

Resultados y discusión

En esta discusión se expondrán y discutirán todos aquellos resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de uniones adhesivas que se han realizado en el presente trabajo. Se dividirá en tres apartados, correspondiéndose con los ensayos de cizalladura por tracción, ensayos de tracción de uniones a tope y ensayos de pelado.

Se realizaron los ensayos para los cinco adhesivos objeto del estudio, los cuales están detallados en el apartado 1.3, del capítulo de Procedimiento Experimental. El proceso de fabricación de los sustratos de las probetas de ensayo, así como los materiales, son descritos en el apartado 2, del capítulo Procedimiento Experimental, del presente trabajo.

1.1 Ensayos de cizalladura.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

Estos ensayos se realizaron siguiendo el método especificado en la Norma Europea *UNE-EN 1465:1994. Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos*.

Esta norma especifica un método para determinar la resistencia a la cizalladura por tracción en juntas pegadas, resultantes del solapamiento de sustratos rígido-rígido, cuando se ensayan probetas normalizadas y bajo condiciones específicas de preparación y ensayo.

Se realizaron ensayos con cinco adhesivos, siendo tres de ellos, adhesivos de epoxi y dos, adhesivos de metacrilato. Los sustratos de material compuesto de fibra de vidrio y resina de epoxi, fueron los mismos para todos los adhesivos, y las probetas fueron pegadas, cortadas y curadas en condiciones similares.

Los datos más relevantes de estos ensayos, son la obtención de la fuerza de rotura en newtons, a partir de la cual y de la sección del área pegada, se obtuvo la tensión de rotura en megapascales, para las probetas válidas. Y por otra parte, se obtuvo para cada ensayo, la deformación nominal en tracción del adhesivo de unión, hasta el punto de rotura, para cada probeta ensayada.

Procedimiento de ensayo.

La norma bajo la que se realizan los ensayos, especifica que la fuerza aplicada sobre la junta de ensayo, ha de aumentar a una velocidad constante, es decir, uniforme. Esta velocidad será tal que la media de las juntas rompan en un periodo de 65 ± 20 segundos. Para conseguir asegurar que las probetas rompen en este periodo de tiempo, se realizan varios ensayos previos hasta conseguir la velocidad, que aseguren la rotura en este periodo de tiempo. Finalmente la velocidad estimada para los ensayos de cizalladura, fue de 5 mm / min.

Hay que tener precaución de alinear las probetas, de tal forma que estén lo más alineadas posibles, para evitar la desalineación de la aplicación de la carga, lo que da lugar a la aparición de momentos flectores en la unión. La distancia inicial entre las mordazas de ensayo se mide, para así poder calcular posteriormente, la deformación nominal en tracción (ϵ).

De todos los ensayos realizados, se descartan inicialmente, los ensayos de mayor y menor valor de fuerza de rotura, así como todos los que no rompen dentro del periodo de tiempo establecido por la norma seguida para el procedimiento de ensayo. De los restantes ensayos, se realizó la desviación estándar (valor estadístico), y el criterio de repetitibilidad, es decir, la diferencia entre dos fuerzas de rotura cualesquiera, para aceptar como válido el resultado del ensayo, ha de ser menor que 2,5 la desviación estándar.

Antes de estudiar los valores reflejados en los ensayos, definiremos los términos que vamos a utilizar:

1-Esfuerzo de tracción (σ).

$$\sigma = F / A$$

σ , es el esfuerzo de tracción, expresado en megapascuales (MPa) o en (N / mm^2).

F, es la fuerza medida en newtons (N).

A, es el área de la sección transversal de la zona de solape, en milímetros cuadrados (mm^2).

2-Deformación (ϵ).

$$\epsilon (\%) = 100 * \Delta L / L_0$$

$$\Delta L = L_f - L_0$$

ϵ , es el incremento de longitud por unidad de longitud inicial, de la longitud de referencia, expresada como una relación sin dimensiones o en porcentaje.

ΔL , es el incremento de longitud, en mm.

L_0 , es la distancia inicial de la probeta entre las mordazas, en mm.

L_f , es el desplazamiento de las mordazas durante el ensayo.

Veamos una curva típica de los ensayos de cizalladura de uniones adhesivas:

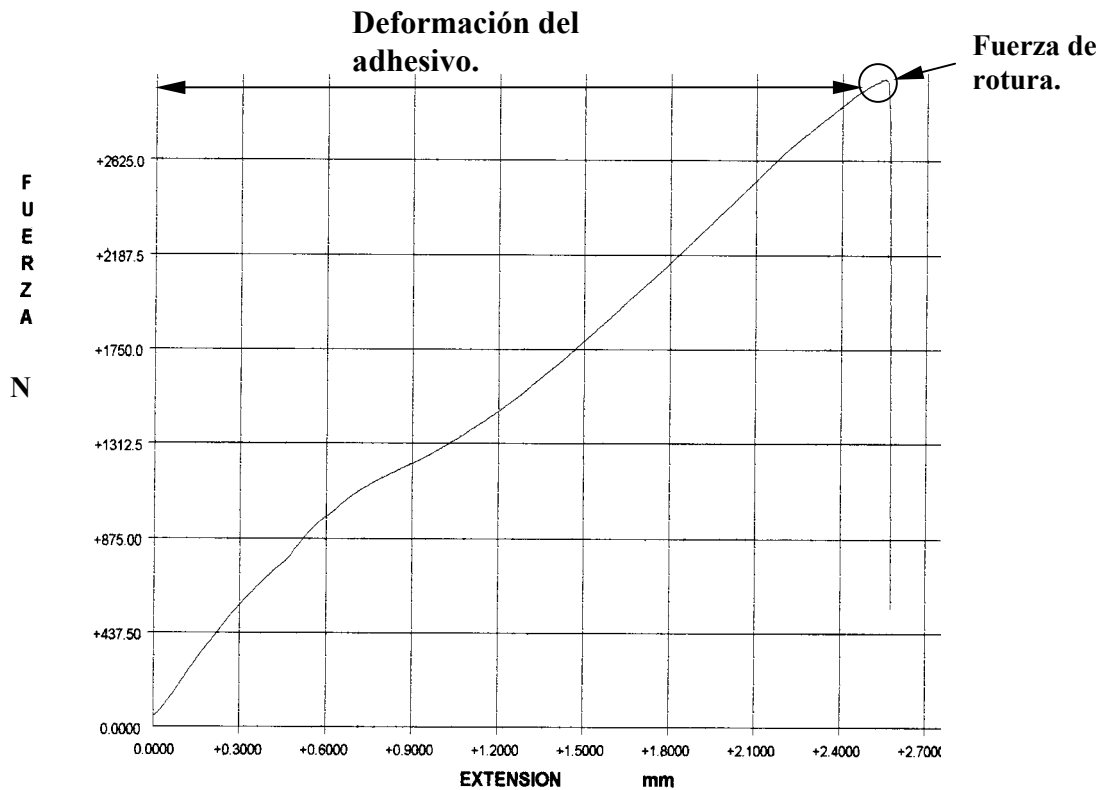


Figura 1: Curva característica de un ensayo de cizalladura.

Expresión de resultados.

Se expresan los resultados de los ensayos como la media aritmética y el coeficiente de variación de la fuerza de rotura en newtons (fuerza a la que rompe la probeta), y la tensión de rotura en megapascales, para las probetas válidas. El número de ensayos válidos no debe de ser menor de seis.

A continuación se muestra una tabla con las medias aritméticas de los resultados obtenidos (tabla 1), y en el Anexo I, adjunto al final del presente trabajo, se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos individuales.

Los datos que se detallan en la tabla siguiente, son:

- Valor de la fuerza de rotura media para cada adhesivo en newtons (F_{media}).
- y la desviación estándar (s), de las fuerzas de rotura, de las muestras estudiadas.
- Criterio de repetitibilidad ($2,5*s$).
- Valor medio de la tensión de rotura en megapascales (σ_{media}).

-Incremento de longitud medio, (ΔL_{medio}) en mm.

-Deformación nominal en tracción media (ϵ_{media}) en %, y la desviación estandar (s), de la deformación nominal.

	AV4076/HV5 309 VANTICO Epoxi-1	Sp345 Epoxi-2	Resterpox ADH11 Epoxi-3	XD 4662A/B VANTICO Metacrilato1	XD 4665A/B VANTICO Metacrilato2
F_{media} [N] ($\pm s$)	3078,8 ($\pm 72,4$)	3249,4 ($\pm 84,5$)	2164,3 ($\pm 152,0$)	3038 ($\pm 55,3$)	2759,5 ($\pm 54,5$)
2,5 * (s)	181,1	211,1	380,0	138,2	136,1
σ [MPa]	205,3	236,3	151,9	199,2	169,8
ΔL [mm]	2,9	3,3	2,0	2,5	4,5
ϵ_{media} [%]	2,0(± 0.283)	2,4(± 0.272)	1,5(± 0.246)	1,8(± 0.061)	3,6(± 1.446)

Tabla 1: Resultados del ensayo de cizalladura.

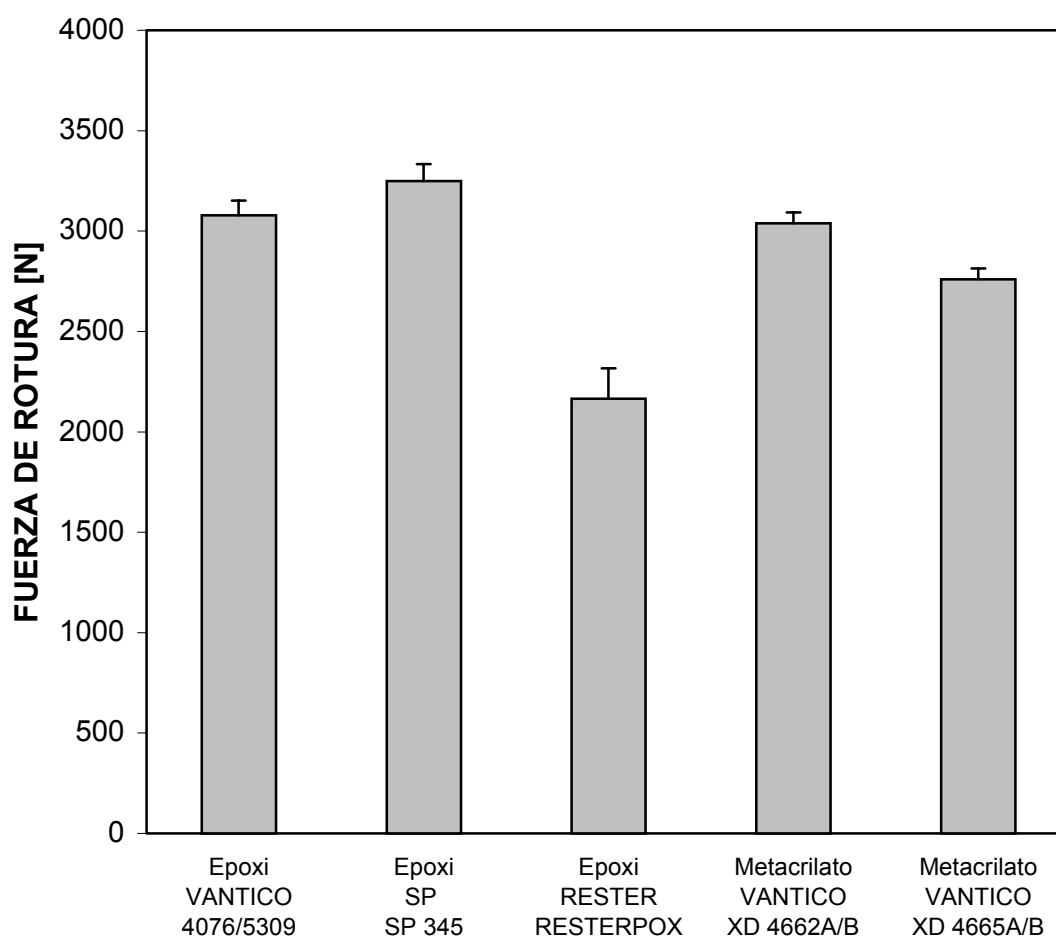


Gráfico 1: Fuerzas de rotura medias. Ensayo de cizalladura.

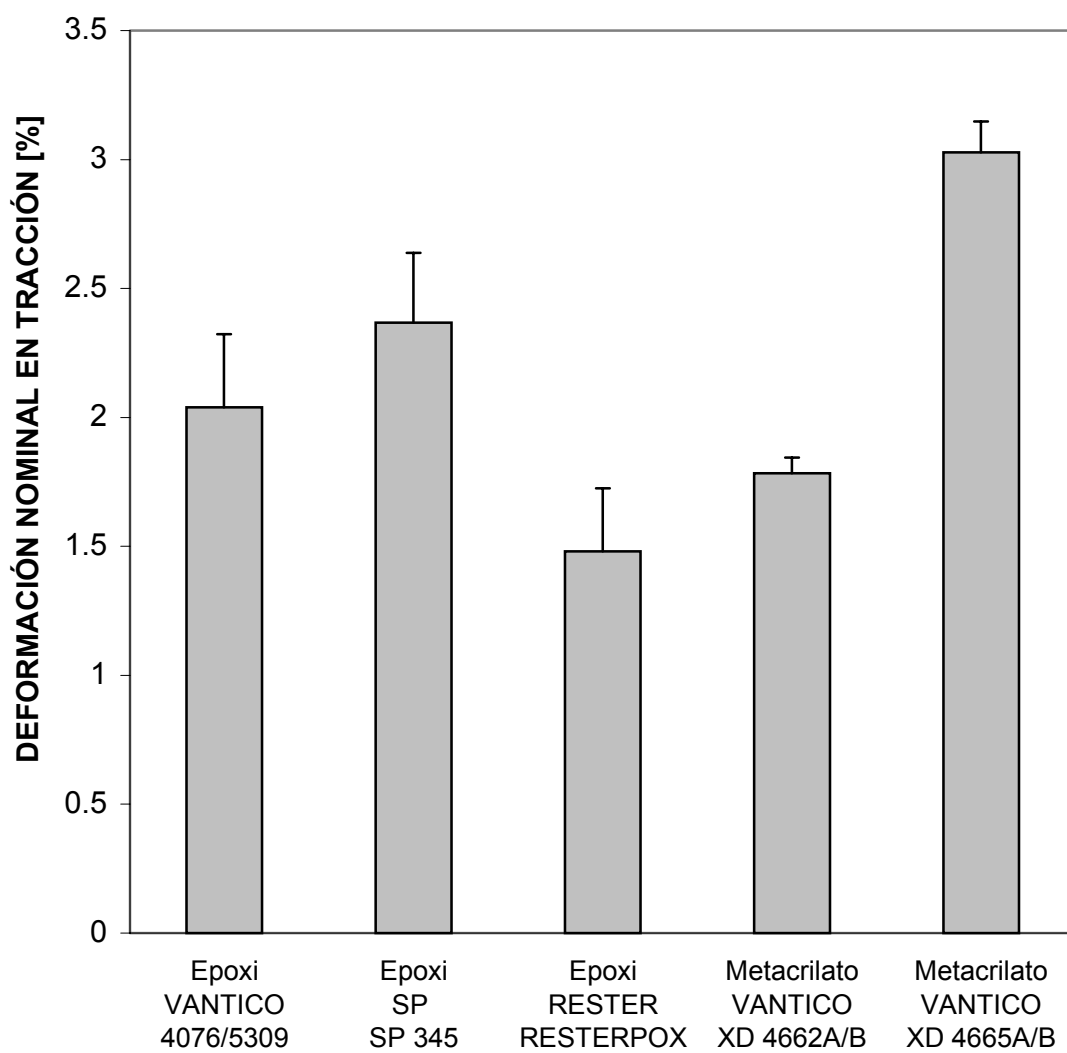


Gráfico 2: Deformación nominal en tracción. Ensayo de cizalladura.

1.2 Ensayos de tracción de uniones a tope.⁽¹²⁾

Estos ensayos fueron realizados siguiendo las directrices básicas, especificadas en la Norma Europea *UNE-EN 26922: 1993. Adhesivos. Determinación de la resistencia a la tracción de uniones a tope.*

Esta norma especifica un método de determinación de la resistencia a la rotura de una unión a tope con adhesivos, cuando está sometida a un esfuerzo de tracción. El método puede ser aplicado a todo tipo de adhesivos. Aunque en principio está determinado para ser aplicado bajo condiciones ambientales normales. El método requiere adherentes rígidos que puedan ser mecanizados a las tolerancias dimensionales requeridas y así mismo, soportar los esfuerzos aplicados sobre ellos durante toda la duración del ensayo.

Una unión formada por dos adherentes (substratos), en forma de barras o varillas encoladas por sus caras normales a su longitud, está sometida a tensión hasta la rotura de la probeta, por una fuerza de tracción aplicada según el eje más largo de la probeta de ensayo. El resultado obtenido es la fuerza de rotura observada.

Se realizaron ensayos con cinco adhesivos, siendo tres de ellos, adhesivos de epoxi y dos adhesivos de metacrilato. Los substratos de material compuesto de fibra de vidrio y resina de epoxi, fueron los mismos para todos los adhesivos, y las probetas fueron pegadas, cortadas y curadas en condiciones similares. El proceso de fabricación de los substratos de las probetas, así como los materiales, son descritos en la sección llamada Procedimiento Experimental, del presente trabajo.

Se registró el mayor valor obtenido durante el ensayo de rotura como la fuerza de rotura de la probeta en newtons.

Procedimiento de ensayo.

Se coloca la probeta simétricamente en las mordazas de la máquina de ensayo. La norma bajo la que se realizan los ensayos, especifica que la fuerza aplicada sobre la junta de ensayo, ha de aumentar a una velocidad constante, es decir, uniforme. Esta velocidad será tal que la unión rompa en un periodo de 60 ± 20 segundos. Para conseguir asegurar que las probetas rompen en este periodo de tiempo, se realizan varios ensayos previos hasta conseguir la velocidad, que aseguren la rotura en este periodo de tiempo. Finalmente la velocidad estimada para los ensayos de tracción de uniones a tope, fue de 2 mm / min.

De todos los ensayos realizados, se descartan inicialmente, los ensayos de menor y mayor valor de fuerza de rotura, todos los que no rompen dentro del periodo de tiempo establecido por la norma seguida para el procedimiento de ensayo. De los restantes ensayos, se realiza la desviación estándar (valor estadístico), y el criterio de repetitibilidad, es decir, el valor entre dos fuerzas de rotura, obtenidos con una muestra de adhesivo en el mismo sistema de adherentes, debe ser inferior a 2,5 veces la desviación estándar para cinco ensayos.

A continuación se muestra un gráfico tipo del ensayo de tracción de uniones adhesivas a tope, de los que se obtuvieron:

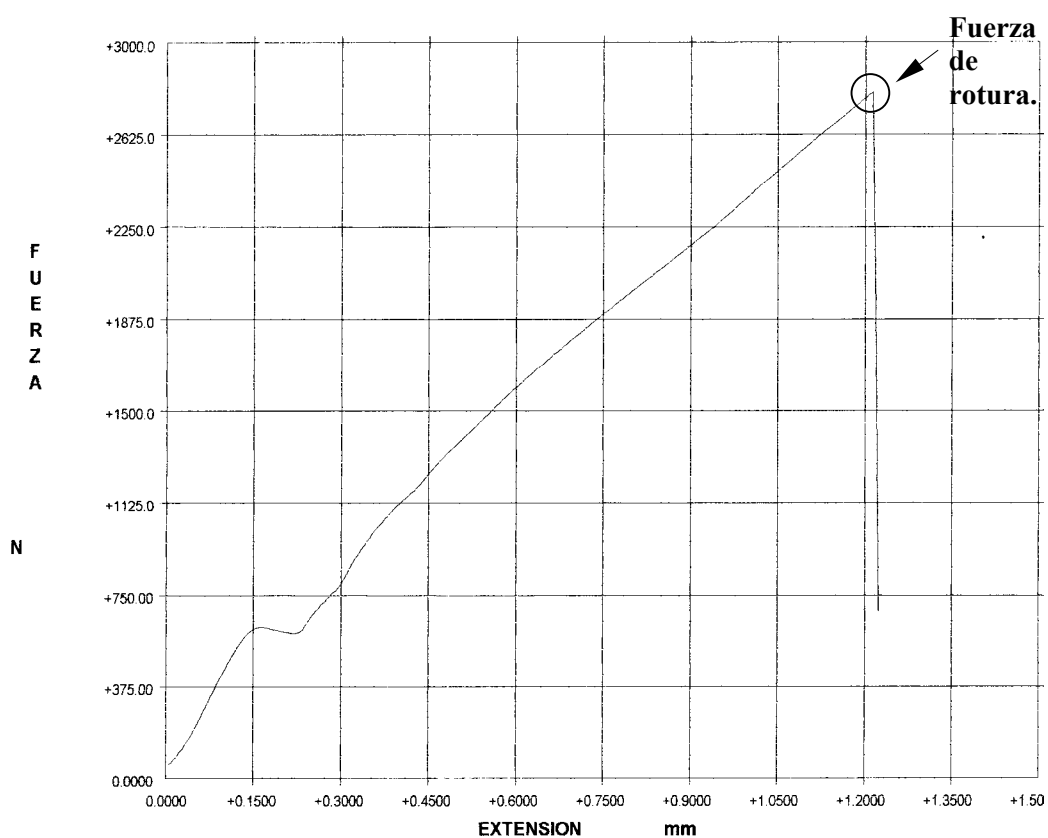


Figura 2 Ensayo de tracción de una unión adhesiva a tope.

Expresión de resultados.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos, como la media aritmética de la fuerza de rotura (F_{media}), de cinco ensayos válidos, así como la desviación estándar (s) y el criterio de repetitibilidad que corresponde a 2,5 veces el valor de la desviación estándar (s).

Se muestra una tabla, con las medias aritméticas de los resultados obtenidos (tabla 2), y en el Anexo I, adjunto al final del presente trabajo, se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos individuales.

Los datos que se detallan en la tabla siguiente, son:

-Valor de la fuerza de rotura media para cada adhesivo en newtons (F_{media}), desviación estándar (s), de cada una de las muestras estudiadas.

-Criterio de repetitibilidad ($2,5*s$).

	AV4076/HV5309 VANTICO Epoxi-1	Sp345 SP Epoxi-2	Resterpox ADH11 Epoxi-3	XD 4662A/B VANTICO Metacrilato1	XD 4665 A/B VANTICO Metacrilato2
Fmedia [N]	1461,5 (± 31,1)	2790,3(± 28,8)	2174,8(± 38,9)	1764(± 21,7)	2307,6(± 37,2)
2,5 *(s)	77,9	72,0	97,2	54,3	93,0

Tabla 2: Resultados de ensayos de tracción.

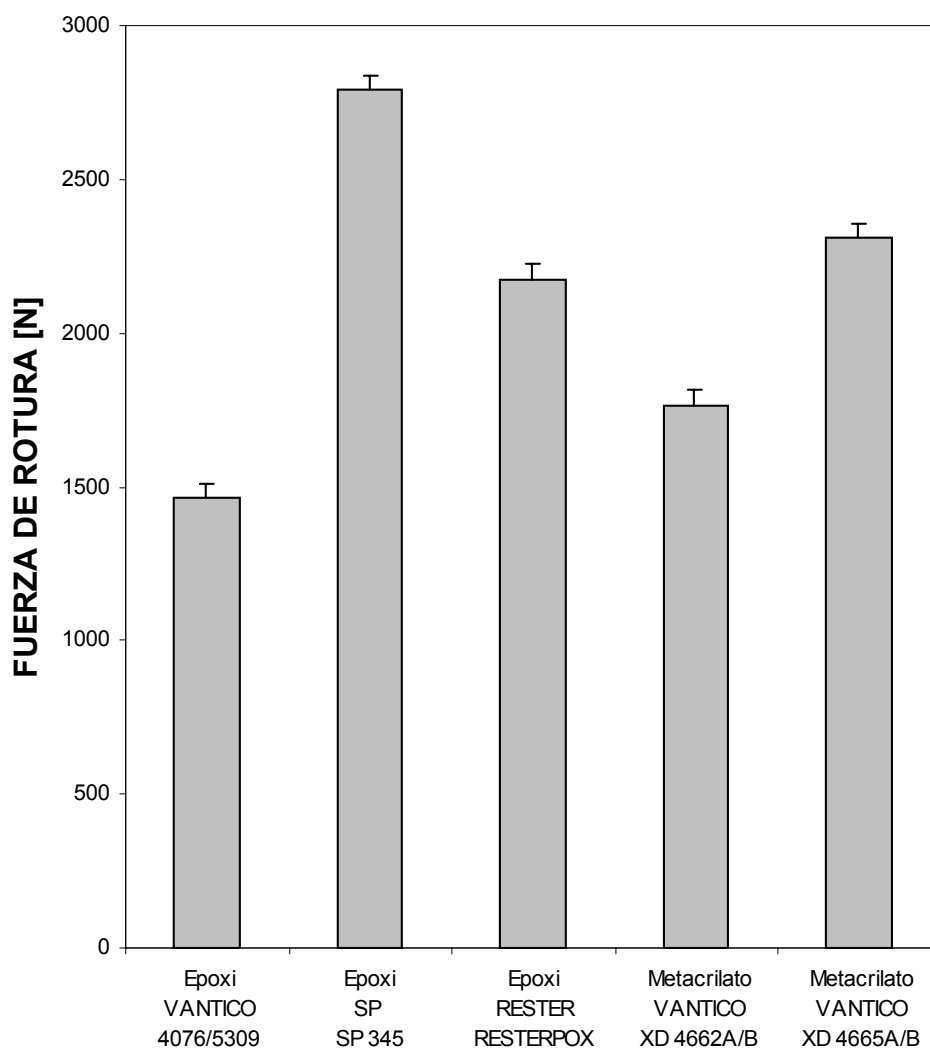


Gráfico 3: Fuerzas de rotura medias. Ensayo tracción.

1.3 Ensayos de pelado. ⁽¹³⁾

Al igual que los ensayos descritos anteriormente, el ensayo de pelado se realizó siguiendo las directrices básicas de la Norma Europea *UNE-EN 1464: 1994. Adhesivos. Determinación de la resistencia al pelado en juntas pegadas de alta resistencia. Método del rodillo móvil.*

Esta norma especifica un método de rodillo móvil para la determinación de la resistencia al pelado de juntas pegadas de alta resistencia, entre un substrato rígido y otro flexible. La utilización de este sistema (de un rodillo móvil), produce datos numéricos más constantes que otros métodos de pelado, como el método de pelado en T u otros.

La máquina de ensayos no dispone de este dispositivo de rodillo móvil, por lo que se fabricó según especifica la norma mencionada, usando las dimensiones y materiales que se especifican en la misma. El dispositivo fue fabricado en el taller de Ingeniería de Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena, bajo la dirección de D.José Garrido Garrido.

Se realizaron los ensayos para los cinco adhesivos que son objeto de estudio, siendo tres de ellos adhesivos de epoxi y dos adhesivos de metacrilato.

Los substratos utilizados en las uniones adhesivas fueron fabricados de materiales compuestos; el substrato rígido de fibra de carbono y resina de epoxi, y el flexible de fibra de vidrio y resina de epoxi. Todas las probetas fueron pegadas, curadas y cortadas en condiciones similares, dicho proceso esta detallado en el Anexo I.

Los principales objetivos de este ensayo consisten en el cálculo de:

- Fuerza al pelado promedio o Resistencia al pelado: La fuerza media por unidad de anchura de la probeta, medida a lo largo de la línea de encolado, necesaria para separar progresivamente los dos miembros de una probeta bajo condiciones de ensayo especificadas.

Durante el ensayo de pelado, se realiza un registro gráfico de la fuerza en función del desplazamiento de la mordaza, fuerza en función de la longitud pelada, en una longitud de al menos 115 mm, no considerando los 25 mm iniciales de pelado.

-Fuerza máxima: Fuerza necesaria para iniciar el despegue de la unión.

-Fuerza mínima: Fuerza o carga de rotura final de la unión.

A continuación se muestra un gráfico característico, de los ensayos de pelado realizados:

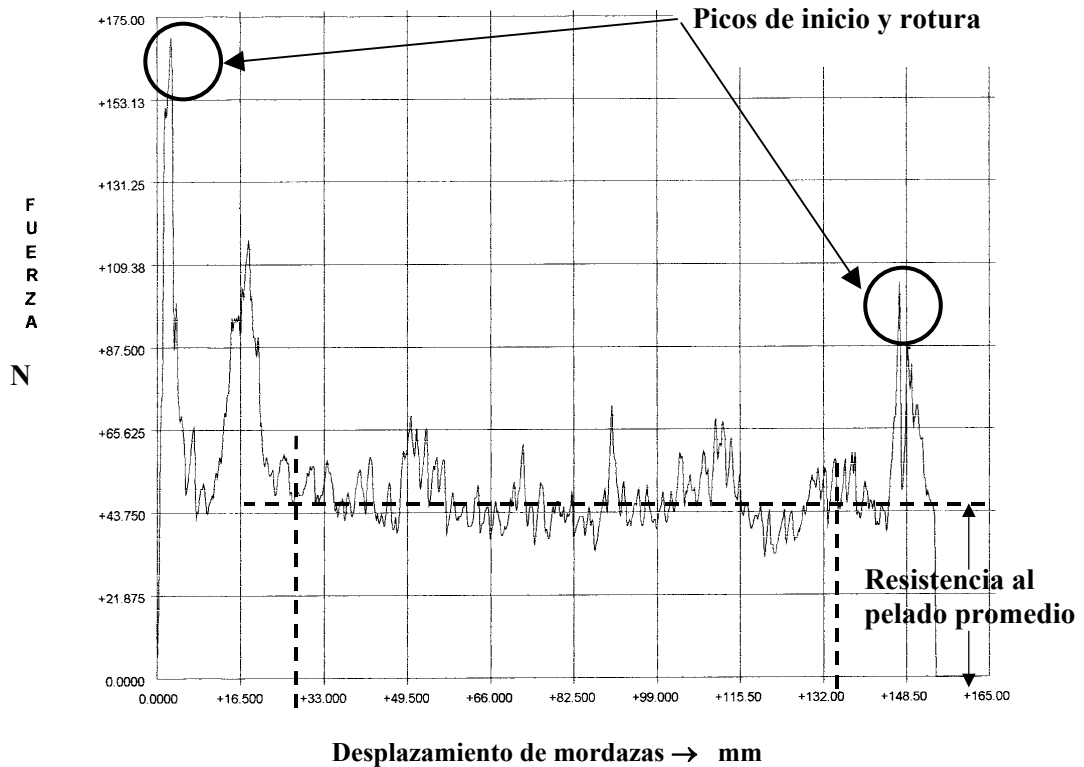


Figura 3: Registro de un ensayo de pelado.

Procedimiento de ensayo.

Se coloca la probeta en el dispositivo, como se indica en la figura 4, con el extremo del sustrato flexible sujeto a la mordaza de la máquina de ensayo. La norma recomienda pelar la probeta a una velocidad constante de 100 ± 5 mm/min, de separación de la mordaza.

Si el sustrato se curva o se deforma durante el ensayo, se recomienda preparar una nueva probeta, con un sustrato suficientemente rígido para asegurar un pelado correcto. Se deben desestimar los resultados si la rotura ocurre fuera de la zona de pelado, esta zona de pelado se muestra en la figura siguiente:

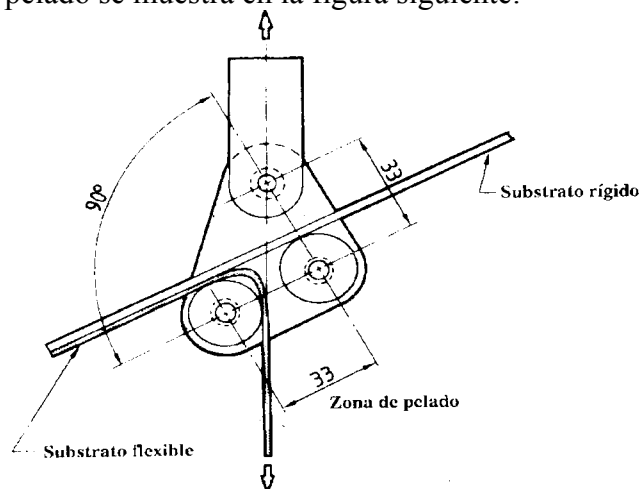


Figura 4: Dispositivo para ensayo de pelado sujetando la probeta.

Expresión de los resultados.

A continuación se expresan los resultados hallados para cada adhesivo de ensayo, se muestra una tabla con las medias aritméticas de los resultados obtenidos (tabla 3), y en el Anexo I, adjunto al final del presente trabajo, se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos individuales.

Los datos que se detallan en la tabla siguiente, son:

-Valor de la fuerza media, fuerza máxima y fuerza de rotura, para cada adhesivo en newtons, la desviación estándar (s), de cada una de las muestras estudiadas.

	AV4076/HV5309 VANTICO Epoxi-1	Sp345 SP Epoxi-2	Resterpox ADH11 Epoxi-3	XD 4662A/B VANTICO Metacrilato-1	XD 4665 A/B VANTICO Metacrilato-2
Fmedia [N]	69.1(±26.7)	71.9(±24)	65.2(±23.9)	60.1(±28.5)	43.1(±17.1)
Fmáxima [N]	258.4(±63.4)	209.7(±36.4)	215.3(±37)	272.5(±86.4)	181.4(±58.3)
Frotura [N]	103.8(±37.3)	93(±9.6)	93.4(±21.8)	272.5(±18.5)	81.8(±22.7)

Tabla 3: Resultados del ensayo de pelado.

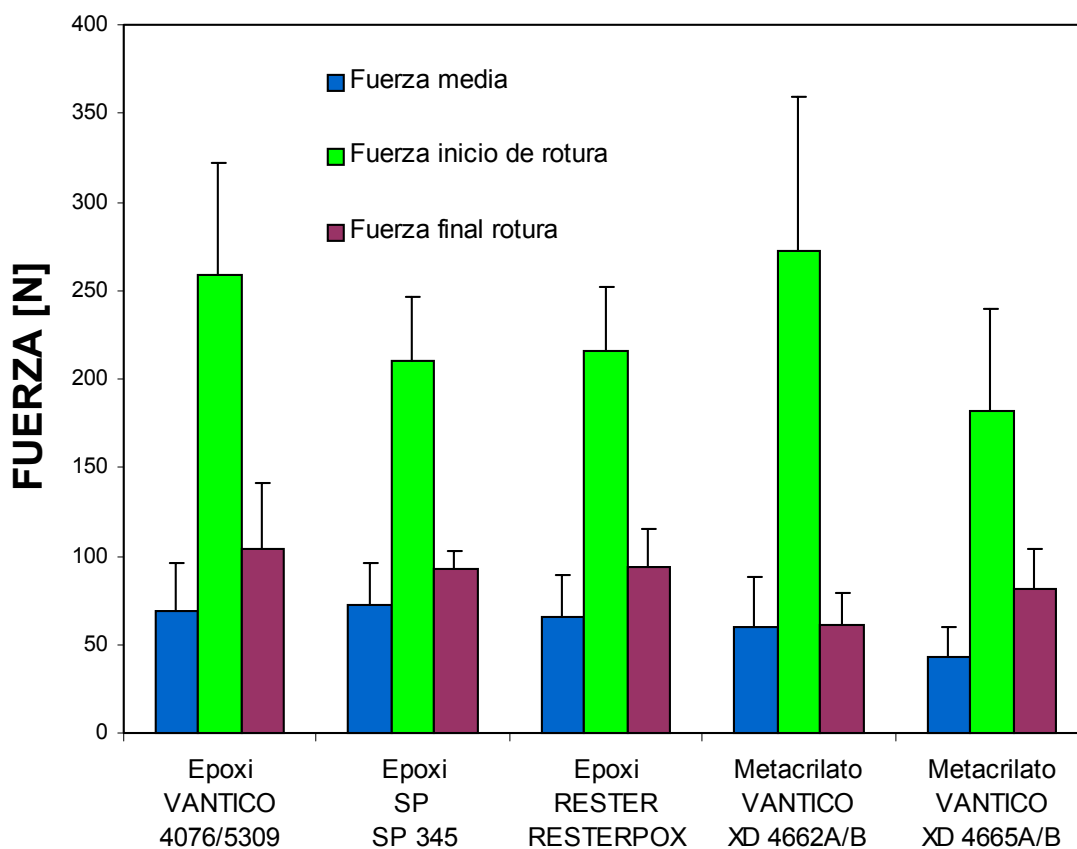


Gráfico 4: Ensayo de pelado.

1.4 Discusión de resultados.

Una vez presentados los resultados de los ensayos mecánicos realizados, pasaremos a discutir los datos obtenidos de los mismos. Dicha discusión engloba todos los ensayos mecánicos realizados, para la evaluación de las uniones.

En la realización de este trabajo se han realizado gran cantidad de ensayos, requiriendo de la preparación de un número considerable de probetas, por lo que podemos concluir que los resultados son sensibles tanto a la calidad del adhesivo, como a la preparación superficial de los adherentes o substratos.

Los resultados que se obtienen en los ensayos de cizalla presentan a los adhesivos Epoxi Vantico y SP como los más resistentes con valores por encima de 200 MPa, superiores al 35%, del adhesivo Epoxi de Rester. El adhesivo metacrilato de Vantico XD 4662 A/B es el más resistente de los ensayados. Con respecto a la aptitud de deformación, todos los adhesivos presentan una baja capacidad no superando el 4%, y el adhesivo Resterpox presenta el valor mas bajo con un 1.5%.

Con respecto a los ensayos de tracción de uniones a tope, los adhesivos Epoxi de SP y Rester rompen de forma cohesiva lo que significa que la fractura y posterior rotura se produce en el adhesivo. Por otra parte el adhesivo de Epoxi de Vantico presenta una rotura 50% cohesiva y 50% adhesiva. Esta diferencia de tipos de rotura, justifica la disminución de los valores de fuerza de rotura para el adhesivo de Epoxi de Vantico, frente a los adhesivos de Epoxi de Rester Y SP, ya que la tensión de rotura se emplea en la rotura de la unión con el substrato y en la fractura del adhesivo. Aún cuando se observan roturas similares en el ensayo de tracción de uniones a tope, para los adhesivos de Epoxi de Rester y SP los valores obtenidos de la fuerza de rotura media es mayor en un 22% para el adhesivo Epoxi de SP. Esta diferencia de fuerzas de rotura nos indica que el adhesivo de Epoxi de SP tiene mayor cohesión frente al adhesivo Epoxi de Rester, lo cual se ve justificado con el valor de fuerza de rotura observado.

En los resultados obtenidos para los adhesivos de metacrilato, los valores de fuerza de rotura en el ensayo de cizalladura no presentan diferencias elevadas, siendo esta diferencia un 10 % mayor para el adhesivo XD 4662 A/B, frente al adhesivo XD 4665 A/B. Sin embargo las diferencias observadas para los valores medios de deformación nominal en tracción, resultaron un 55% mayor para el adhesivo XD 4665 A/B. Esto significa que el adhesivo de metacrilato XD 4665 A/B tiene mayor capacidad de deformación plástica, que el adhesivo XD 4662 A/B, también de metacrilato.

Las diferencias de fuerzas de rotura medias, observadas en los ensayos de tracción de uniones a tope, para los adhesivos de metacrilato, dan resultados un 24% menores para el adhesivo XD 4662 A/B, lo que se ve justificado con el tipo de rotura, pues las roturas observadas para el adhesivo XD 4662 A/B son 50% cohesivo y 50% adhesivo, frente a la rotura del adhesivo XD 4665 A/B, que es un 100% cohesiva.

Al comparar los valores obtenidos de los ensayos de cizalladura, entre los adhesivos de Epoxi y de metacrilato, los resultados son bastante similares en cuanto a los valores de fuerza de rotura con relación a los adhesivos de Epoxi de Vantico y SP. Sin embargo, se

observan mayores valores de fuerza de rotura para los adhesivos de metacrilato, en comparación con el adhesivo de Epoxi de Rester.

Los resultados de los ensayos de pelado muestran una correspondencia con los valores obtenidos en los ensayos de cizalladura y tracción de uniones a tope, tanto para los adhesivos de Epoxi como para los de metacrilato. En estos ensayos el adhesivo XD 4662 A/B presentó los mejores valores en fuerza máxima, por contra el adhesivo XD 4665 A/B mostró los valores más bajos de todos los ensayados.

Finalmente si consideramos el coste de todos los adhesivos ensayados, el adhesivo Epoxi de Rester, es el de menor coste, hasta un 50% menos que un adhesivo similar como es SP. Podemos concluir que, aunque presente menores valores de fuerza de rotura, la reducción tan importante en el precio podría justificar su utilización.