que contienen los elementos presentes en las moléculas de gas. Estos grupos van a aumentar la componente polar de la energía superficial del polímero permitiendo una mucha mejor unión con el adhesivo. El plasma también provocará la eliminación de desmoldeantes y contaminantes de la superficie del material.

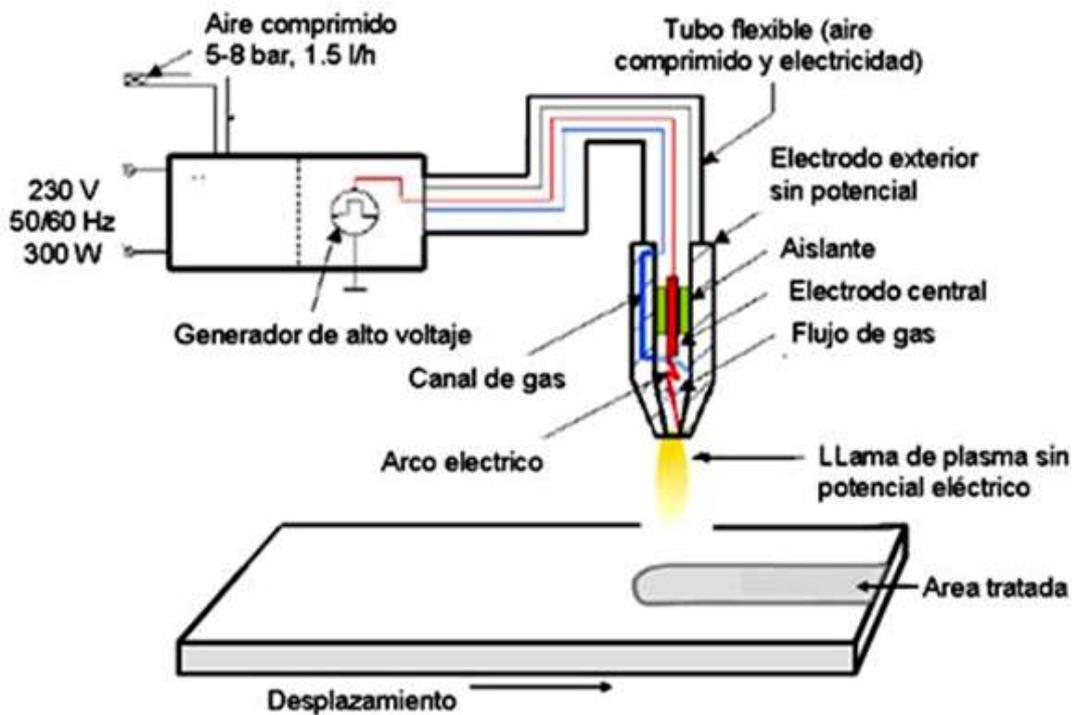


Figura 9 Esquema del dispositivo de plasma atmosférico utilizado en este trabajo.

Los parámetros utilizados en este Trabajo Fin de Grado para el tratamiento superficial de plasma son:

-Velocidad: 3m/min

-Altura de la antorcha de plasma: 6mm

3.1.2.-Fatiga térmica acelerada Introducción

Como se ha explicado anteriormente, se aplicarán sobre nuestras probetas dos tratamientos superficiales distintos, esto en conjunto con los dos tipos de cinta adhesiva utilizada, darán lugar a un total de cuatro tipos de probetas a la hora de ser ensayadas.

En total en este trabajo se han sometido a ensayo unas 25 probetas, pese a que en un inicio se hicieron 26, pero una mala toma de datos de una de las probetas provocó que se rechazase una de ellas.

Una vez preparadas las probetas unidas con la cinta VHB, estas se sometieron a ciclos de calentamiento-enfriamiento (los cuales se explican a continuación) y tras esto fueron ensayadas a cizalla por tracción.

Ciclos calentamiento-enfriamiento

Como ya se ha dicho en puntos anteriores, se han realizado ciclos de calentamiento-enfriamiento con el objetivo de simular una fatiga térmica acelerada sobre la unión adhesiva para así estudiar los efectos de esta en las propiedades mecánicas de la unión.

Para ello se ha utilizado un hornillo eléctrico que calentó las probetas desde temperatura ambiente, unos 20-25°C, durante 20 minutos hasta los 80-85°C; esto es denominado como ciclo de calentamiento.

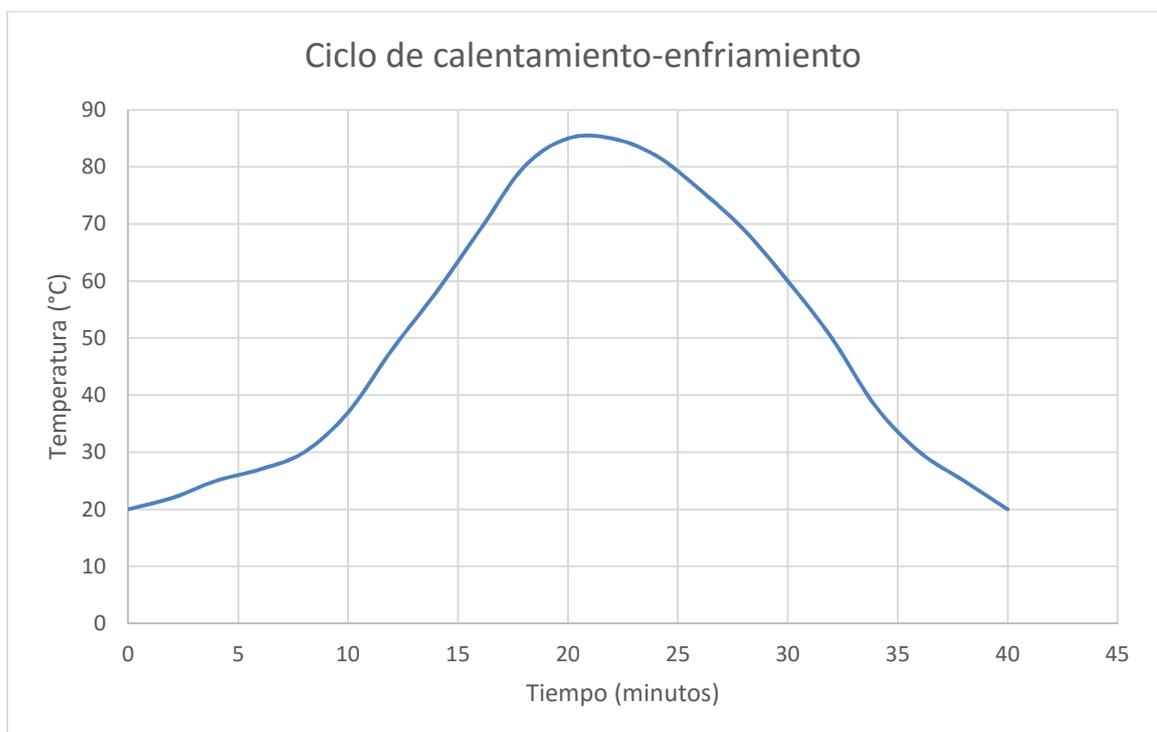
Tras el ciclo de calentamiento, un sistema refrigerante ajeno al horno enfrió las probetas hasta la temperatura ambiental, también en un plazo de 20 minutos. Ese inicial ciclo de calentamiento junto al posterior ciclo de enfriamiento será en conjunto un ciclo de calentamiento-enfriamiento que en total durará 40 minutos.

Puesto que en las probetas se ha aplicado un alto número de ciclos, era necesario configurar el sistema para que estuviese continuamente en funcionamiento, y esta parte resultó ser más larga y complicada de lo previsto. En primer lugar, para conseguir que el horno y el sistema refrigerante trabajasen alternativamente durante 20 min cada uno, se probaron distintas soluciones, pero finalmente se decidió el uso de unos adaptadores de corriente que con un temporizador dejaban pasar la corriente eléctrica un tiempo determinado (20 minutos) durante el cual funcionaba el horno o el sistema refrigerante; transcurrido esto, cortaban el paso de corriente para el horno o para el sistema refrigerante de manera que funcionasen de manera alternativa uno tras otro. La calibración de este sistema tomó en torno a 20 horas de trabajo hasta que funcionó correctamente.

Configurado el funcionamiento de los ciclos de calentamiento-enfriamiento y preparadas las 26 probetas, 18 de estas fueron introducidas en el horno dejando las otras 8 aparte para ser ensayadas y así disponer de unos datos de tensión-deformación de la unión adhesiva sin que estas sufriesen fatiga térmica.

En la siguiente tabla se puede apreciar un ciclo de calentamiento-enfriamiento típico:

Tabla 6: Ciclo de calentamiento-enfriamiento típico



De esta manera se realizaron varios ciclos sobre las probetas: en 8 de ellas se aplicaron 288 ciclos (sin embargo la toma de datos de una de ellas fue errónea y no está presente en este trabajo), en 4 probetas

624 ciclos y en las 6 restantes 720 ciclos. Este alto número de ciclos fue posible gracias al trabajo continuo del horno y del sistema refrigerante sin pausa, también en funcionamiento durante la noche.

De este modo se consiguió una progresión de las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas en función del número de ciclos aplicados sobre estas.

3.1.3.-Ensayos de cizalla por tracción

Introducción

Los ensayos de cizalla se realizaron en una máquina universal de ensayos Microtest EM2/200/FR. Los parámetros utilizados en la máquina son: velocidad de 10mm/min y célula de carga de 1 KN. Fueron ensayadas en total unas 26 probetas con los distintos tratamientos superficiales utilizados y con las distintas cintas VHB™ utilizadas, pero sólo se obtuvieron 25 resultados fiables.

Con los ensayos de cizalla por tracción se obtienen una serie de datos que van a permitir calcular los parámetros deseados: Tensión (T) máxima, Deformación angular (γ) y lineal (elongación) para T máxima y Módulo elástico.

Características de las probetas

-Dimensiones de las probetas: Largo: 0,08 m

Ancho: 0,025 m

-Superficie adhesiva: 0,000625 m²

-Espesor del adhesivo: 0,002 m

-Nº de Probetas: 26

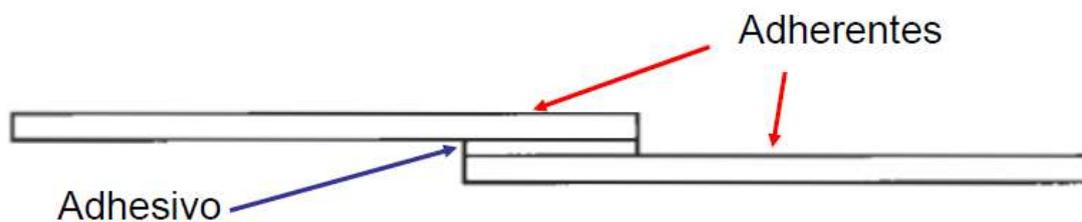


Figura 10: Esquema del tipo de probeta utilizada en este Trabajo de Fin de Grado.

Desarrollo teórico

En los ensayos de cizalla por tracción se extraen los valores de Fuerza (N) y Alargamiento (m) respecto de la posición inicial. A partir de estos datos en primer lugar se obtiene la Tensión (T) (1):

$$\tau \text{ (Tensión)} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Superficie}} \quad (1)$$

La elongación (2), se obtiene a partir del alargamiento y la longitud inicial (L_0) del adhesivo:

$$\text{Elongación} = \frac{\text{Alargamiento}}{L_0} \quad (2)$$

También será necesario calcular Gamma (γ), que es la deformación angular del adhesivo (3,4):

$$\gamma(\text{rad}) = \arctan\left(\frac{a}{h}\right) \quad (3)$$

$$\gamma(\%) = 100 \frac{\gamma}{\pi/2} \quad (4)$$

A partir de (1), (2), (3) y (4) obtendremos la Tensión máxima, la Elongación en la Tensión máxima y Gamma para la Tensión máxima.

En cuanto al módulo elástico (E) o elasticidad, existen dos posibles formas de hallarlo (5) y (6):

$$E = \text{Tangente a la curva Tensión – Elongación en cada punto} \quad (5)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

Siendo σ la presión ejercida sobre el área de sección transversal del objeto y ϵ la deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

[Normativa UNE-EN 1465:2009](#)

Para la realización de los ensayos, se ha seguido la norma UNE-EN 1465:2009, cuyo título es “Determinación de la resistencia a la cizalla por tracción de montajes pegados solapados”.

Esta norma europea especifica un método para determinar la resistencia a la cizalla por tracción de montajes pegados solapados cuando se somete a ensayo una probeta normalizada y en condiciones específicas de preparación y ensayo.

Sin embargo, debido a la imposibilidad de conseguir probetas normalizadas, los ensayos se han realizado con probetas de diferentes características a las indicadas en la norma. Esta modificación sin embargo no afecta a la validez de los ensayos.

3.2.-Estudios estadísticos

3.2.1.-Acerca del estudio estadístico en este trabajo

Antes de entrar en la explicación de los parámetros estadísticos utilizados en este Trabajo de Fin de Grado deben entenderse unas premisas. En la realización de este trabajo se ha invertido una alta cantidad de horas, sin embargo el número de horas disponibles han sido, por diversas circunstancias, limitadas.

Por ello es importante aclarar de antemano que para un estudio estadístico fiable de este trabajo, se deberían haber preparado y ensayado un número mayor de probetas, pues pese a que se disponen de 25 datos sobre las probetas ensayadas, hay que tener en cuenta que 13 de ellas se han unido con una cinta VHB distinta de las otras 12, por lo que las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas serán distintas y no podrán incluirse en el mismo estudio estadístico de resultados. Pero es que además, se han realizado dos tratamientos superficiales diferentes sobre las probetas, lo que hace que se disponga de 4 tipos distintos de uniones adhesivas, con lo que se forman 4 grupos de probetas diferenciados para ser estudiados. Para finalizar, en estos 4 grupos, en las probetas en cada uno de ellos se han aplicado números distintos de ciclos de calentamiento-enfriamiento.

En definitiva, para poder hacer un estudio fiable en parámetros como la distribución normal o la fiabilidad de los resultados, se necesitarían un número de 10 o más probetas ensayadas tras haber sido pegadas con la misma cinta adhesiva, haber recibido el mismo tratamiento superficial y haber sufrido el mismo número de ciclos de fatiga térmica. Las 25 probetas ensayadas no son suficientes para satisfacer estas necesidades.

Por ello en este Trabajo de Fin de Grado, pese a no disponer de un estudio estadístico fiable debido a la falta de un mayor número de datos de las probetas, se pretende explicar la metodología de trabajo que debe usarse en trabajos posteriores en los cuales si se hayan obtenido tal cantidad de datos.

3.2.2.-Media aritmética

A la hora de revelar la existencia de errores aleatorios en este tipo de ensayos o experimentos resulta necesario habitualmente realizar medidas repetidas. Es por ello necesario tratar estas medidas en virtud a algunos conceptos estadísticos fundamentales, como por ejemplo la media aritmética.

En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral, como así ocurre en este Trabajo Fin de Grado.

Expresada de forma más intuitiva, se puede decir que la media (aritmética) es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación. Una de las limitaciones de la media aritmética es que se trata de una medida muy sensible a los valores extremos; valores muy grandes tienden a aumentarla mientras que valores muy pequeños tienden a reducirla, lo que implica que puede dejar de ser representativa de la población.

La media, \bar{X} , de n medidas viene dada por:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

3.2.3.-Desviación estándar o desviación típica

La desviación típica o desviación estándar (denotada con el símbolo σ o s , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

La desviación típica es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el promedio o variación esperada con respecto a la media aritmética.

La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas muestra la precisión de estas.

Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. La desviación estándar es uno de tres parámetros de ubicación central; muestra la agrupación de los datos alrededor de un valor central (la media o promedio).

La desviación estándar, s , de n medidas viene dada por:

$$s = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

3.2.4.-Varianza

La varianza (que suele representarse como σ^2) de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Está medida en unidades distintas de las de la variable. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros, la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades de los datos de la variable objeto de estudio. La varianza tiene como valor mínimo 0.

Hay que tener en cuenta que la varianza puede verse muy influida por los valores atípicos y no se aconseja su uso cuando las distribuciones de las variables aleatorias tienen colas pesadas. En tales casos se recomienda el uso de otras medidas de dispersión más robustas.

$$\text{Varianza} = s^2$$

3.2.5.-Desviación relativa

La desviación relativa, también llamada coeficiente de variación, es una medida de dispersión relativa que se obtiene dividiendo la desviación estándar entre la media aritmética de un conjunto de datos.

Puesto que tanto la desviación estándar como la media están ambas expresadas en las mismas unidades que los datos originales, puede utilizarse para comparar la variabilidad de dos conjuntos de datos. También puede ser usada cuando se tiene información sobre la variabilidad de un mismo fenómeno en estudios anteriores puesto que la desviación relativa expresa la variabilidad porcentual.

3.2.6.-Distribución de las medidas tomadas

Pese a que la desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de un conjunto de resultados alrededor del valor medio, no indica la forma de la distribución.

Para poder aclararlo se necesita un número significativo de medidas. El número de medidas de los diferentes comportamientos de las cintas adhesivas sensibles a la presión utilizadas no constituye un valor suficiente para poder realizar de forma fiable el estudio estadístico.

El conjunto de todas las medidas recibe el nombre de población. La media de la población se conoce por μ , así como la desviación estándar es σ . Los valores de la media \bar{x} y de la desviación estándar s nos darán una aproximación de μ y de σ .

Distribución normal o Gaussiana

El modelo matemático que habitualmente se emplea es la distribución normal o Gaussiana que se describe por la ecuación:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

En estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia se aproxima a fenómenos reales.

La gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada. La curva es simétrica respecto a μ y cuanto mayor sea el valor de σ mayor es la variabilidad de la curva.

Un análisis un poco más detallado demuestra que, cualesquiera que sean los valores de μ y σ , la distribución normal tiene las siguientes propiedades:

- Aproximadamente el 68% de los valores de la población se encuentran dentro de $\pm 1\sigma$ de la media.
- Aproximadamente el 95% de los valores de la población se encuentran dentro de $\pm 2\sigma$ de la media.
- Aproximadamente el 99,7% de los valores de la población se encuentran dentro de $\pm 3\sigma$ de la media.

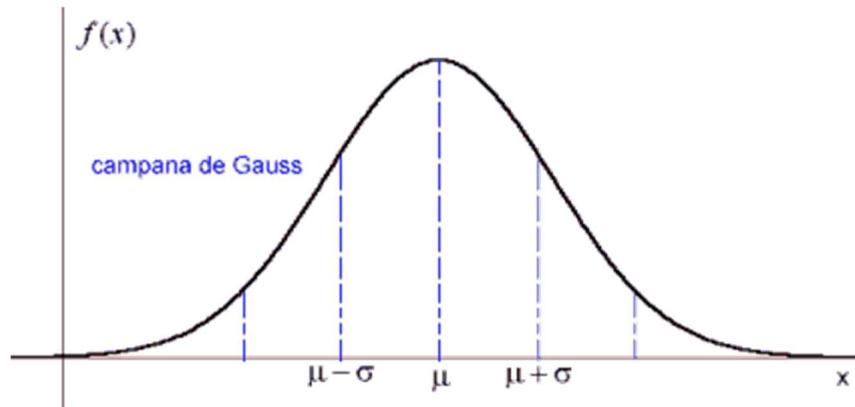


Figura 11 Distribución Gaussiana

La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos. Mientras que los mecanismos que subyacen a gran parte de este tipo de fenómenos son desconocidos, por la enorme cantidad de variables incontrolables que en ellos intervienen, el uso del modelo normal puede justificarse asumiendo que cada observación se obtiene como la suma de unas pocas causas independientes. La distribución normal también es importante por su relación con la estimación por mínimos cuadrados, uno de los métodos de estimación más simples y antiguos.

3.2.7.-Datos Anómalos. Contraste de Grubbs [22]

Frecuentemente es posible encontrarse con la situación de que uno (o posiblemente más) de los resultados que se obtienen de un conjunto de medidas difiera del resto de forma inexplicable. Estas medidas se denominan resultados anómalos (outliers). En algunos casos, un resultado anómalo puede atribuirse a un error humano.

Obviamente, los valores finales de la media y la desviación estándar dependerán de si los datos anómalos han sido rechazados o no. Puesto que la discusión sobre la precisión y exactitud de un método depende de los valores finales, tiene que quedar claro siempre si los datos anómalos han sido rechazados y, si es así, por qué.

En este Trabajo Fin de Grado se ha utilizado el contraste de Grubbs para hallar y descartar los datos anómalos.

El contraste de Grubbs compara la desviación entre el valor sospechoso y la media muestral, con la desviación estándar de la muestra. Este contraste está recomendado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) por delante de otros contrastes como el de Dixon.

3.2.8.-Análisis de la Varianza [23], [24]

El análisis de la varianza (también denominado ANOVA) es una potente herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria, para el control de procesos, como en el laboratorio de análisis, para el control de métodos analíticos. Los ejemplos de aplicación son múltiples, pudiéndose agrupar, según el objetivo que persiguen, en dos principalmente: la comparación de múltiples columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso.

La comparación de diversos conjuntos de resultados es habitual en los laboratorios analíticos. Así, por ejemplo, puede interesar comparar diversos métodos de análisis con diferentes características, diversos analistas entre sí, o una serie de laboratorios que analizan una misma muestra con el mismo método (ensayos colaborativos). También sería el caso cuando queremos analizar una muestra que ha estado sometida a diferentes tratamientos o ha estado almacenada en diferentes condiciones. En todos estos ejemplos hay dos posibles fuentes de variación: una es el error aleatorio en la medida y la otra es lo que se denomina factor controlado (tipo de método, diferentes condiciones, analista o laboratorio,...). Una de las herramientas estadísticas más utilizadas que permite la separación de las diversas fuentes de variación es el análisis de la varianza (ANOVA, del inglés Analysis of Variance).

El ANOVA también puede utilizarse en situaciones donde ambas fuentes de variación son aleatorias. Para utilizar el ANOVA de forma satisfactoria deben cumplirse tres tipos de hipótesis, aunque se aceptan ligeras desviaciones de las condiciones ideales:

-) Cada conjunto de datos debe ser independiente del resto.
-) Los resultados obtenidos para cada conjunto deben seguir una distribución normal.
-) Las varianzas de cada conjunto de datos no deben diferir de forma significativa.

El análisis de varianza es una técnica que se puede utilizar para decidir si las medias de dos o más poblaciones son iguales. La prueba se basa en una muestra única, obtenida a partir de cada población. El análisis de varianza puede servir para determinar si las diferencias entre las medias muestrales revelan las verdaderas diferencias entre los valores medios de cada una de las poblaciones, o si las diferencias entre los valores medios de la muestra son más indicativas de una variabilidad de muestreo.

Si el valor estadístico de prueba (análisis de varianza) nos impulsa a aceptar la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias observadas entre las medias de las muestras se deben a la variación casual en el muestreo (y por tanto, que los valores medios de población son iguales). Si se rechaza la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias entre los valores medios de la muestra son demasiado grandes como para deberse únicamente a la casualidad (y por ello, no todas las medias de población son iguales).

Los datos para el análisis de varianza se obtienen tomando una muestra de cada población y calculando la media muestral y la variancia en el caso de cada muestra.

3.2.9.-Fiabilidad de Componentes

La aplicación de las nuevas tecnologías a la industria en general mejora y hace posible la fabricación de nuevos productos, pero a su vez introduce nuevos elementos, primordialmente electrónicos, que aumentan la complejidad de los procesos industriales, añadiendo nuevos riesgos e influyendo en la fiabilidad-seguridad de toda la instalación. Este mayor número y formas de riesgos junto con la complejidad de los sistemas han obligado a considerar en profundidad la fiabilidad y seguridad de las instalaciones actualmente en marcha.

Ingeniería de la fiabilidad [25]

El concepto de seguridad está íntimamente ligado con la fiabilidad ya que cuanto más fiable es un sistema, lo cual depende de sus componentes, más seguro es. La fiabilidad y seguridad se deben aplicar en todas las fases del proyecto, construcción, puesta en marcha y mantenimiento de la planta industrial. Por otro lado la prevención de pérdidas o seguridad industrial aplicada con rigor científico se basa en gran parte en la aplicación de los métodos probabilísticos a los problemas de fallos en los procesos industriales. Todo ello se ha llevado a cabo a través de una disciplina denominada ingeniería de fiabilidad, para la cual se dispone de las adecuadas técnicas de predicción, que han sido fundamentales para el aseguramiento de la calidad de productos y procesos. En éste ámbito se trata la disponibilidad, operatividad y mantenibilidad de los sistemas técnicos, incluyendo el análisis probabilístico de riesgos de la planta.

Los elementos y dispositivos con funciones clave de seguridad, además de ser idóneos ante unas exigencias del sistema, deben asegurar una correcta respuesta en el tiempo.

Todo ello requiere conocer a priori la fiabilidad de los elementos de seguridad que se instalan en las instalaciones, información que debe ser suministrada por los fabricantes, pero debidamente controlada y contrastada a través de nuestro programa de mantenimiento a fin y efecto de verificar que nos mantenemos dentro de las condiciones de respuesta del sistema separadas. Sólo entonces podremos afirmar que la probabilidad de fallo de un componente es conocida y está controlada.

Fiabilidad e Infiabilidad [26]

Para crear un modelo matemático que defina la probabilidad de fallo de un elemento, se considera el funcionamiento de un determinado elemento en el medio para él especificado. La variable aleatoria se define como el tiempo durante el que el elemento funciona satisfactoriamente antes de que se produzca un fallo. La probabilidad de que el elemento proporcione unos resultados satisfactorios en el

momento t se puede definir como fiabilidad, esta será designada como $R(t)$ y si el tiempo de fallo es T entonces se puede escribir:

$$R(t) = \Pr(T > t)$$

De una forma práctica si se designa:

$N_s(t)$ = N° de elementos en funcionamiento en el instante t .

$N(0)$ = N° de elementos en funcionamiento al principio.

$N_f(t)$ = N° de elementos averiados hasta el momento t .

Se cumplirá:

$$N(0) = N_f(t) + N_s(t)$$

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N(0)} = 1 - \frac{N_f(t)}{N(0)}$$

La fiabilidad $R(t)$ está relacionada con la función inversa llamada infiability $Q(t)$ que es su probabilidad contraria, es decir, la probabilidad de que ocurra un fallo antes del instante t . Por lo tanto la infiability valdrá:

$$Q(t) = \frac{N_f(t)}{N(0)}$$

Cumpléndose que:

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

Tasa de fallos

Supongamos que un material funciona en el instante t , la probabilidad condicional, de que se produzca una avería entre el momento t y $t + \Delta t$ puede escribirse como $\lambda(t)\Delta t$; la función $\lambda(t)$ es por definición tasa de fallos o averías y se expresa en (tiempo)⁻¹. Matemáticamente tiene la expresión siguiente:

$$\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t; T > t) = \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t)}{R(t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} = \lambda(t)\Delta t$$

De donde después de realizar operaciones nos da el valor de la fiabilidad:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right)$$

Fiabilidad: la distribución de Weibull [27], [28]

La distribución de Weibull complementa a la distribución exponencial y a la normal. A causa de su mayor complejidad sólo se usa cuando se sabe de antemano que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallos o cuando se han producido muchos fallos (al menos 10) y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple.

La distribución de Weibull permite estudiar cuál es la distribución de fallos de un componente clave de seguridad que se pretende controlar y que a través del registro de fallos se observa que éstos varían a lo largo del tiempo, dentro de lo que se considera tiempo normal de uso. El método no determina cuáles son las variables que influyen en la tasa de fallos, tarea que quedará en manos del analista, pero al menos la distribución de Weibull facilitará la identificación de aquellos y su consideración, aparte de disponer de una herramienta de predicción de comportamientos. Esta metodología es útil para aquellas empresas que desarrollan programas de mantenimiento preventivo en sus instalaciones.

Sabemos que la tasa de fallos se puede escribir, en función de la fiabilidad, de la siguiente forma:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{d[R(t)]}{dt}}{R(t)}$$

Siendo:

$\lambda(t)$ = Tasa de Fallos

$R(t)$ = Fiabilidad

$F(t)$ = Infiabilidad o función acumulativa de fallos

T = Tiempo

Concluyendo que la expresión matemática para la fiabilidad según Weibull es:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Siendo:

t_0 = parámetro inicial de localización

η = parámetro de escala o vida característica

β = parámetro de forma

Se ha podido demostrar que gran cantidad de representaciones de fiabilidades reales pueden ser obtenidas a través de ésta ecuación.

La distribución de Weibull se representa normalmente por la función acumulativa de distribución de fallos $F(t)$:

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^\beta \right]$$

Siendo la función densidad de probabilidad:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^\beta \right]$$

La tasa de fallos para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Las ecuaciones anteriores sólo se aplican para valores de $(t - t_0) \geq 0$. Para valores de $(t - t_0) < 0$, las funciones de densidad y la tasa de fallos valen 0. Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación física:

t_0 es el parámetro de posición o vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.

η es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo del eje de ordenadas (generalmente tiempo, aunque en este Trabajo Fin de Grado será tensión de rotura).

β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.

4.-Resultados

4.1.-Resultados probetas

4.1.1.-Resultados globales

A continuación se muestran los resultados de las probetas con las distintas características tras haber sido ensayadas por cizalla en las condiciones descritas antes:

Para el tratamiento superficial con imprimación sobre el acero e imprimación sobre el material compuesto de fibra de carbono (Tratamiento 1):

Tabla 7: Propiedades mecánicas

Cinta VHB	Tmax (Kpa)	E1 (zona 1) (Kpa)	E2 (zona 2) (Kpa)	Ciclos	Def.lin.max (%)	Gamma.max (%)	Tipo de rotura
4912-F	517,706	442,379	1750,87	0	41,11	87,76	Adhesiva por el acero
	433,246	374,065	1390,03	0	41,07	87,75	Adhesiva por el acero
	693,24	598,4	2045,7	288	46,88	89,24	Adhesiva por el acero
	755,45	658,58	2291,1	288	48,3	89,55	Mixta
	962,89	810,73	3060,7	720	43,97	88,54	Mixta
	1044,35	821,41	3543,9	720	45,9	89,01	Adhesiva por el acero
4991-F	490,995	373,41	1817,41	0	45,6	88,94	Adhesiva por el acero
	464,268	320,1	2227,05	0	45,97	89,03	Mixta
	495,82	360,98	1562	288	41,22	87,79	Adhesiva por el acero
	545,29	316,86	2033,8	288	45,49	88,91	Mixta
	667,15	419,91	1581,2	624	39,73	87,35	Mixta
	792,83	443,41	1993	624	44,95	88,78	Adhesiva por el acero
	798,72	442,97	2500,1	720	43,97	88,54	Adhesiva por el acero

Para el tratamiento superficial con imprimación sobre el acero y tratamiento de plasma sobre el material compuesto de fibra de carbono (Tratamiento 2):

Cinta VHB	Tmax (Kpa)	E1 (zona 1) (Kpa)	E2 (zona 2) (Kpa)	Ciclos	Def.lin.max (%)	Gamma.max (%)	Tipo de rotura
4912-F	498,896	364,838	1708,47	0	51,85	90,25	Adhesiva por el acero
	474,078	367,34	1545,63	0	48,02	89,49	Adhesiva por el acero
	615,29	434,63	1286,4	288	45,24	88,85	Adhesiva por el acero
	915,86	751,53	2645,9	720	45,2	88,84	Adhesiva por el acero
	916,92	750,94	2742,5	720	45,49	88,91	Mixta
4991-F	405,4	291,242	1986,44	0	42,82	88,24	Adhesiva por el acero
	423,27	290,55	2180,14	0	43,4	88,4	Adhesiva por el acero
	445,7	343,93	1588,7	288	34,84	85,63	Mixta
	548,1	351,93	1723,5	288	39,26	87,2	Adhesiva por el acero
	645,2	391,47	1808,7	624	37,48	86,61	Adhesiva por el acero
	726,49	412,88	1689,8	624	38,7	87,02	Adhesiva por el acero
	729,83	420,03	1708,8	720	37,9	86,75	Adhesiva por el acero

Como se puede observar, se han extraído dos módulos de elasticidad o elasticidades (E_1 , E_2) a partir de las gráficas de tensión contra deformación angular, esto se puede deber a que durante el ensayo de cizalla se han producido dos fenómenos en dos momentos distintos del ensayo, dando lugar a dos zonas diferenciadas en las curvas de tensión-deformación angular y por tanto a dos módulos de elasticidad distintos en la unión adhesiva.

En la primera zona, el módulo de elasticidad es menor, esto se podría deber a que en esa zona en la unión se estuviese deformando la cinta VHB™, hasta que comienza a romperse dando lugar a la segunda zona, donde el módulo es mayor debido a la rotura de las interfases de la cinta adhesiva, rigidificándose la unión debido a la alta deformación. En el Anexo I se pueden ver las gráficas de tensión en función de la deformación angular y en ellas se pueden apreciar claramente las dos zonas.

Como aclaración, decir que cuando en las tablas de las propiedades mecánicas pone $\Gamma_{\text{máx}}$ se refiere a la deformación angular existente en el momento en que se alcanza la mayor tensión máxima. Lo mismo ocurre con la deformación lineal máxima.

4.1.2.-Propiedades respecto al número de ciclos

A partir de los resultados del apartado 4.1.1.-*Resultados globales* se han elaborado unas gráficas donde se puede observar la variación de las distintas propiedades mecánicas de las uniones adhesivas según aumenta el número de ciclos:

Tensión máxima vs. Número de ciclos

Tratamiento 1 (Imprimación acero, Imprimación material compuesto)

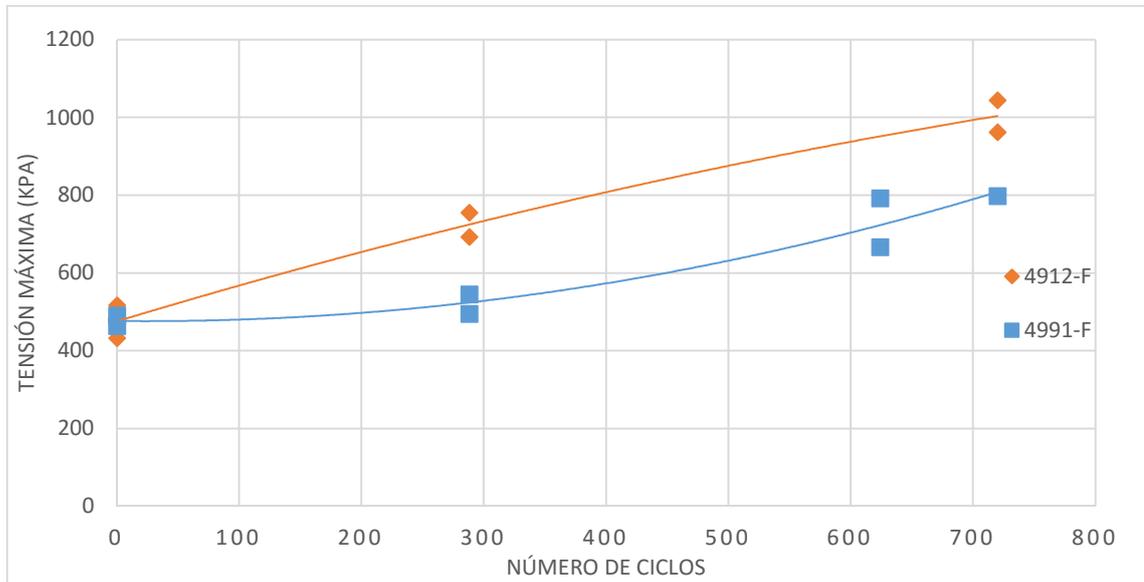


Figura 12: Tensión máx. vs. N° ciclos

Tratamiento 2 (Imprimación acero, Plasma sobre material compuesto)

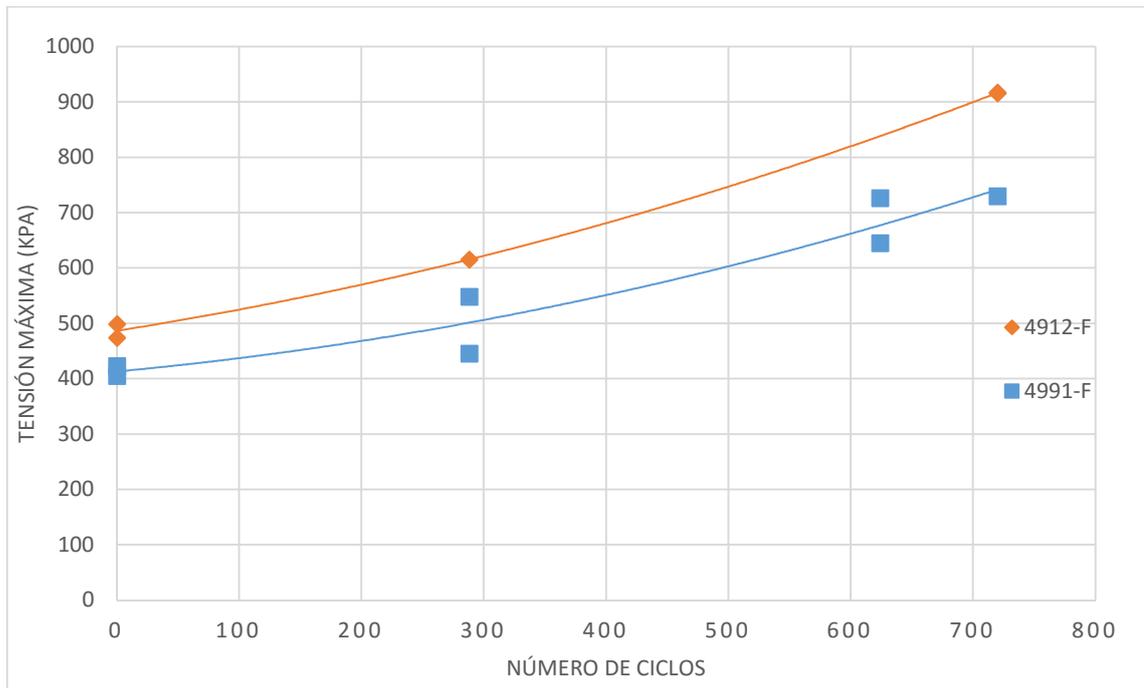


Figura 13: Tensión máx. vs. N° ciclos

En ambos casos se puede apreciar como la tensión máxima registrada aumenta según aumenta el número de ciclos de fatiga térmica. Esto indica un aumento de la dureza de la unión.

Módulo de elasticidad de la zona 1 vs. Número de ciclos

Tratamiento 1 (Imprimación acero, Imprimación material compuesto)

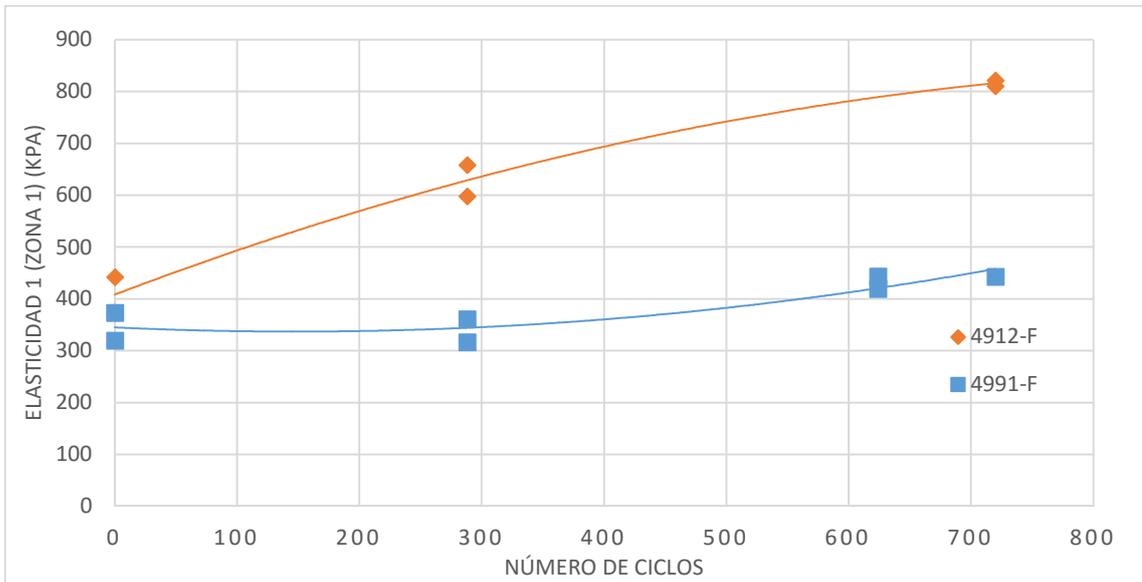


Figura 14: Módulo de elasticidad 1. vs. Nº ciclos

Tratamiento 2 (Imprimación acero, Plasma sobre material compuesto)

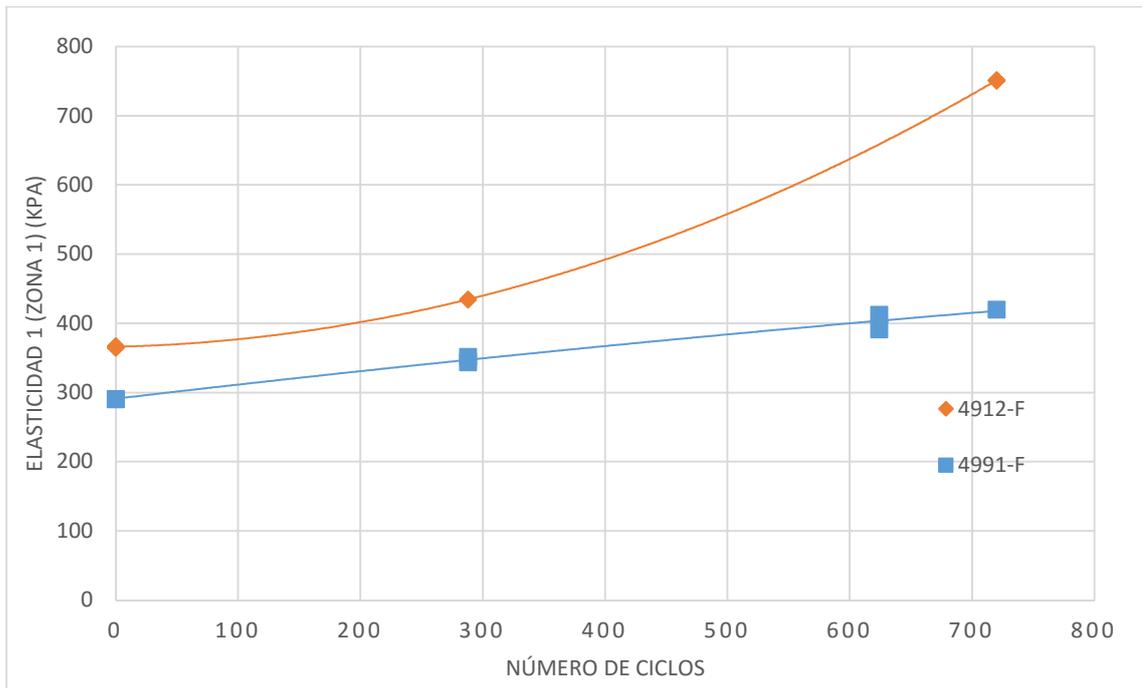


Figura 15: Módulo de elasticidad 1. vs. Nº ciclos

Se observa un aumento del módulo de elasticidad en la zona 1 de la curva tensión vs deformación angular a mayor número de ciclos, esto implica un aumento de la rigidez de la unión adhesiva. Sin embargo la cinta VHB™ 4912 F aumenta su rigidez más drásticamente que la cinta VHB™ 4991 F.

Módulo de elasticidad de la zona 2 vs. Número de ciclos

Tratamiento 1 (Imprimación acero, Imprimación material compuesto)

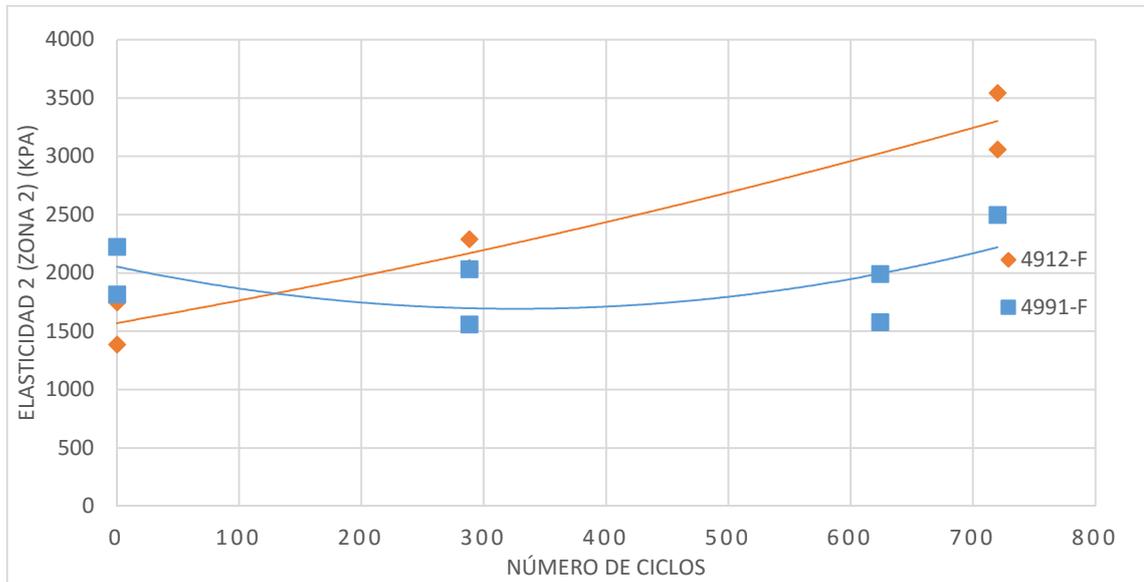


Figura 16: Módulo de elasticidad 2. vs. Nº ciclos

Tratamiento 2 (Imprimación acero, Plasma sobre material compuesto)

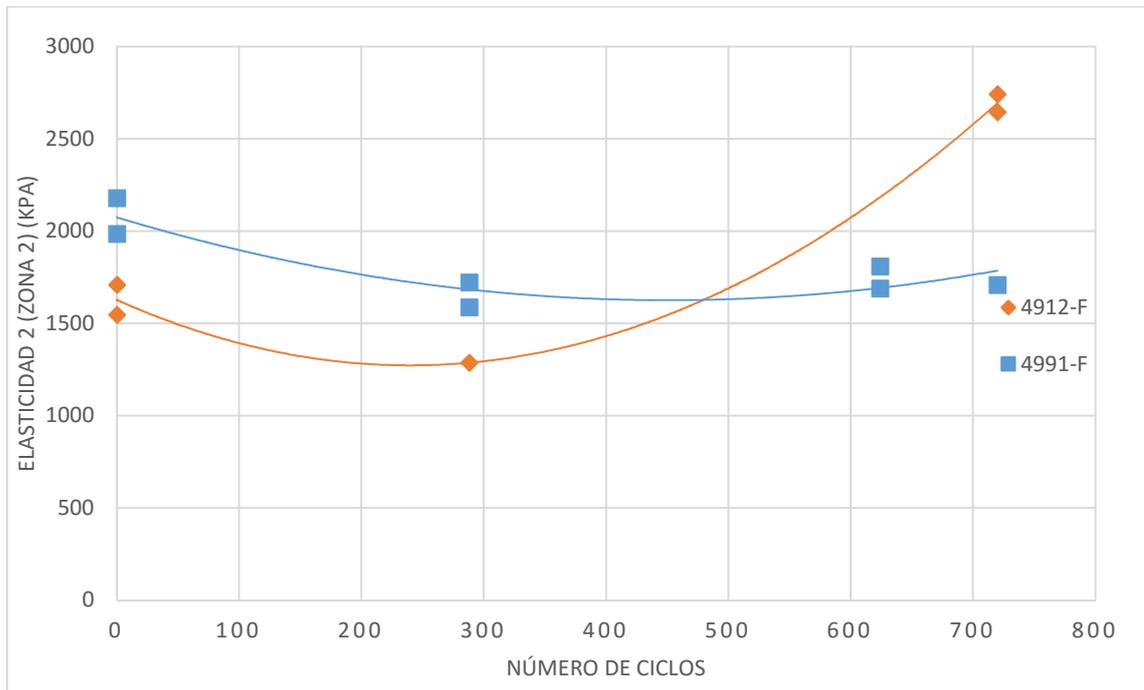


Figura 17: Módulo de elasticidad 2. vs. Nº ciclos

Igual que con los módulos de la zona 1, la cinta 4912 F aumenta su módulo y por tanto su rigidez conforme aumenta el número de ciclos. En la cinta 4991 F por el contrario el módulo elástico de la zona 2 parece mantenerse constante sin observarse una gran influencia por parte de los ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Deformación lineal máxima vs. Número de ciclos

Tratamiento 1 (Imprimación acero, Imprimación material compuesto)

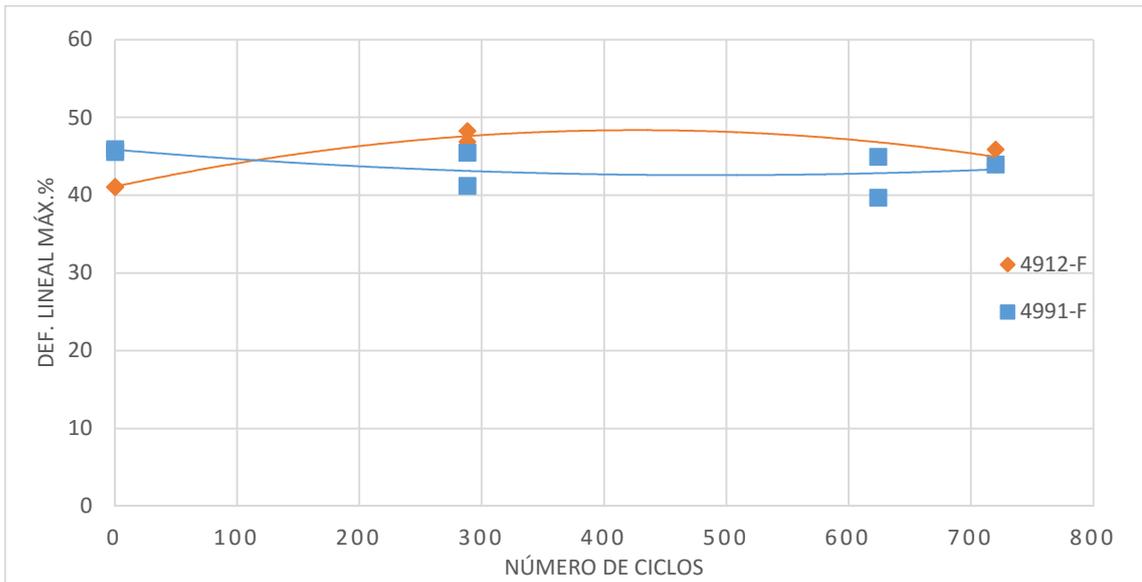


Figura 18: Def. lineal vs. N° ciclos

Tratamiento 2 (Imprimación acero, Plasma sobre material compuesto)

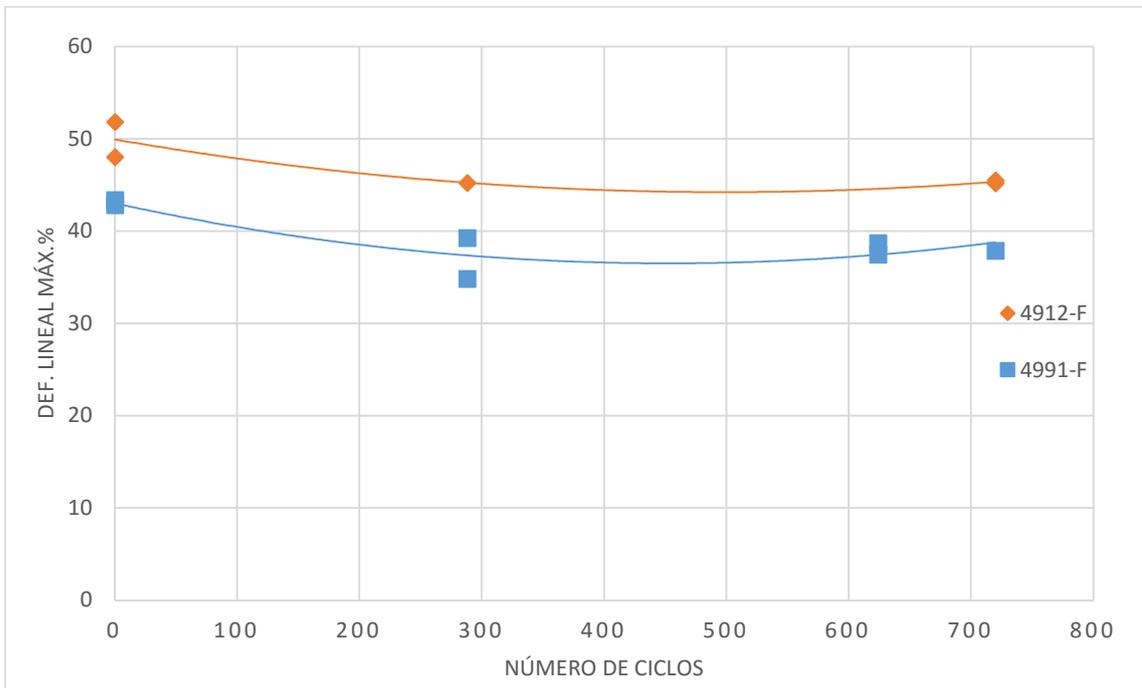


Figura 19: Def. lineal vs. N° ciclos

No se aprecian cambios significativos de la deformación lineal de las uniones adhesivas al alcanzar la tensión máxima con el incremento de ciclos de fatiga térmica.

Deformación angular máxima vs. Número de ciclos

Tratamiento 1 (Imprimación acero, Imprimación material compuesto)

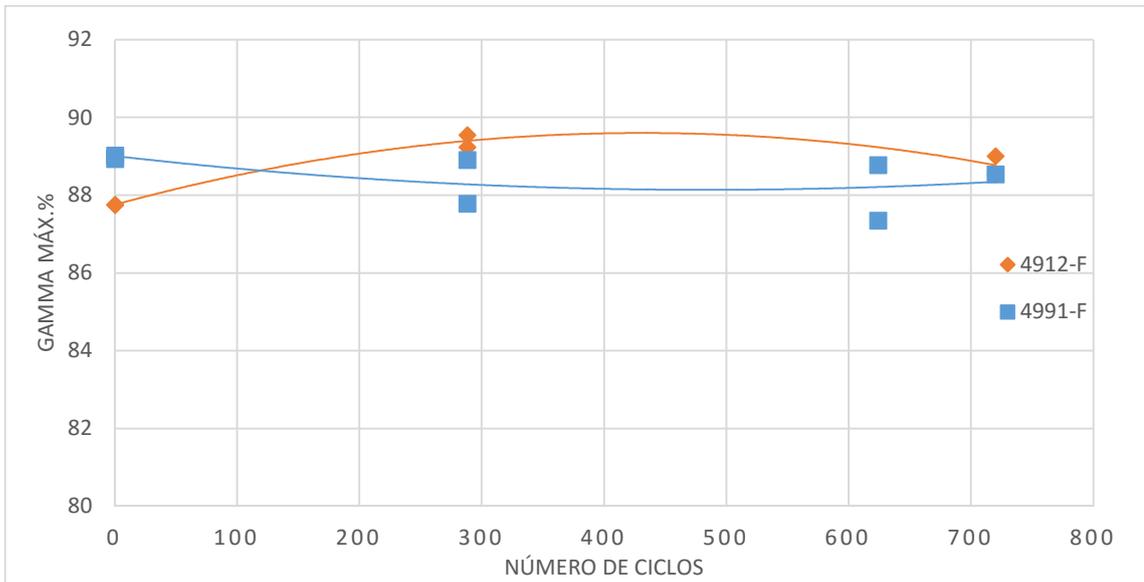


Figura 20: Def. angular vs. Nº ciclos

Tratamiento 2 (Imprimación acero, Plasma sobre material compuesto)

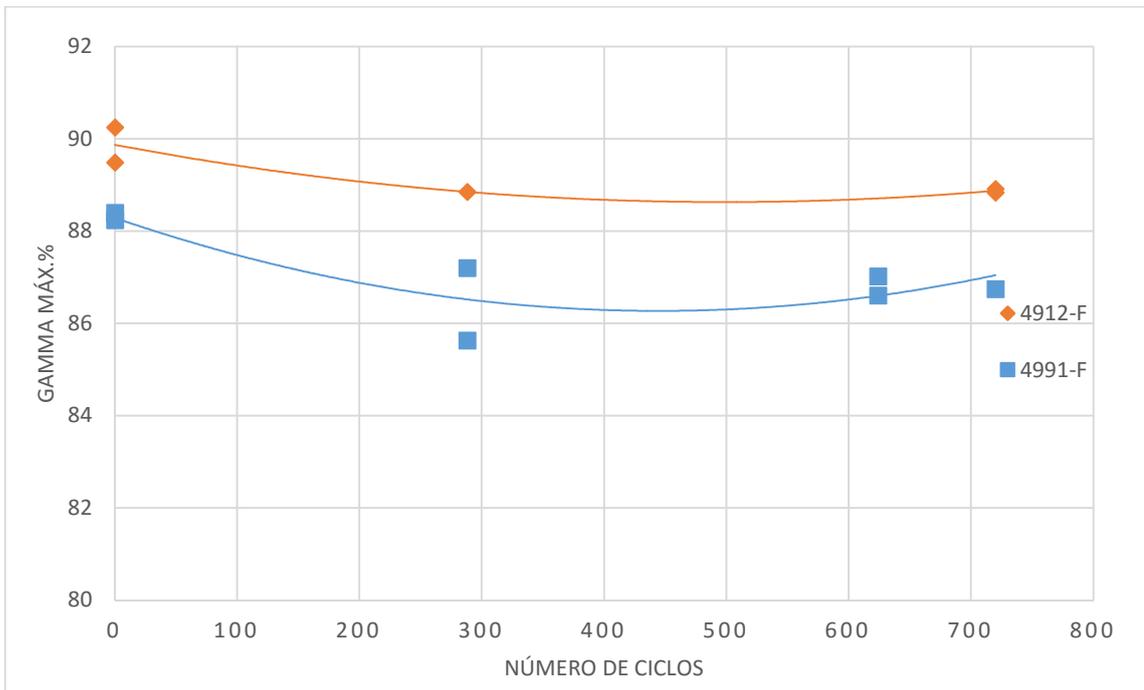


Figura 21: Def. angular vs. Nº ciclos

Al igual que con la deformación lineal, con el aumento del número de ciclos la deformación angular no muestra cambios significativos.

4.2.-Resultados estadísticos

4.2.1.-Distribuciones

Aclaraciones previas

Como se ha indicado en el apartado 3.2.1.-*Acerca del estudio estadístico en este trabajo*, el número de resultados obtenidos tras los ensayos es insuficiente para poder considerar unos resultados del estudio estadístico fiable. Para poder aceptar correctamente los siguientes parámetros estadísticos, sería necesario haber realizado un número mayor de ensayos para cada subgrupo de probetas (cada subgrupo se definiría por el tipo de cinta VHB™ utilizada, el tratamiento superficial aplicado y el número de ciclos de fatiga térmica sufridos). En este trabajo en cada subgrupo distinto sólo se dispone de 2 o 3 ensayos, los cuales no son suficientes para poder garantizar unos resultados fiables dentro del estudio estadístico.

En total se disponen de 14 subgrupos distintos de probetas, cada uno con 1, 2 o 3 ensayos, en cada subgrupo se debería hacer un estudio estadístico de 10 ensayos. Sin embargo, el tiempo de trabajo de este trabajo ha sido limitado, por ello se realizará el estudio estadístico de uno de los subgrupos con el objetivo, no de conseguir unos resultados fiables, sino de mostrar la metodología de trabajo a seguir en futuros proyectos en los cuales se realice un número de ensayos por subgrupo adecuado.

Hecha esta aclaración, se procede a la realización del estudio estadístico en el subgrupo de probetas correspondiente a las probetas unidas con cinta adhesiva 4912 F, con un tratamiento superficial 1 aplicado y un número de ciclos nulo. Este estudio será ejemplo de cómo deben hacerse el resto de estudios estadísticos, pues no es ideal hacer 14 estudios estadísticos distintos en donde el número de ensayos realizados para cada subgrupo no es mayor a tres probetas.

Distribución de resultados

En este subgrupo se han obtenido los siguientes resultados correspondientes a estos parámetros estadísticos:

Tabla 9: Parámetros estadísticos básicos

Tensión máxima (KPa)		
Media	Desviación estándar (s)	Varianza (s ²)
475,476	59,72	3566,7458

Y respecto a la distribución se espera que incluyendo un número mayor de datos sea Gaussiana o Normal:

Tabla 10: Distribución

Resultados	Distribución
517,706	0,00520236
433,246	0,00520236

4.2.2.-Contraste de Grubbs

Como ya se ha explicado repetidas veces, se dispone de un número de datos muy limitado para realizar este estudio, esto queda representado en este apartado también, pues en el caso para el que se debe realizar este contraste de Grubbs y decidir qué datos son anómalos, no es posible hacer dicho contraste debido a que sólo se disponen de dos datos.

4.2.3.-Análisis de varianza

Al igual que con parámetros anteriores, sólo se ejecutará el análisis de varianza de un caso. A continuación se muestra el análisis de varianza del caso estudiado, el cual corresponde al estudio de los promedios, desviaciones típicas y varianzas de los datos correspondientes a las tensiones máximas de las probetas unidas con cinta VHB 4912 F, con un tratamiento superficial tipo 1:

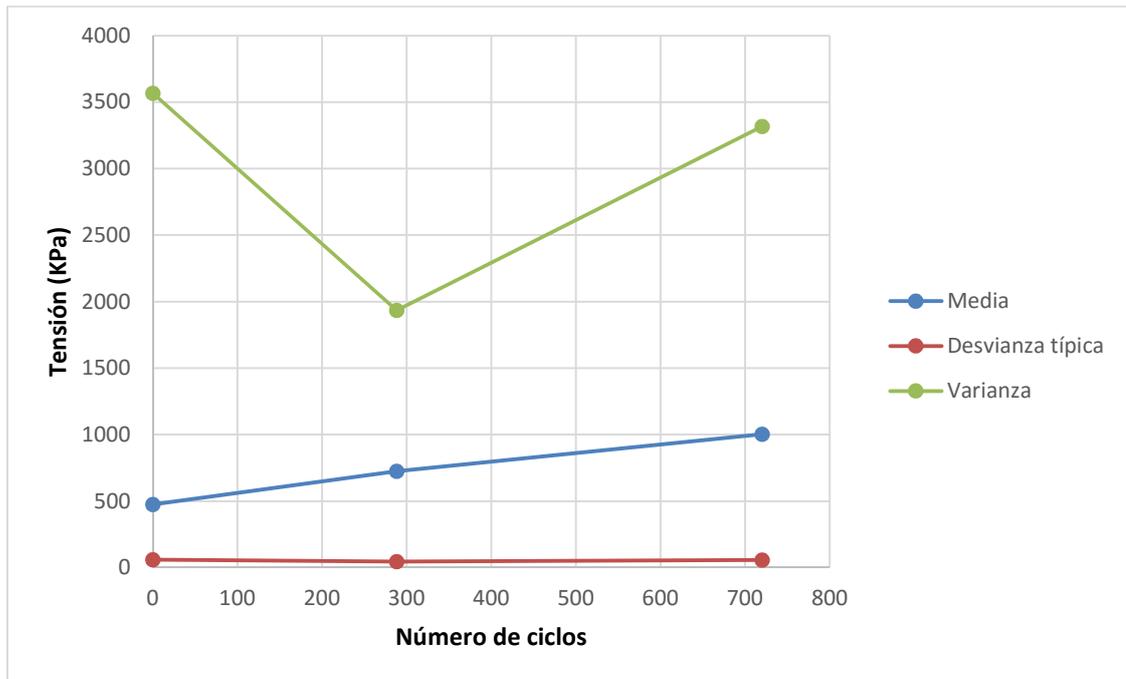


Figura 22: Análisis de la Varianza de la Tensión máxima

Se observa que las desviaciones típicas de las distintas probetas no varían significativamente, no ocurriendo esto con la varianza. Una vez más debe tenerse en cuenta que cada media, desviación típica y varianza se han obtenido con solo dos datos, lo cual demuestra que los datos de este análisis de varianza no sean fiables.

Para unos resultados satisfactorios, tanto la desviación típica como la varianza deberían mantenerse más o menos constantes.

4.2.4.-Análisis de Weibull

Se procede al análisis de Weibull de los resultados correspondientes a las probetas unidas con cinta VHB™ 4912 F, con tratamiento 1 aplicado y sin haber sufrido fatiga térmica. Este caso es representativo del resto de casos:

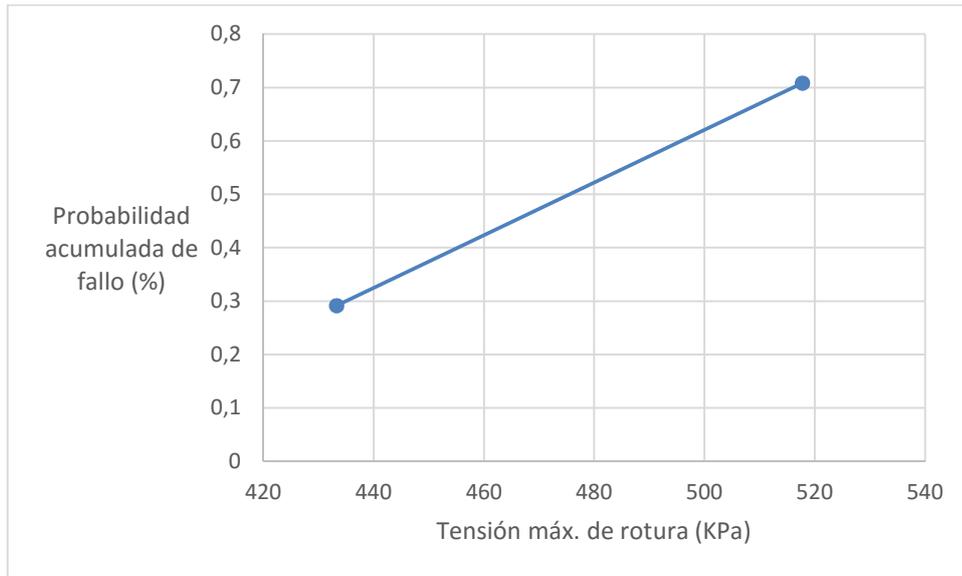


Figura 23: Probabilidad acumulada de fallo en función de la tensión

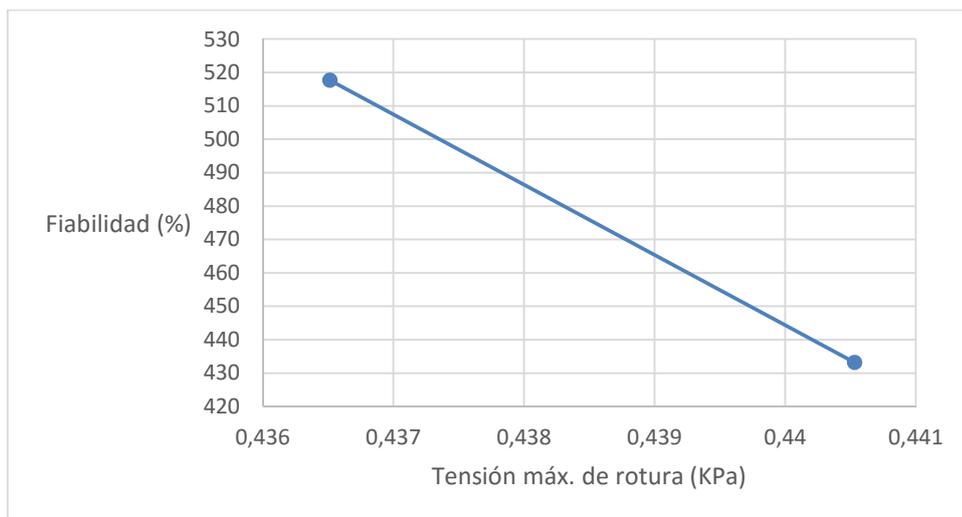


Figura 24: Fiabilidad de la unión en función de la tensión aplicada sobre ella

Los resultados de estas gráficas no son fiables, pues es necesario un mayor número de ensayos. Sin embargo si se puede ver la tendencia de las uniones a fallar según aumenta la tensión aplicada sobre ellas.

4.3.-Conclusiones

Pese a la falta de unos resultados estadísticos fiables, analizando los resultados globales:

1. Las uniones adhesivas realizadas con cintas VHB™ 4912 F y 4991 F presentan un evidente aumento de rigidez cuando son aplicados en ellas ciclos de calentamiento-enfriamiento. Esto es malo para la unión, pues es necesario que esta mantenga un comportamiento viscoelástico que asegure una correcta absorción y distribución de esfuerzos.
2. Se ha apreciado que la cinta adhesiva VHB™ 4991 F presenta una menor degradación de sus propiedades mecánicas viscoelásticas que la cinta adhesiva 4912 F. Es por ello que en futuros trabajos se recomienda el uso de la cinta 4991 F por delante de la 4912 F.
3. Igualmente debe señalarse que los sustratos que han recibido el tratamiento superficial 2, el cual consistió en la aplicación de una imprimación sobre el acero y un tratamiento de plasma sobre el material compuesto de fibra de carbono, han conseguido que en estas probetas se conserven de manera más eficaz las propiedades físicas de sus uniones. Por ello, es más recomendable el uso de este tratamiento 2 en vez del tratamiento 1 para mejorar la adhesión entre la cinta adhesiva y los sustratos. Los tratamientos superficiales realizados tienen un efecto positivo en la resistencia y durabilidad de la unión adhesiva.
4. En las gráficas de Tensión-Deformación angular se diferencian dos zonas distintas, en la primera el módulo de elasticidad es menor que en la segunda zona ya que en esta zona inicial del ensayo se produce la deformación de la cinta VHB, mientras que en la segunda zona se está produciendo la rotura o desgarro de las interfases de la unión.
5. Las cintas VHB utilizadas en este Trabajo de Fin de Grado han demostrado unas propiedades mecánicas ideales para la unión del acero y el material compuesto de fibra de carbono. Sin embargo, en las estructuras de autobuses, pese a no sufrir una fatiga térmica tan extrema como la realizada en este trabajo, las tensiones y esfuerzos que se producen en sus uniones pueden resultar demasiado altas para poder utilizar eficazmente las cintas VHB™ como un método de unión.
6. Otro punto en contra del uso de estas cintas adhesivas es el tipo de rotura encontrado en los distintos ensayos realizados con las cintas VHB™ a lo largo de este Trabajo, ya que en la mayoría de los casos la rotura ocurría de forma indeseada (rotura adhesiva o rotura mixta). Al diseñar una unión adhesiva hay que evitar que la rotura sea adhesiva, es decir, la separación nunca se debe producir en la interfase sustrato-adhesivo. Los modos de fractura adhesiva no son predecibles debido a que la magnitud de la fuerza de adhesión depende de un gran número de factores difícilmente controlables en su totalidad. Por ello, se busca conseguir fallos cohesivos en la unión ya que si se van a poder conocer las características mecánicas del adhesivo y por tanto, se pueden predecir las cargas admisibles en modo cohesivo bajo diferentes tipos de esfuerzos.
7. El buen comportamiento ante agentes externos este tipo de cintas pueden ser usadas incluso en ambientes con temperaturas relativamente altas o bajas y en presencia de disolventes y otros agentes químicos.
8. La facilidad de aplicación de las cintas adhesivas VHB™ juegan a favor de su implantación en este tipo de aplicación secundaria de refuerzo.

4.4.-Líneas de investigación futuras

Los esfuerzos del grupo de comportamiento en servicio de materiales del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid se centran en la actualidad en:

- Buscar otros tipos de adhesivos capaces de soportar los requerimientos necesarios para poder ser usados como sustitutos de uniones soldadas en la superestructura de autobuses y autocares.
- Optimizar estas uniones con nuevos tratamientos superficiales capaces de favorecer la unión.
- Tratar de predecir y dar respuesta a los distintos modos de fallo a través de un modelo teórico, permitiendo la implementación más segura de este tipo de uniones adhesivas en la superestructura de autobuses y autocares.

Bibliografía

- [1] CARRUTHERS, J.; The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. *Part III: The composite material research requirements of the rail industry*, 2004.
- [2] FELLOWS, N. A. et al. *Effects of design and adhesive modulus on the torsional stiffness of automotive structures*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2008, vol. 222, no 8, p. 1421-1428.
- [3] WILLIS, B.; *Composites Challenges*. Adhesives & Sealant Industry. February 2012.
- [4] M.MADRID: *Tecnología de la adhesión*; 2008; ASM International Handbook Committee. Volume 3, ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK. "Adhesives and Sealants". ASM International. (1990).
- [5] HOLLAWAY, L. C.; *Advances in adhesive joining of dissimilar materials with special reference to steels and FRP composites*. En Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005) Chen and Teng (eds). 2005.
- [6] MARTÍNEZ, M.A.: *Apuntes de la asignatura de Ingeniería de superficies*. Universidad Carlos III de Madrid. Curso 2014-1015.
- [7] HERRERA, C.: *Estudio del fallo de en uniones adhesivas con materiales compuestos*; Proyecto Fin de Carrera; Departamento de Mecánica de Medios Continuos; Universidad de Sevilla; 2013
- [8] D. Satas, Ed., *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*, 3rd edn, Satas & Associates, 1999.
- [9] J. Johnston, *Pressure Sensitive Adhesive Tapes: A Guide to their Function, Design, Manufacture, and Use*; Pressure Sensitive Tape Council; Northbrook, IL, 2003.
- [10] D.W.AUBREY; *Pressure-sensitive adhesives – adhesion properties*; Handbook of Adhesion; Second Edition; D.E.Packham; University of Bath, Bath, UK; 2005.
- [11] JOHNSTON, J.; *Pressure sensitive adhesive tapes: A guide to their function, design, manufacture, and use*. 2000.
- [12] TOWNSEND, B.W.; OHANEHI, D.C.; DILLARD, D.A.; AUSTIN, S.R.; SALMON, F.; GAGNON, D.R.; *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Part 1: 31 (2011) 639–649; Part 2: 31 (2011) 650–659.
- [13] 27-02-2015: <http://www.catalogoarquitectura.cl/adhesivo-vhb-apt-4956-4991/>
- [14] 23-02-2015: <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=PCT/US2001/027333>
- [15] División de Cintas y Adhesivos de 3M España. *Hoja de datos técnicos. VHB™ Cinta de espuma acrílica 4991*. Minnesota Mining and Manufacturing Company 3M. 2001.
- [16] División de Cintas y Adhesivos de 3M España. *Hoja de datos técnicos. VHB™ Cinta adhesiva de espuma acrílica 4912F*. Minnesota Mining and Manufacturing Company 3M. 2002.
- [17] Sika® España. *Hoja Técnica. Sika® CarboDur®, Lámina de fibra de carbono para reforzamiento estructural*. Sika AG. Edición 1. 2010. Identificación no. 5714.
- [18] SAITO, M.; IWATSUKI, S.; YASUNAGA, K.; ANDOH, K.; JSAE 21 (2000). 511-516.
- [19] Industrial Adhesives and Tapes Division 3M. *Technical Data. Adhesion Promoter 111*. Minnesota Mining and Manufacturing Company 3M. 2006. 70-0709-3983-3 (2/06).

- [20] GÁLVEZ,P.: *Uniones adhesivas estructurales para materiales disimilares cintas adhesivas sensibles a la presión*; Trabajo de Fin de Máster; Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química; Universidad Carlos III; Madrid; 2015.
- [21] ENCINAS, N.; LAVAT GIL, M.; DILLINGHAM, R.G.; ABENOJAR, J.; MARTINEZ, M.A.; *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 48. 2014. 85-91.
- [22] MILLER, J.N.; MILLER, J.C.; *Estadística y quimiometría para química analítica*. Cuarta edición, Madrid: Prentice Hall, 2002.
- [23] BOQUE, R.; MAROTO, A.; *El análisis de varianza (anova)*. Comparación de múltiples poblaciones. Grupo de Quimiometría y Cualimetría. Universitat Rovira i Virgili.
- [24] MASSART, D.L. et al. *Handbook of chemometrics and qualimetrics*: Part A. Elsevier Science Inc., 1997.
- [25] ASIAIN SASTRE, J.; *Ingeniería de Fiabilidad*. Revista Ingeniería del Mantenimiento. Canarias. Número 4. 2011.
- [26] TAMBORERO DEL PINO, J.M. *Fiabilidad de Componentes: la distribución exponencial*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. NTP 316. 1994. NIPO: 211-94-008-1.
- [27] TAMBORERO DEL PINO, J.M.; *Fiabilidad: La distribución de Weibull*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. NTP 331. 1994. NIPO: 211-95-013-0.
- [28] MARTINEZ, L.; *Métodos de inferencia para la distribución Weibull: aplicación en fiabilidad industrial*. Trabajo Fin de Máster. Máster en Técnicas Estadísticas. Universidad de Vigo. 2011.

Anexo I.-Gráficas Tensión-Deformación angular

Tratamiento 1: Imprimación sobre acero, Imprimación sobre material compuesto:

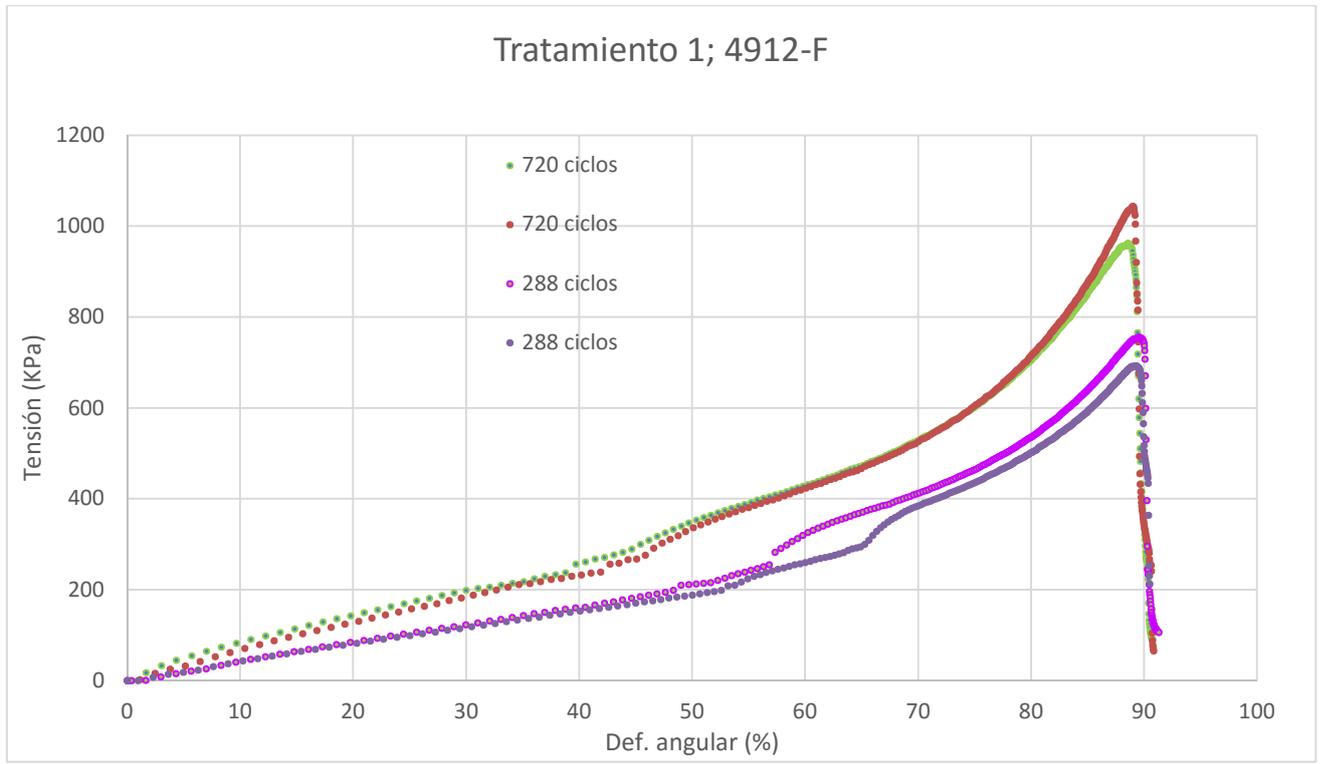


Figura 25: Gráfica tensión-deformación angular para probetas con tratamiento superficial 1 y cinta VHB 4912 F

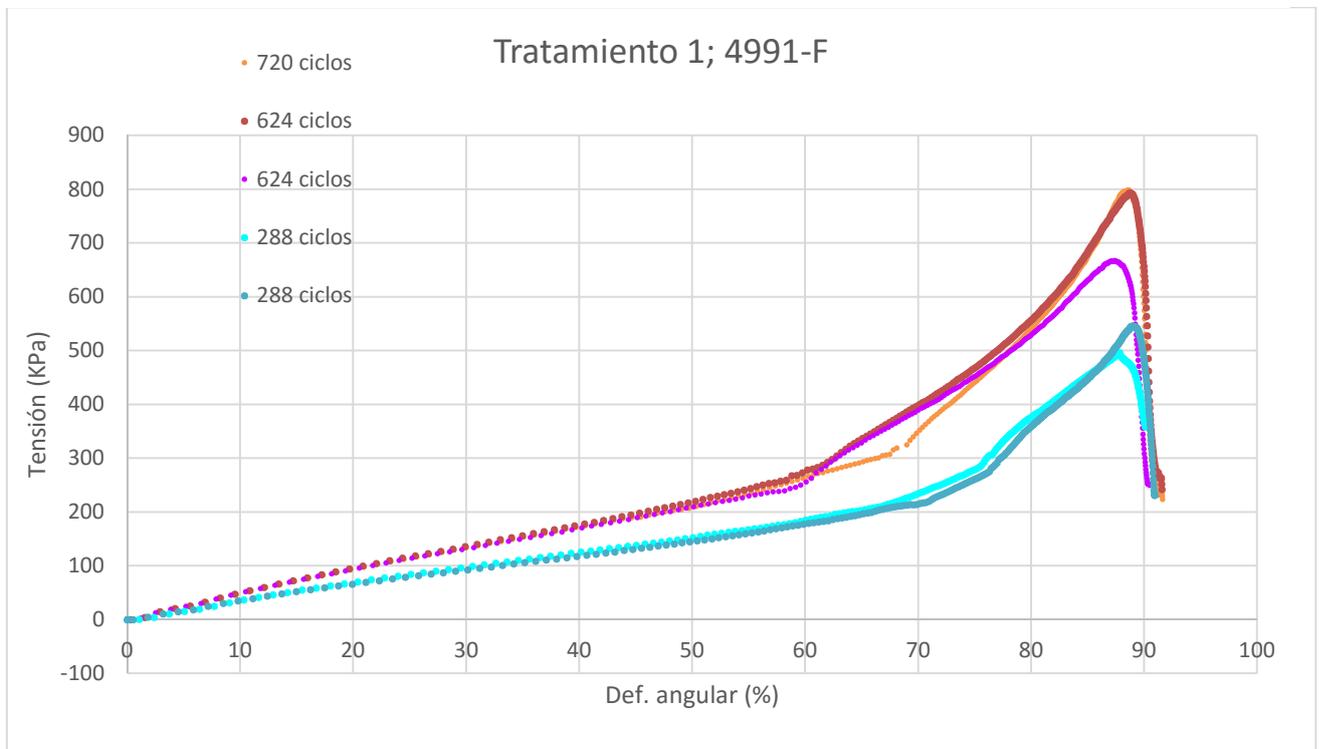


Figura 26: Gráfica tensión-deformación angular para probetas con tratamiento superficial 1 y cinta VHB 4991 F

Tratamiento 2: Imprimación sobre acero, Tratamiento superficial de plasma sobre material compuesto de fibra de carbono:

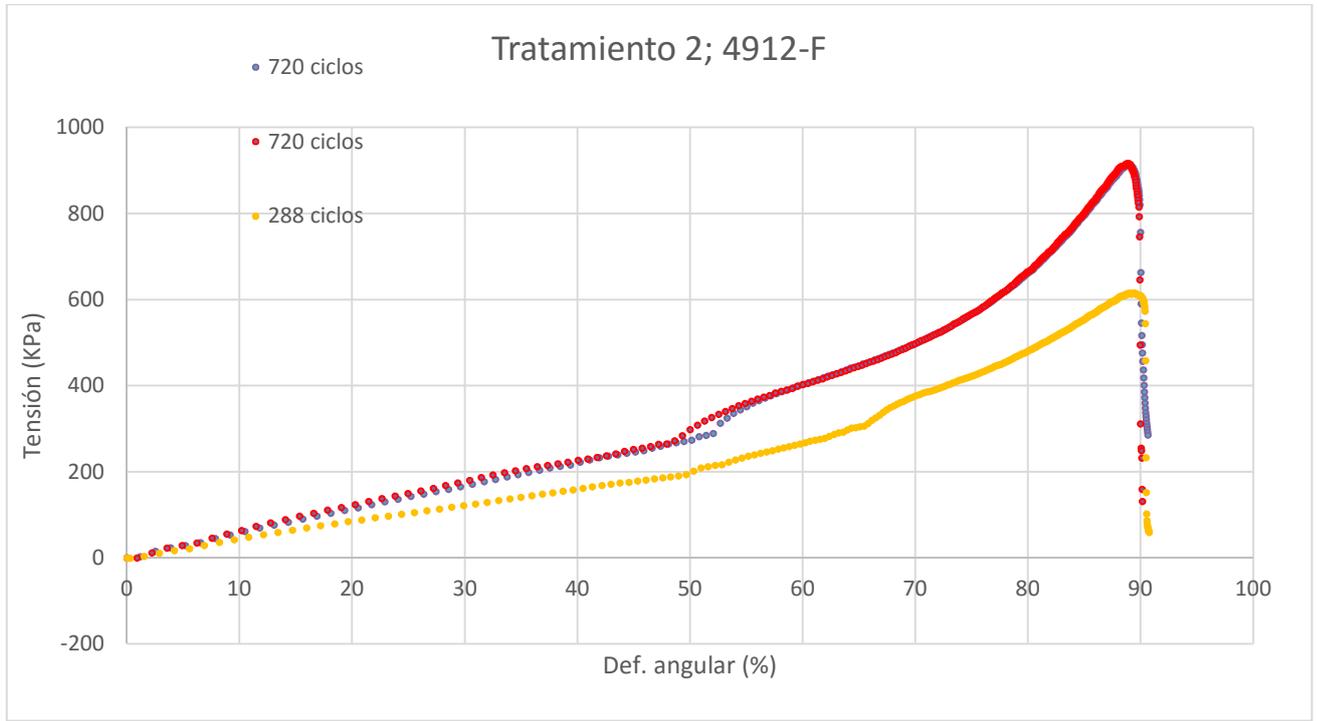


Figura 27: Gráfica tensión-deformación angular para probetas con tratamiento superficial 2 y cinta VHB 4912 F

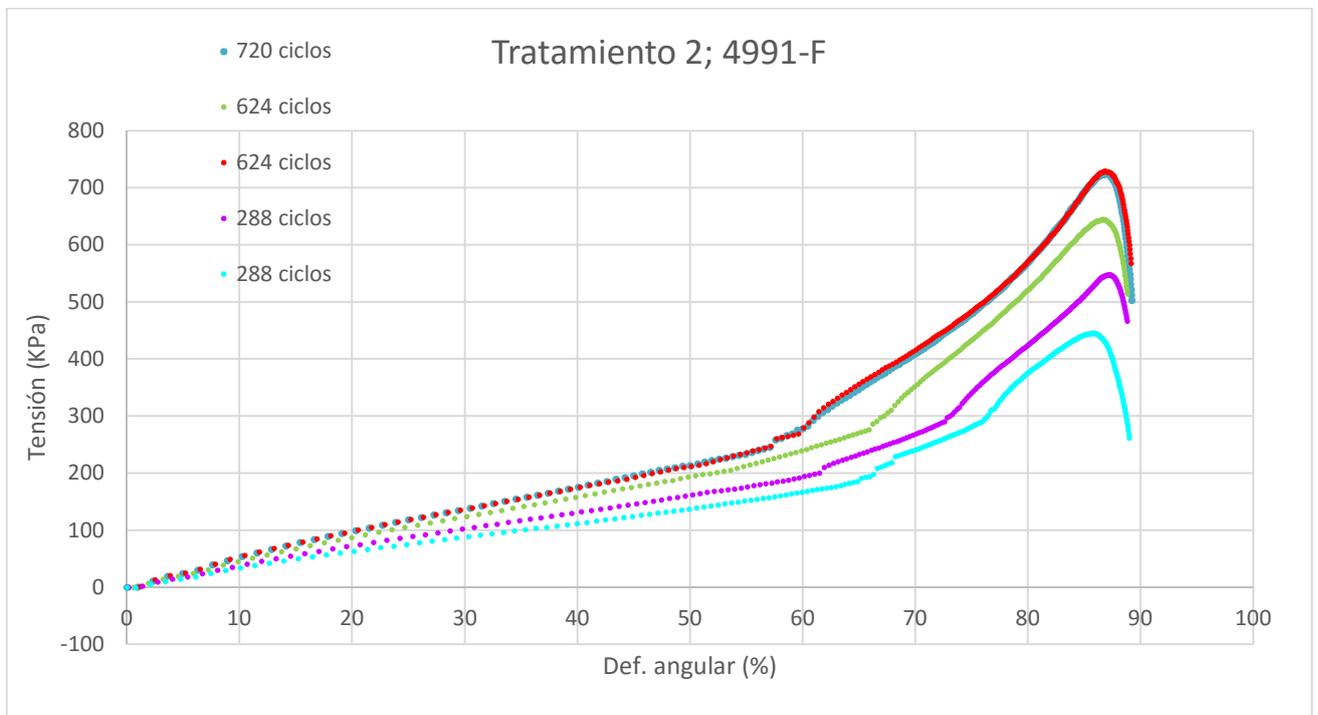


Figura 28: Gráfica tensión-deformación angular para probetas con tratamiento superficial 2 y cinta VHB 4991 F

Anexo II.-Fotografías

Uniones adhesivas con cinta VHB 4912 F:

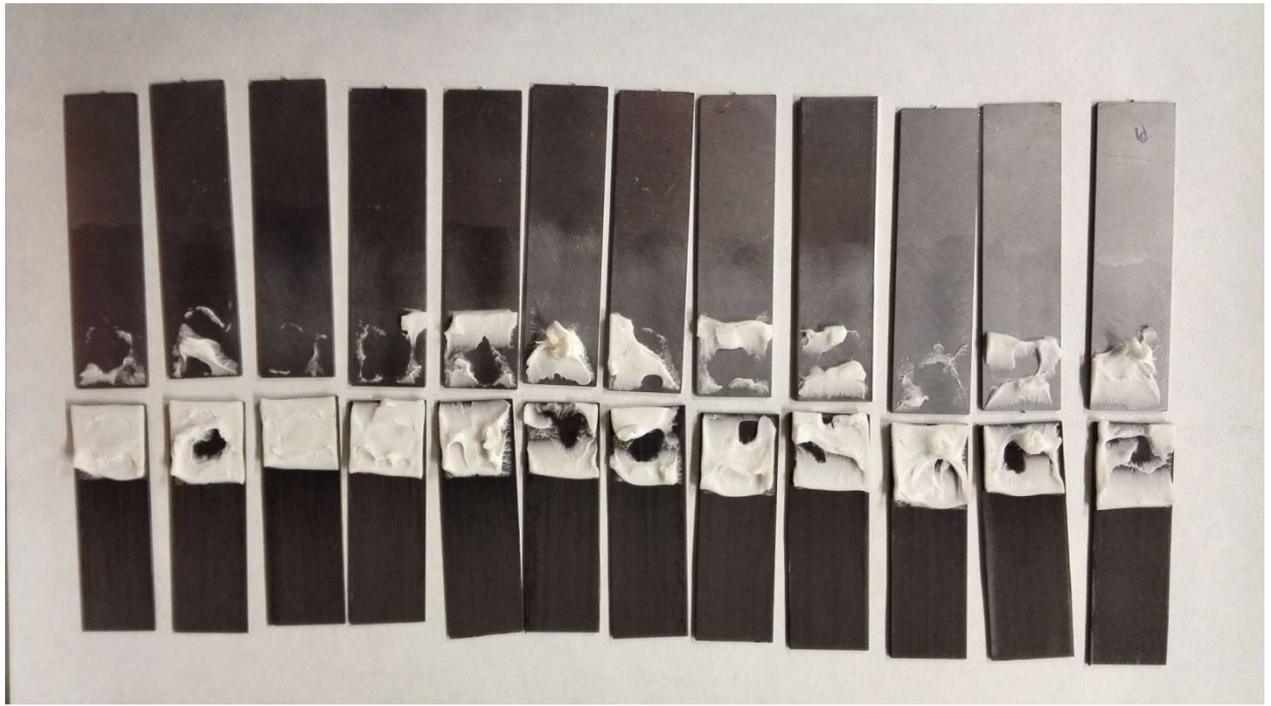


Figura 29: Probetas unidas con cinta VHB 4912 F tras ser ensayadas a cizalla

Uniones adhesivas con cinta VHB 4991 F:

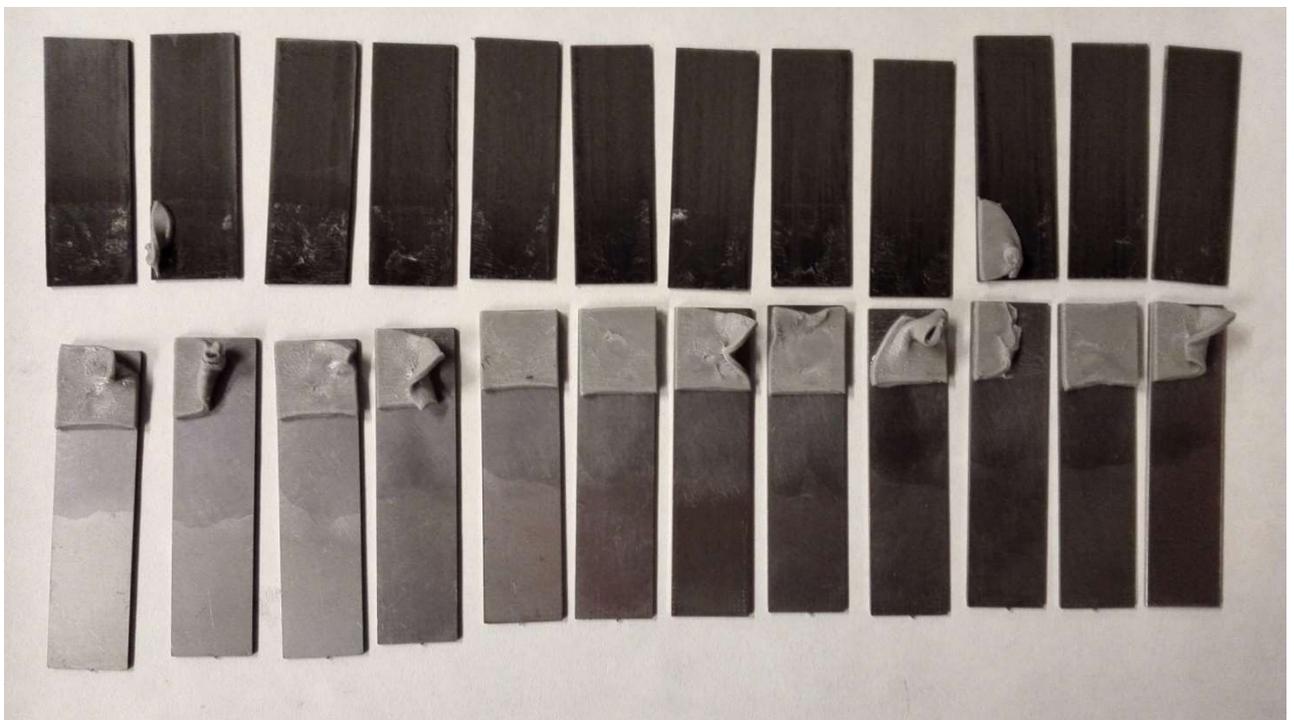


Figura 30: Probetas unidas con cinta VHB 4991 F tras ser ensayadas a cizalla

Anexo III.-Fichas técnicas Cintas VHB



Cinta Adhesiva de Espuma Acrílica 4912 F

Hoja de Datos Técnicos

Edición: Ene02
Anula: Todas las anteriores

Descripción del Producto

Los Sistemas de Unión VHB utilizan adhesivos acrílicos que muestran excelente fuerza de unión a largo plazo. La adhesión a pelado y resistencia a la tracción de los productos de la familia VHB son claramente superiores a las de los productos sensibles a la presión típicos. Su resistencia a los disolventes, a las temperaturas extremas y a los rayos U.V. los hacen indicados para numerosas aplicaciones de interior y exterior

Características Físicas (no válidas como especificación)

Tipo de adhesivo	A-30	Ref 3M:
Espesor (ASTM D-3652) Cinta Protector Total	2,00 mm 0,08 mm 2,08 mm	
Densidad de la espuma	730 kg/m ³	
Soporte	Espuma acrílica (célula cerrada)	
Protector	Película de polietileno de color rojo	
Color de la cinta	Blanco	
Vida en almacén	24 meses desde la fecha de despacho por parte de 3M si se conserva en el envase original a 21°C y un 50% de humedad relativa.	

Características Técnicas

(no válidas como especificación)

Adhesión a pelaje sobre acero inoxidable (ángulo de 90°, tª ambiente, a las 72 horas, velocidad de ensayo de 300 mm/min).	30N/cm
Resistencia a cizalladura estática Peso sostenido durante 10.000 horas a acero inoxidable con 3,23 cm ² de solapamiento	1500g @ 20°C 1000g @
Tracción normal (bloque en T) A aluminio, temperatura ambiente, 6,45 cm ² , velocidad de mordaza, 50 mm/mín.	65,5 N/cm ²
Resistencia a disolventes	Sin degradación aparente cuando se expone a la prueba de salpicadura con la mayoría de los disolventes, incluidos gasolina, combustible JP-4, alcoholes minerales, aceite de motor, limpiador de amoníaco, acetona, metiletilcetona. 20 segundos de secado al aire.
Resistencia a U.V.	Excelente

- Instrucciones de Uso**
1. La fuerza de unión depende del contacto existente entre el adhesivo y la superficie. La aplicación de presión sobre las piezas a unir facilita este contacto y aumenta la fuerza de unión.
 2. Para obtener la máxima adhesión, las superficies a unir deben estar limpias, secas y uniformes. Los disolventes típicamente usados para limpiar son una mezcla de alcohol isopropílico y agua (o heptano). Cumpla todas las instrucciones de seguridad cuando manipule disolventes.
 3. Tal vez sea necesario sellar o imprimir algunos sustratos antes de realizar la unión.
 - a. Los materiales más porosos o fibrosos (por ejemplo, madera) requerirán sellado para obtener una superficie uniforme.
 - b. Algunos materiales (como cobre, latón, vinilo plastificado) exigirán la aplicación de imprimación o de un revestimiento para evitar la interacción entre el adhesivo y sustratos.

La gama de temperaturas ideal para la aplicación de la cinta es de 20°C a 38°C. No se recomiendan aplicaciones sobre superficies cuando las temperaturas son inferiores a 10°C, ya que el adhesivo está demasiado duro para fluir y lograr el contacto. Sin embargo, una vez aplicado correctamente, la fuerza de la unión no se altera a bajas temperaturas.

En algunos casos, se puede mejorar la fuerza de unión y alcanzar más rápidamente la fuerza de unión final aplicando temperaturas elevadas (por ejemplo, 65°C) durante 1 hora. De esta forma el adhesivo humecta mejor los sustratos.

Precaución: las situaciones siguientes se deben evaluar minuciosamente para determinar si los productos VHB son adecuados para el uso previsto.

1. Se evaluarán las aplicaciones con la cinta 4912 que hayan de soportar temperaturas extremadamente frías o si se prevé que el Sistema de Unión VHB se someterá a esfuerzos de gran impacto. Para aplicaciones a temperaturas que oscilen entre 0 y 10°C, utilice la cinta 4951 (véase hoja de datos del producto, “Características Especiales del Sistema VHB”).

Aplicaciones

Los Sistemas de Unión VHB están concebidos para utilización en numerosas aplicaciones industriales de interior y exterior. En muchos casos, pueden sustituir remaches, soldaduras por puntos, adhesivos líquidos y otros mecanismos de sujeción permanente. Cada producto de la familia VHB ofrece ventajas específicas. Estas pueden incluir una elevada resistencia a la tracción, a cizalladura, a pelado, a la humedad, a los disolventes o a la migración de plastificantes. Las cintas VHB han de evaluarse minuciosamente en condiciones de uso reales con los sustratos previstos, especialmente si se someten a condiciones medioambientales extremas.

Los Sistemas VHB son adecuados para la unión de numerosos sustratos, incluidas maderas selladas, plásticos, composites y metales. El polietileno, polipropileno, teflón, siliconas y otros materiales de baja energía superficial pueden ocasionar problemas.

El comportamiento del producto con vinilos plastificados depende de los tipos y concentraciones de plastificantes que pueden migrar al adhesivo provocando una reducción de la fuerza de unión; la cinta 4945 es más resistente a la migración de los plastificantes. (Véase Hoja de Datos del Producto, “Características Especiales de los Sistemas VHB”).

Las superficies galvanizadas pueden ocasionar problemas y su comportamiento debe evaluarse cuidadosamente.

Para evitar la corrosión de cobres y latones, sólo se emplearán con los Sistemas de Unión VHB materiales protegidos con barniz. Se recomienda realizar un ensayo antes de efectuar una unión con una superficie problemática.

Instrucciones de Consúltese la Ficha de Datos de Seguridad del Producto.
Seguridad e
Higiene

Los datos técnicos y, en general, la información aquí contenida están basados en ensayos considerados fiables, si bien no se garantiza su exactitud o alcance en cualquier situación práctica. Antes de utilizar el producto, el usuario debe determinar si éste es o no adecuado para el uso al que se le destina, asumiendo todo el riesgo y la responsabilidad que puedan derivarse de su empleo. La única obligación del vendedor consiste en reponer al comprador la cantidad de producto que se demuestre defectuosa.



División de Cintas y Adhesivos

3M España, S.A.
Juan Ignacio Luca de Tena, 19-25
28027 Madrid

Minnesota (3M) de Portugal, Lda.
Rua Conde de Redondo, 98
1199 Lisboa Codex



VHB™

Cinta de Espuma Acrílica 4991

Hoja de Datos Técnicos

Actualizada: Junio, 2001

Anula: -----

Descripción del producto La VHB 4991 es una cinta de doble cara de espuma acrílica con un espesor de 2.3 mm, que sirve para unir metales pintados y no pintados, y plásticos de alta energía superficial. La VHB 4991 es adecuada para aplicaciones que requieran productos de alto espesor y conformables.

Propiedades Físicas
(No válidas a efectos de especificación)

Tipo de adhesivo	Acrílico Resistente a plastificantes	
Densidad de la espuma	720 kg/m ³	
Espesor (ASTM D-3652)	2.3 mm	
Soporte	Espuma acrílica (célula cerrada)	
Protector	Polietileno rojo	
Color	Gris oscuro	
Vida límite	24 meses desde la fecha de fabricación. Almacenar en las cajas originales a 21°C y 50% de humedad relativa.	

Características Técnicas

(No válidas a efectos de especificación)

Adhesión a pelaje sobre acero inoxidable (ángulo de 90°, tª ambiente, a las 72 horas, velocidad el ensayo de 300 mm/min)	35 N/cm
Resistencia a tracción (probetas en forma T de aluminio, tª ambiente, área de 6.45 cm ² y velocidad del ensayo de 50 mm/min)	415 kPa (4.2 kg/cm ²)
Resistencia a cizalladura dinámica sobre acero inoxidable	450 kPa (4.5 kg/cm ²)
Resistencia a cizalladura estática (pesos soportados durante 10000 minutos sobre acero inoxidable y por un área de 3.23 cm ²)	a 22°C 1000 g a 66°C 500 g a 93°C 500 g
Resistencia a disolventes	Alta
Resistencia a temperatura Periodos cortos (min, h) Periodos largos (días, semanas)	120°C 93°C

Cinta Adhesiva VHB 4991
Página 2

Tamaños disponibles

Longitudes estándar:	32,9 m
Ancho mínimo:	12,7 mm
Tolerancia de corte:	± 0,8 mm
Tamaño del núcleo:	76,2 mm

Técnicas de aplicación:**de**

1. La fuerza de la unión depende en gran medida del área de contacto alcanzada entre adhesivo y superficie. Una firme aplicación de presión aumenta el área de contacto y mejora la adhesión.

2. Para obtener óptimos resultados, las superficies a unir han de estar limpias, secas y unificadas. Una mezcla de alcohol isopropílico y agua suele ser un agente eficaz de limpieza (se han de seguir siempre las recomendaciones de seguridad de los fabricantes en el manejo de disolventes)

3. El rango ideal de temperatura de aplicación es de 21 a 38°C. La aplicación a temperaturas inferiores a 10°C no es recomendable pues los adhesivos están demasiado duros para fluir adecuadamente. Sin embargo, una vez aplicados, el comportamiento a bajas temperaturas es, en general, satisfactorio.

NOTA: Algunos plásticos y pinturas contienen aditivos que pueden afectar al nivel de adhesión. Las aplicaciones sobre estas superficies deben ser evaluadas

cuidadosamente; el efectos de estos aditivos pueden solventarse con una limpieza y una preparación superficial adecuadas. Condiciones de alta humedad y alta temperatura pueden afectar al nivel de adhesión sobre cristal debido a la hidrofilia del cristal. Bajo estas condiciones, las imprimaciones en base a silanos han probado ser muy efectivas para mejorar la durabilidad y resistencia de las uniones.

**VHB es una marca registrada de 3M
4991**

Los datos técnicos y, en general, la información aquí contenida están basados en ensayos considerados fiables, si bien no se garantiza su exactitud o alcance en cualquier situación práctica. Antes de utilizar el producto, el usuario debe determinar si éste es o no adecuado para el uso al que se le destina, asumiendo todo el riesgo y la responsabilidad que puedan derivarse de su empleo. La única obligación del vendedor consiste en reponer al comprador la cantidad de producto que se demuestre defectuosa.

3M

División de Cintas y Adhesivos
3M España, S.A.
Juan Ignacio Luca de Tena, 19-25

28027 Madrid