

3. Realización de ensayos de cortadura

3.1. *El ensayo de solape simple, generalidades*

En este proyecto todos los ensayos que se van a realizar son ensayos a solape simple, por este motivo se va profundizar en las características de este ensayo, para así poder entender los valores obtenidos.

Lo primero decir que se ha demostrado que las uniones adhesivas tienen una mayor resistencia aparente si trabajan a cortadura que si trabajan en uniones a tope, el motivo de lo anterior es que cuando una unión adhesiva trabaja a tracción las grietas que surjan no tendrán ningún problema en trabajar en modo I y progresar fácilmente a lo largo de toda la unión, mientras que si la unión trabaja a cortadura las grietas se producirán formando 45° con la dirección de la carga y progresarán hasta llegar a la interface con los adherentes, en este punto (y dada la mayor tenacidad de los adherentes), la grieta no podrá progresar como hasta el momento, teniendo que modificar su trayectoria y viéndose obligada a progresar en modo II, cuya tenacidad es generalmente muy superior al modo I.

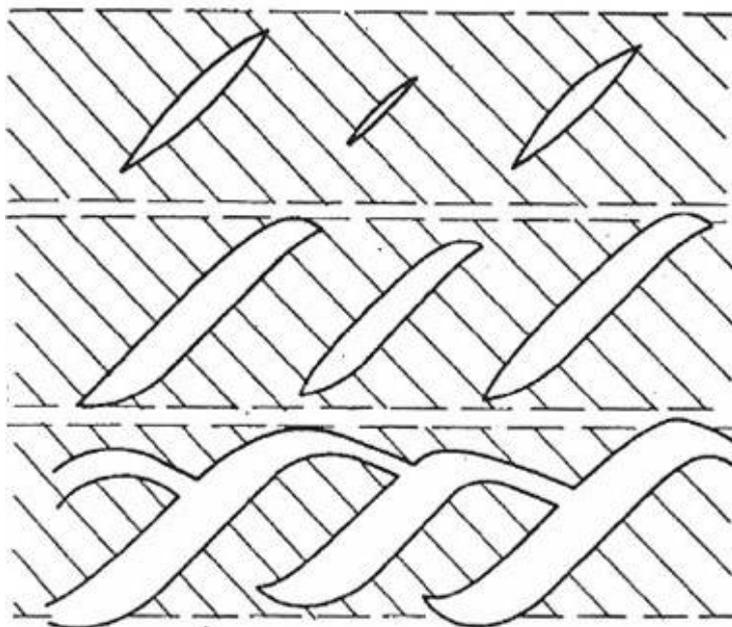


Figura 30. Propagación de la grieta cuando el adhesivo trabaja a cortadura

Un aspecto a tener en cuenta en el diseño de la unión adhesiva (o encolado) por alguna de las configuraciones anteriores es que la transmisión de la carga se realiza con una excentricidad, lo que provoca un momento que introducirá en los extremos una tensiones de tracción perpendiculares a los adherentes (tensiones de pelado), estas tensiones debilitan considerablemente la resistencia del encolado, de ahí que la mayoría de las uniones mostradas en la figura 2 intenten que la transmisión de la carga sea lo más simétricamente posible respecto a centro de gravedad de la unión y se minimicen de esta forma las tensiones de pelado, en la siguiente gráfica se muestra la eficiencia de la unión respecto a la resistencia de los adherentes en función del espesor de los adherentes.

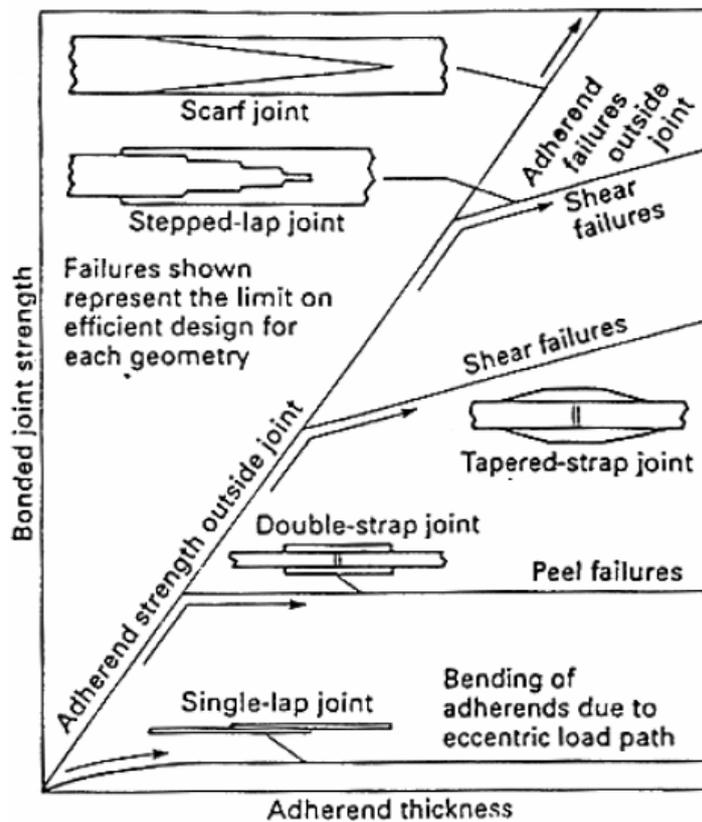


Figura 31. Eficiencia de la unión respecto al espesor de adherente

Existen multitud de estudios para determinar la influencia de este hecho en la resistencia del encolado, el hecho es que este fenómeno crea un estado de tensiones complejo y no uniforme, en la siguiente figura se muestra el efecto de la excentricidad en las uniones a solape. Estas gráficas nos muestran la complejidad del estado tensional en una unión a solape simple y

doble y se muestran las distribuciones típicas de tensiones tangenciales y de pelado en dichas uniones. En el estudio en el que se obtuvo esta distribución de tensiones no se tuvo en cuenta la excentricidad de la carga. Solo se tuvo en cuenta la rigidez de los adherentes y de los adhesivos. Además tampoco se tuvo en cuenta la posibilidad de que el adhesivo pudiese plastificar. Si se tienen en cuenta estos fenómenos se comprueba que el estado tensional es todavía más complejo. Pero las gráficas de la página siguiente ya nos dan una idea de la complejidad del estado tensional de una unión adhesiva a solape simple.

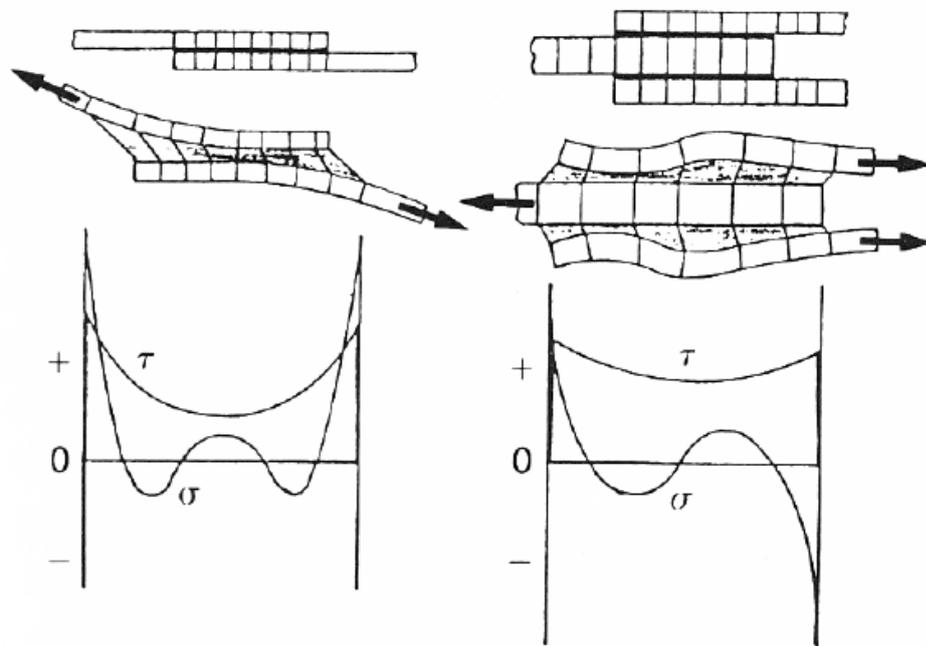


Figura 32. Efecto de la excentricidad en las uniones a solape simple y a solape doble

Como se ve en la figura las tensiones tangenciales no son uniformes y, además, se puede observar que el máximo de dichas tensiones se produce en los extremos de la unión, este es un hecho a tener en cuenta en el objetivo del proyecto, más adelante se procederá a explicar las implicaciones de esto fenómenos.

Además se debe tener en cuenta que en la distribución de tensiones en el adhesivo también influye la rigidez de los adherentes, cuanto más rígido sea un adherente menos se deformará y esto provocará que la distribución de

tensiones sea más uniforme en la unión, existen estudios como el de Volkersen o el de Goland y Reissner que lo ponen de manifiesto, este hecho es fundamental a la hora de diseñar uniones adhesivas de materiales compuestos ya que no será lo mismo que la capa externa del laminado se encuentre a 90° que se encuentre a 0° , así como también se debe diseñar una unión lo más balanceada posible, esto es, con las menores diferencias entre " $E \cdot t$ " de cada adherente del encolado (siendo E el módulo elástico y t el espesor).

Pero todavía se puede complicar más el análisis de las uniones a solape simple, puesto que el curado del adhesivo puede dejar tensiones residuales debido a los distintos coeficientes de dilatación térmica de los adherentes y del adhesivo. Las tensiones de pelado pueden arrancar parte de los adherentes en las zonas próximas al solape y de este modo un laminado no sólo influye con su rigidez total, sino que la rigidez de las capas externas son fundamentales, no es lo mismo que un laminado tenga en sus capas externas láminas a 0° que láminas a 90° , aunque la rigidez total a tracción sea la misma.

Si el adhesivo tiene capacidad para plastificar se provocará una distribución de tensiones de cortadura que en las zonas extremas serán del orden del límite elástico, mientras que en la zona central estará todavía en la zona elástica y la rotación de la unión será mayor, lo que provocará una menor excentricidad y con esto una bajada (proporcional a la carga) de la magnitud de las tensiones de pelado.

Por último comentar que el hecho de que estas uniones transmitan la carga por cortadura a través de la capa de adhesivo hace que los adherentes sufran contracciones transversales por el efecto Poisson diferentes, ya que en la zona de solape los adherentes tienen distintos estados tensionales en un extremo y en otro. En la gráfica de la figura se ve con bastante claridad.

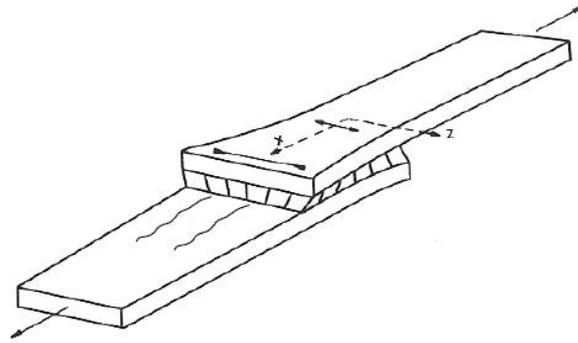


Figura 33. Efecto de la transmisión de la carga por cortadura

Resumiendo, el análisis de una unión a solape simple es harto complejo y no es nada fácil conseguir un modelo que nos indique en función de las cargas externas cual va a ser el estado tensional de dicha unión. Es por ello que no se deben utilizar los resultados obtenidos del ensayo de tracción en uniones a solape simple como valores admisibles de diseño, sino más bien como indicadores de calidad. En la figura se muestra la evolución de una probeta sometida al ensayo de tracción en probetas de solape simple.

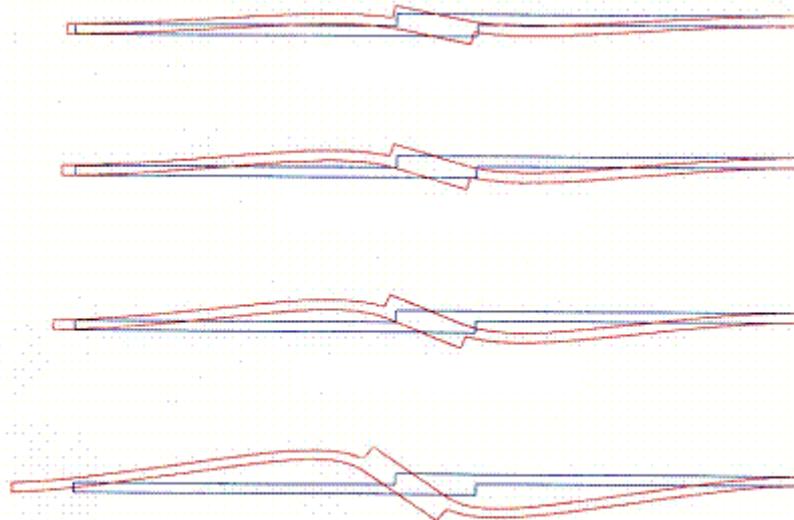


Figura 34. Efecto de la excentricidad de la carga en función del material de los adherentes

Pero en los estudios realizados, cada factor estudiado lo ha sido utilizando para la fabricación de las probetas siempre el mismo material para los adherentes y para el adhesivo, aunque se han usado laminados distintos,

para el estudio del efecto de la humedad, por ejemplo, siempre se ha usado el mismo material para los adherentes, así como el mismo adhesivo. Teniendo todas las probetas las mismas dimensiones, por ello, del mismo modo que para obtener el calor producido por una reacción química exotérmica no es necesario conocer la entalpía absoluta de cada compuesto involucrado en la reacción, sino la diferencia entre la energía de los productos y la energía de los reactivos, al ser todas las probetas iguales todos los fenómenos afectarán por igual y provocarán el mismo estado tensional en el encolado y para hacer comparaciones sí es un buen método.

Entre las ventajas de este ensayo está que es barato, fácil de realizar y, por tanto, tiene una buena repetitividad, es decir, se pueden realizar un gran conjunto de ensayos de forma relativamente rápida. Además en muchas de las situaciones reales en las que se ven las uniones adhesivas a solape simple estos fenómenos aparecen y es por tanto un ensayo bastante realista. Por ello es el ensayo sobre uniones adhesivas más extensamente utilizado, a veces se ha llegado a abusar de él.

Recalcar que con este tipo de ensayos no se puede obtener el admisible de tensiones tangenciales, puesto que, por culpa del par de fuerza creado por la excentricidad de la transmisión de la carga aparecen las tensiones de pelado y dichas tensiones provoca que en la mayoría de casos la unión rompa por los extremos del encolado.

3.2. Descripción del ensayo a realizar

Una vez que se han fabricado todas las probetas se procede al montaje del dispositivo de ensayo. Dentro de las premisas que expone la norma aplicable a este ensayo se indica que el ensayo debe realizarse con una máquina universal de ensayos cuyo rango sea tal que la carga de rotura de la probeta se encuentre dentro del 10 y el 80 % del rango de la máquina. Por ello se utilizó una máquina de ensayos cuyo rango era de 0 a 10 KN, dado que la carga de fallo estimada de ensayos anteriores es de 3 KN.

Otro requisito que debe cumplir dicha máquina de ensayos es que la célula de carga que recoge la fuerza que está soportando la probeta tenga una precisión superior al 1 %, de tal modo que el error entre la fuerza registrada por la célula de carga y la carga real a la que se somete la probeta sea inferior al 1 %.

El sistema de sujeción de la probeta a la máquina debe ser autoalineable, de tal modo, que cualquier desviación entre el eje de carga y el eje de la probeta lo corrijan las mordazas automáticamente.

Debido a que el espesor de las probetas en la zona de los tacones era superior a la apertura máxima admisible por las mordazas de la máquina de ensayos fue necesario el uso de unas mordazas neumáticas que se acoplaron a la máquina de ensayos.

Por último y para compensar el espesor de adhesivo, que hace que la zona de los tacones tenga menos espesor que la zona a solape, entre el tacón de la probeta y las mordazas de la máquina se colocaba una lámina del mismo material que la tira de control de espesor y por tanto del mismo espesor. La fotografía de la página siguiente muestra el montaje de una probeta antes del ensayo.



Figura 35. Montaje del ensayo

Las mordazas son neumáticas, es decir, que la presión para sujetar la probeta a las mordazas se conseguía con un sistema de aire comprimido. La siguiente fotografía muestra con más detalle el dispositivo de ensayo.

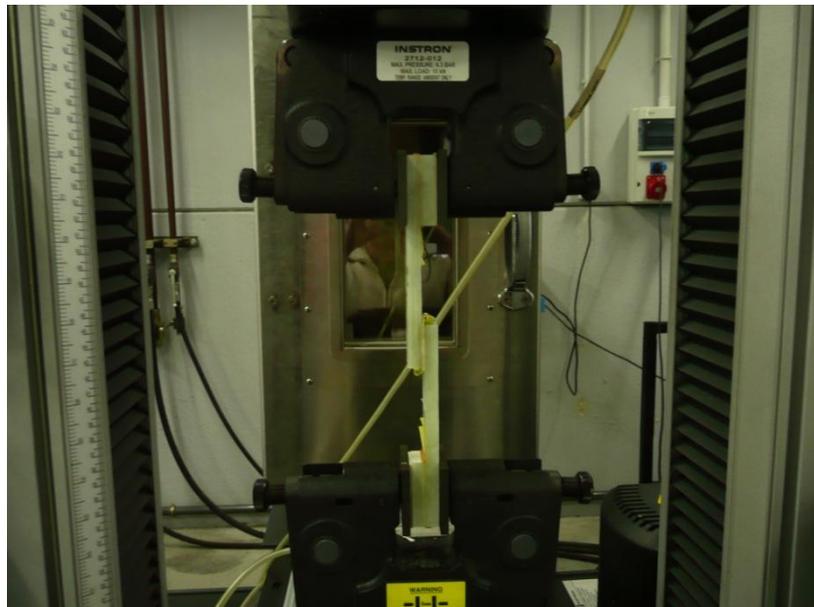


Figura 36. Detalle del dispositivo de ensayo

El programa que gestiona el sistema de gestión de datos es el LabView, con una subrutina programada para este ensayo específicamente. Durante el ensayo se fueron recogiendo pares de puntos carga-desplazamiento de la cruceta y terminado el ensayo se calculó la resistencia media de la probeta, como la carga máxima dividida por el área a solape $\tau = \frac{P_{max}}{w.l}$, donde P_{max} es la carga máxima, w el ancho a solape de la probeta y l el largo a solape de la probeta. Después se inspeccionó la probeta y se determinó que parte de la unión había sufrido rotura adhesiva y que parte de la probeta había sufrido rotura cohesiva.

Cuando se somete a cargas a una unión adhesiva y ésta falla, puede romper de varias formas, dichas formas son:

- *Rotura adhesiva*: Cuando la separación se producen en la interfase adhesivo-sustrato. Esto implica que todo el adhesivo se queda en uno de los adherentes y el otro retuvo nada.
- *Rotura cohesiva*: Cuando lo que falla es el adhesivo. En este tipo de rotura se queda adhesivo pegado a los dos adherentes
- *Fallo del sustrato*: Cuando lo que falla es el propio adherente.

En la siguiente figura se esquematizan los distintos tipos de fallo de una unión adhesiva.

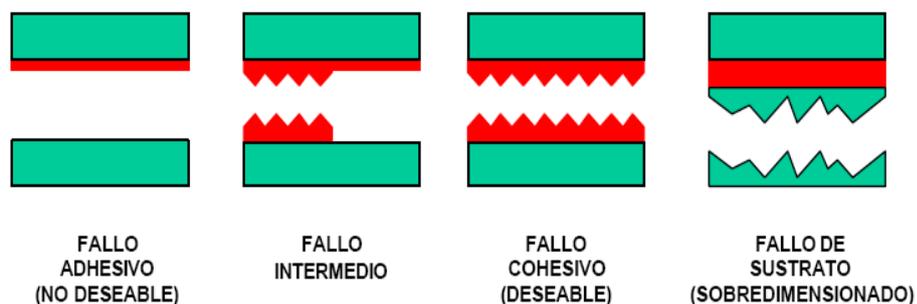


Figura 37. Esquema de los distintos tipos de fallo de un encolado

3.3. Resultado de los ensayos y estudio comparativo de la influencia de los parámetros

En este apartado se van a presentar los resultados de todos los ensayos llevados a cabo. De cada probeta se ha recopilado la curva carga-alargamiento, la carga máxima, la tensión última y el tipo de fallo del adhesivo. El programa seguido es el que se detalla a continuación.

- *Estudio del efecto de humedad*

Se han realizado nueve series de ensayos, cada una con una combinación de tiempo y humedad.

- *Estudio del efecto del espesor de adhesivo*

Se han llevado a cabo dos series de ensayos, cada una con un espesor distinto.

- *Efecto del ciclo de curado*

Se han ensayado tres series de ensayos, cada serie con un ciclo de curado distinto.

- *Efecto del vacío en el ciclo de curado*

Se han testado tres conjuntos de ensayos, cada serie llevaba un tiempo distinto desde que se eliminó el pelable a los adherentes hasta que se efectuó la unión.

- *Influencia del tipo de pelable y sistema de desmolde*

Se ensayaron seis series de ensayo, cada serie con una combinación distinta de tipo de pelable y sistema de desmolde.

- *Por último, se va hacer un seguimiento de la resistencia de cada probeta en función de en qué lugar del panel ha sido obtenido. Para comprobar que todo el adhesivo ha sido bien curado*

En cada apartado se presentará una tabla resumen en el que se indicará el ancho y largo de la zona a solape, el valor máximo, mínimo y medio de la resistencia de la unión y el coeficiente de variación de los resultado, así como el tipo de rotura más común del adhesivo.

Es necesario decir que no se deben hacer comparaciones con ensayos de este tipo realizados con otros materiales o siguiendo otras normas que indiquen otra configuración distinta, ya que estos ensayos se ven afectados por fenómenos de borde, por la rigidez del adhesivo y del adherente y por todos los fenómenos que ya se comentaron con anterioridad. En este caso se ha seguido la norma ISO-4587. En la siguiente figura hay un esquema de las dimensiones más importantes de la probeta, aquí se indica lo que es el largo y el ancho del solape. El largo se denota por L y el ancho por W.

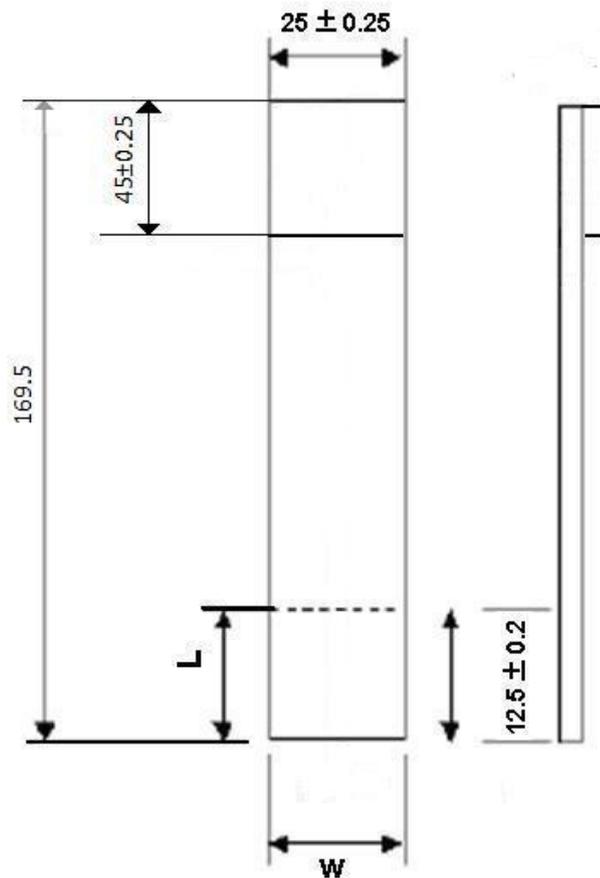


Figura 38. Dimensiones de la probeta

3.3.1. Efecto de la humedad

Se mostró anteriormente como se procedería a realizar los ensayos, el sistema de ensayos va a ser el mismo en todas y cada una de las probetas, la diferencia entre ellas radica en variar uno de los procesos de fabricación de la unión. En este caso, lo que varía es la humedad del ambiente y el tiempo de exposición a dicho ambiente. Cuando un material se encuentra expuesto a un ambiente, las moléculas de los distintos compuestos que están en ese ambiente terminan penetrando en el material, es un fenómeno conocido como difusión, existen muchos modelos que intentan representar dicho fenómeno, uno de los más conocidos es la ley de Fick. En este caso se va a estudiar cómo afecta a la resistencia de la unión la absorción de humedad.

Cada serie de ensayo se expondrá a una atmósfera con una cantidad de humedad controlada, la temperatura será siempre la misma y el tiempo de exposición variará. Para conseguir esto se hizo uso de una cámara climática, en las figuras se muestran las lecturas de los dispositivos de control de la cámara climática, para poder comprobar que cada probeta ha sido expuesta al ambiente deseado. Se vuelve a mostrar como recordatorio las fotografías de las condiciones a las que han sido expuesta cada serie.



Figura 39. Distintas condiciones de humedad relativa y temperatura

A continuación se muestra la tabla resumen de los resultados de los ensayos con acondicionamiento.

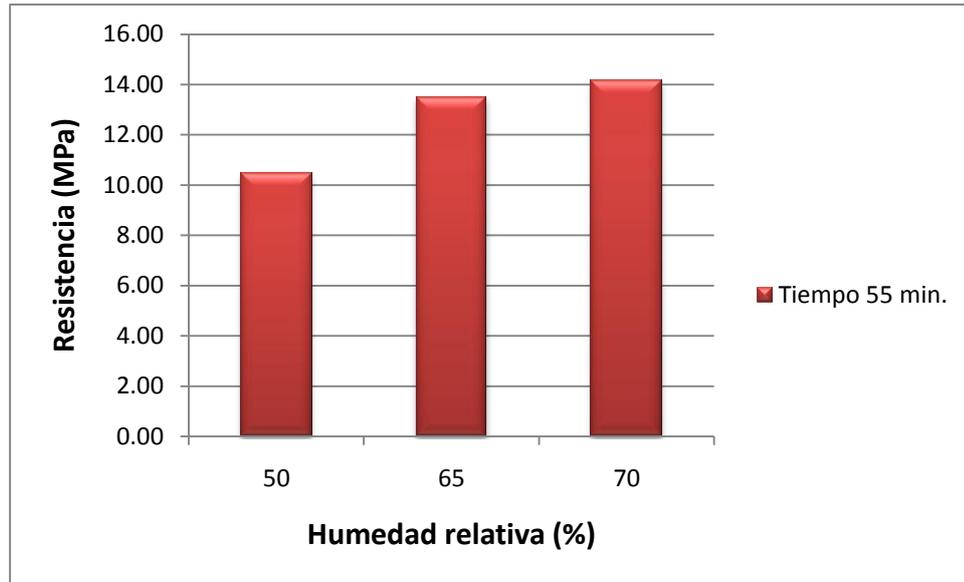
Efecto de la humedad									
Referencia	Tipo de acondicionamiento		Dimensiones		Propiedad	Máximo	Media	Mínimo	C.V. (%)
	Tiempo (min)	Humedad relativa (%)	Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-01	55	50	24.93	12.42	Resistencia (MPa)	11.99	10.47	9.38	9.74
Serie-02	55	65	24.91	12.54	Resistencia (MPa)	17.47	13.50	10.97	13.50
Serie-03	55	70	24.98	12.58	Resistencia (MPa)	15.59	14.15	12.29	7.84
Serie-04	60	50	24.93	12.54	Resistencia (MPa)	13.43	12.01	10.31	7.81
Serie-05	60	65	24.99	12.55	Resistencia (MPa)	14.60	13.54	11.95	6.63
Serie-06	60	70	24.97	12.40	Resistencia (MPa)	16.12	14.59	13.14	6.36
Serie-07	70	50	24.97	12.58	Resistencia (MPa)	12.75	11.78	10.75	4.53
Serie-08	70	65	25.05	12.67	Resistencia (MPa)	15.29	13.90	12.87	5.89
Serie-09	70	70	25.00	12.52	Resistencia (MPa)	14.68	12.80	10.06	9.99

Tabla 18. Resumen de resultados del estudio del efecto de la humedad

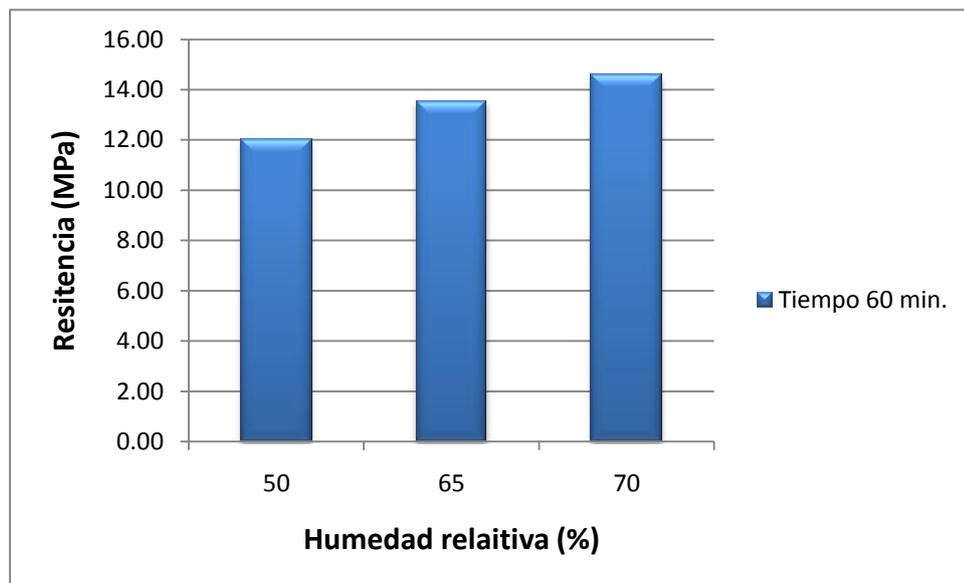
Como idea general del resumen de resultados se puede sacar la conclusión de que a mayor humedad absorbida por el adhesivo antes de ser curado, mayor es la resistencia del adhesivo, esto es un hecho curioso, ya que la mayoría de adhesivos suelen ver reducida su capacidad portante cuando se ve expuesto a ambientes húmedos.

3.3.1.1. Efecto de la humedad del ambiente

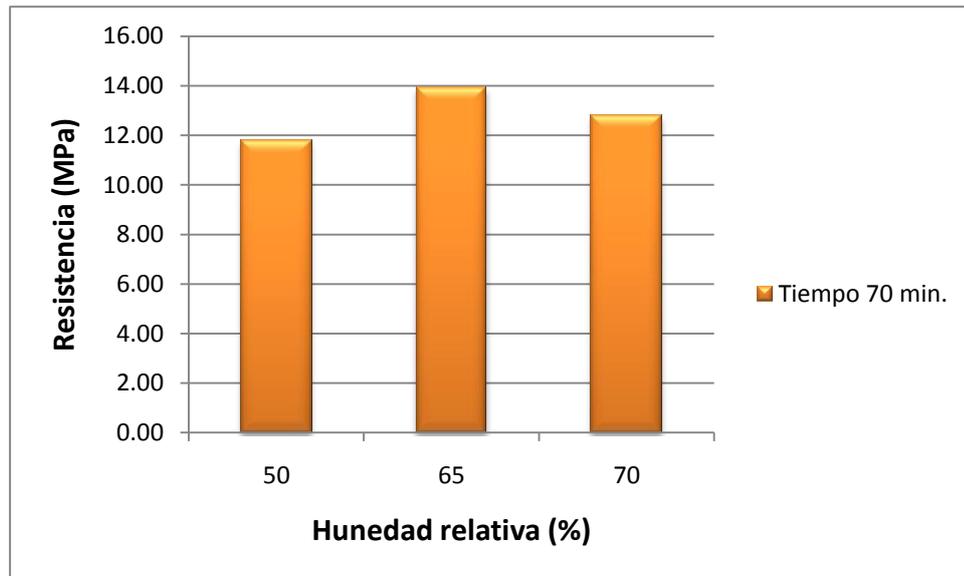
Como se puede observar en la tabla anterior, existen tres combinaciones de tiempo y humedad del ambiente, ahora nos vamos a centrar en tiempos de exposición iguales y valores de humedad distintos.



Gráfica 5. Resistencia función de la humedad para un tiempo en cámara de 55 min.



Gráfica 6. Resistencia función de la humedad para un tiempo en cámara de 60 min.

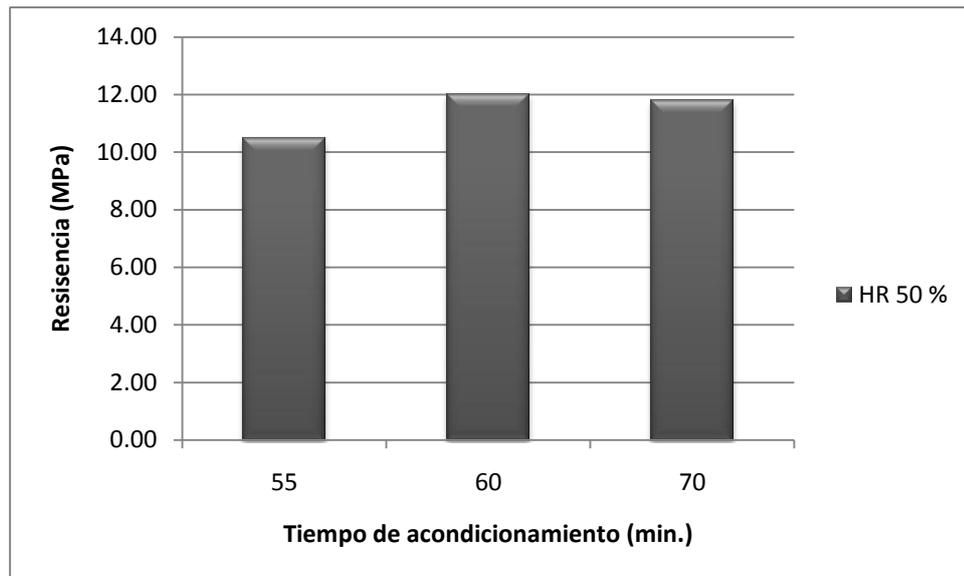


Gráfica 7. Resistencia función de la humedad para un tiempo en cámara de 70 min.

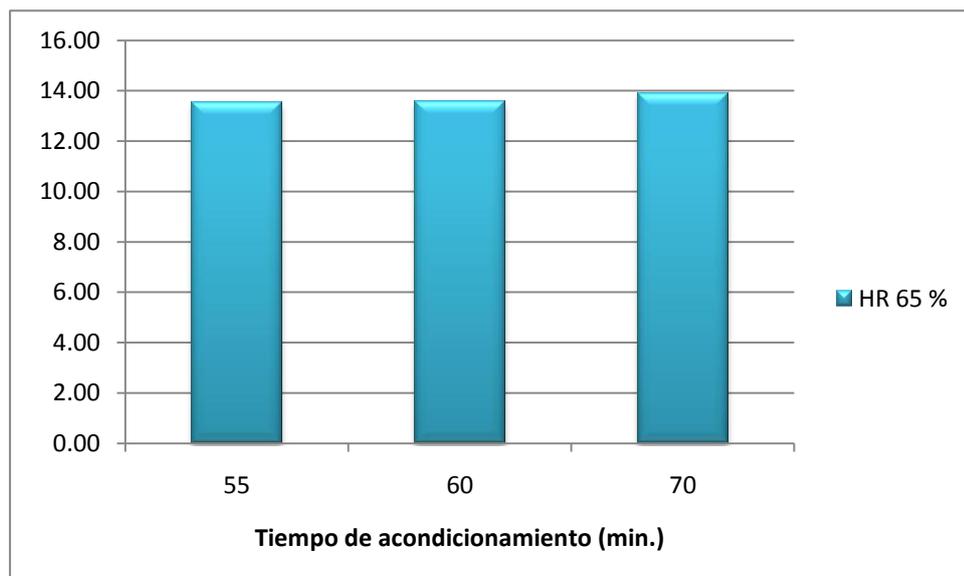
Aunque el resultado de los ensayos da una dispersión un poco elevada, se puede apreciar que este adhesivo aumenta ligeramente su resistencia con un poco de humedad en el ambiente, se puede observar que para un tiempo dado a mayor humedad en el ambiente mayor es la resistencia del adhesivo, salvo en el caso más extremo, el caso de 70 minutos a 70 % de humedad relativa, dicho caso sufre una reducción de la resistencia con respecto al caso de 70 minutos y 65 % de humedad relativa.

3.3.1.2. Efecto del tiempo de exposición

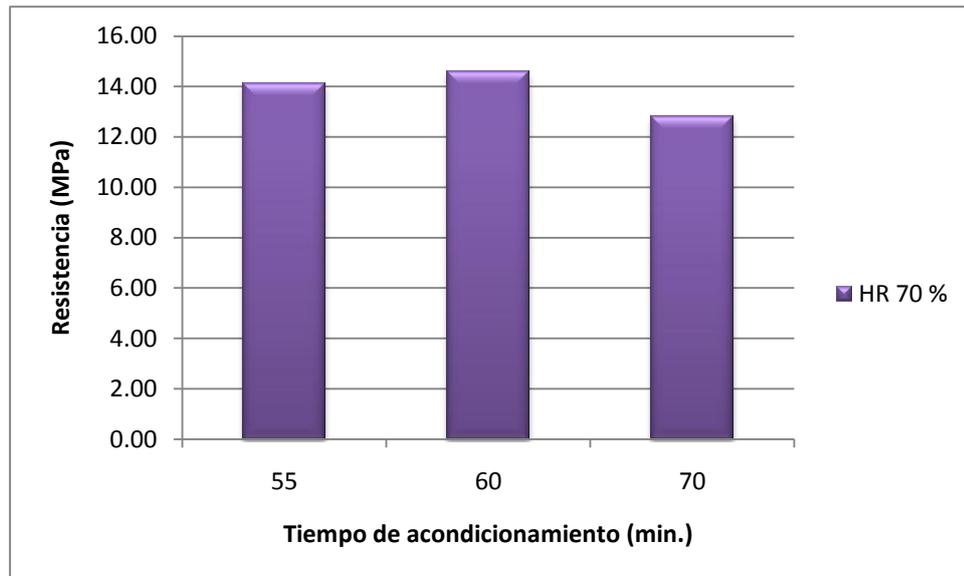
Ahora se va a mostrar cómo afecta el tiempo de exposición, para esto se van a exponer otras tres gráficas, en este caso en cada gráfica vamos a dejar constante la humedad relativa del ambiente y se va a variar el tiempo de exposición.



Gráfica 8. Resistencia del material en función del tiempo de exposición.



Gráfica 9. Resistencia de la unión en función del tiempo de exposición



Gráfica 10. Resistencia de la unión en función del tiempo de exposición

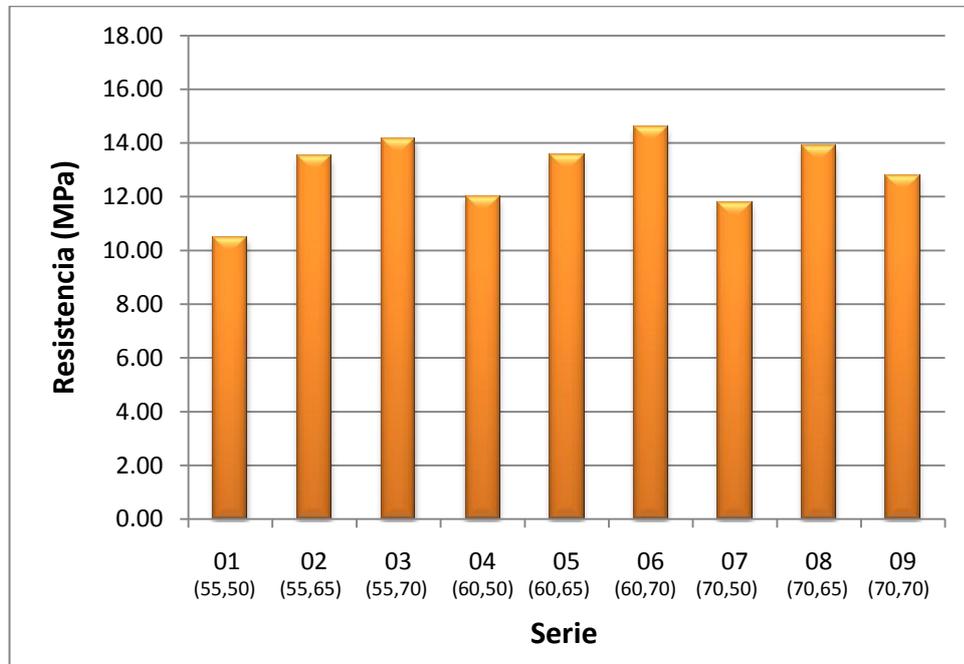
En este caso existe un pequeño indicio que los mejores resultados se encuentran cuando el tiempo de acondicionamiento es de 60 minutos. Ahora pasamos a mostrar el tipo de rotura, se expresará la media en cada serie del tanto por ciento de rotura cohesiva.

Referencia	Media
Serie-01	32.50
Serie-02	37.50
Serie-03	25.50
Serie-04	73.50
Serie-05	54.50
Serie-06	26.50
Serie-07	52.00
Serie-08	24.50
Serie-09	0.00

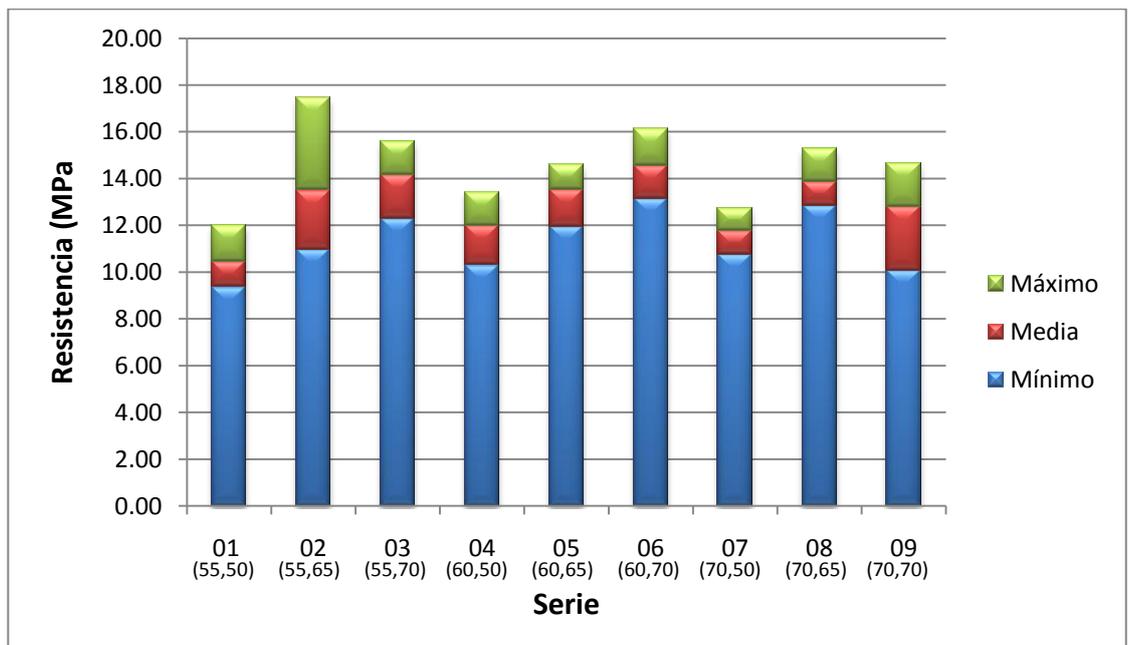
Tabla 19. Fallo cohesivo medio de cada serie en %

En este caso no se ha puesto la dispersión porque es del orden del 100% en todos los casos, salvo en la última serie en la que todas las probetas tienen rotura adhesiva al 100%.

En la gráfica 11 se muestra el conjunto completo de todos los ensayos realizados para el estudio de la humedad, en la siguiente gráfica (gráfica 12) se muestra también el máximo y mínimo valor de cada serie, de esta manera podemos ver el intervalo de incertidumbre de cada ensayo.



Gráfica 11. Conjunto completo de series de estudio de efecto de la humedad

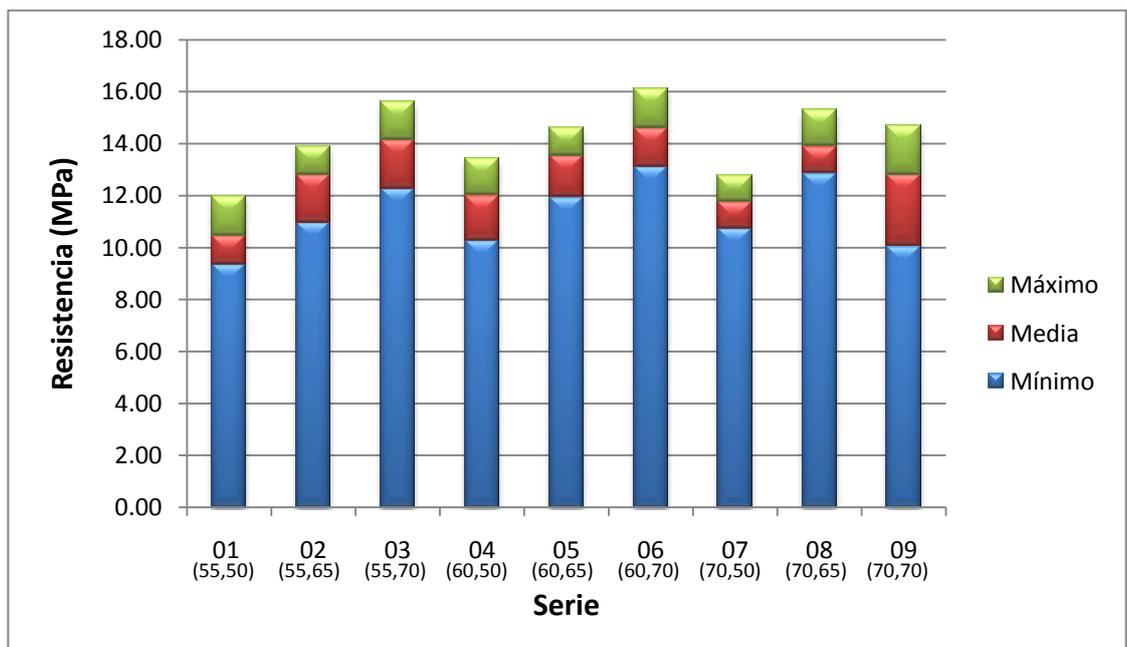


Gráfica 12. Conjunto completo de series con la dispersión incluida

Para una mayor comprensión se ha incluido entre paréntesis los valores del tiempo de exposición y de la humedad relativa del ambiente debajo de cada probeta (t, H).

En esta gráfica se muestra como va aumentando ligeramente la resistencia de la unión al aumentar la exposición a la humedad, salvo en la serie con el acondicionamiento más extremo, en la que se observa una bajada de la resistencia. Esto resultados son un poco sorprendentes, ya que, por lo general, la humedad suele reducir la resistencia de la unión.

Si se observa la última gráfica se puede ver que la serie 02 tiene una gran dispersión, si analizamos esa dispersión se puede reparar en el hecho de que la media está más cerca del mínimo que del máximo, esto hacer pensar que la mayor parte de los resultados está cerca del mínimo y que esta dispersión tan alta se debe a la desviación de una o dos probetas. En efecto, si se consulta el anexo I se puede comprobar que la mayoría de las probetas están en el entorno de 12 ó 13 MPa de resistencia y solo dos probetas con valores de 15 y 17 MPa nos provocan este valor de la dispersión. Si se ignorasen estas dos probetas se obtendría una dispersión de 7.30 %. Además la gráfica nos quedaría de la forma:



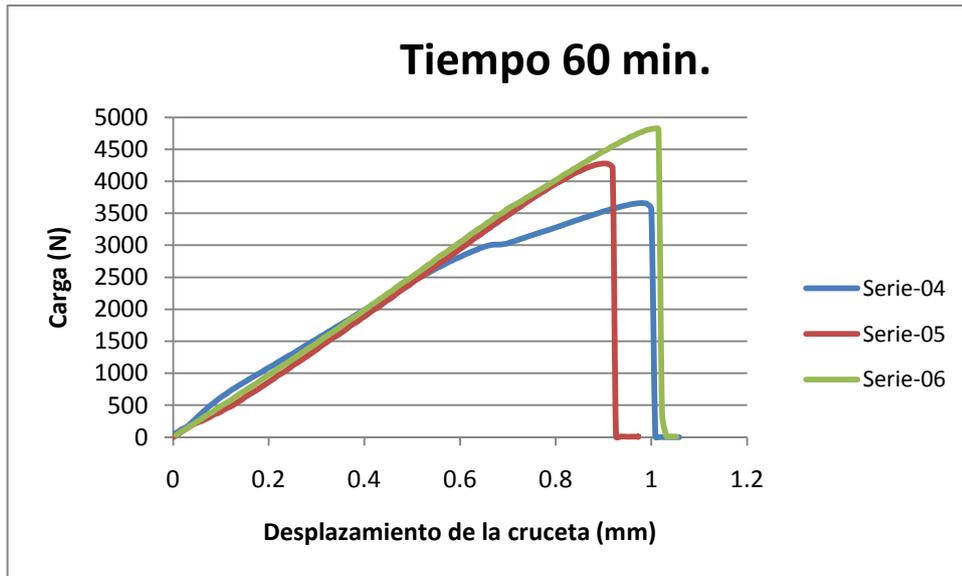
Gráfica 13. Resultados con la serie 02 corregida

Se puede observar como con estos resultados la tendencia es claramente a que a mayor exposición a la humedad mejores resultados. Un proceso análogo se puede hacer con la serie 09, ya que en esta serie lo que distorsiona los resultados es una sola probeta que muestra un resultado muy bajo.

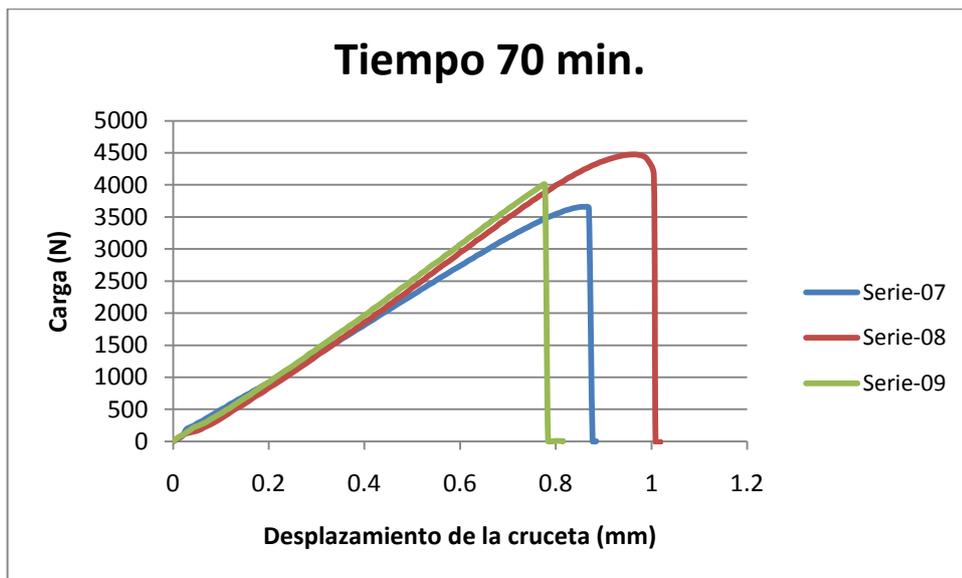
Resulta instructivo la visualización de las gráficas de los ensayos, en cada gráfica se ha representado la probeta más representativa de la serie (la que tiene como resultado el más cercano a la media). Se compararán los resultados por tiempo de exposición.



Gráfica 14. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas



Gráfica 15. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas



Gráfica 16. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

3.3.2. Efecto del espesor de adhesivo

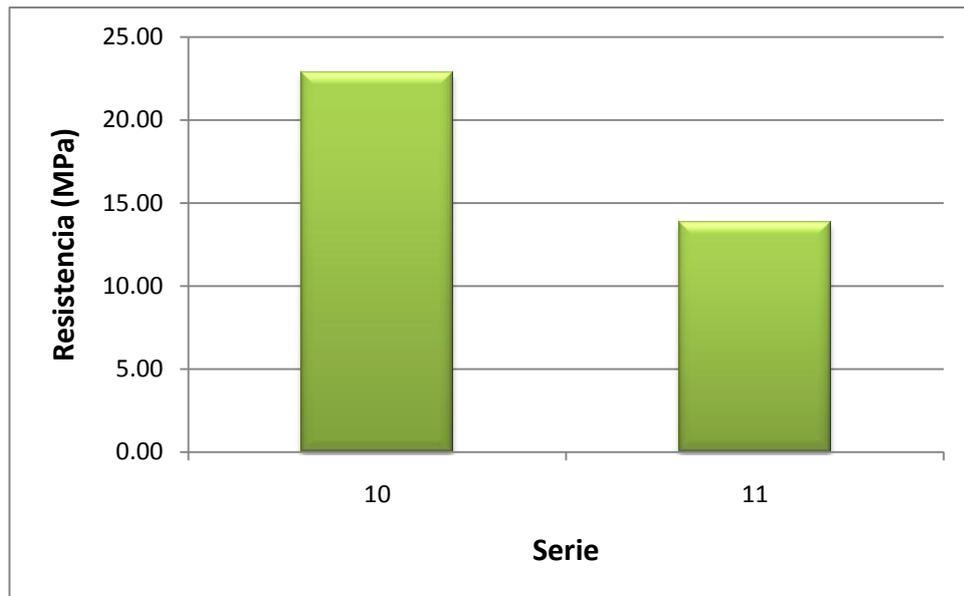
En este apartado se muestran el efecto que tiene el espesor de adhesivo en la resistencia de la unión. Para ello, como se ha comentado anteriormente se ha llevado a cabo dos series de ensayo, cada serie tiene un espesor distinto y el resto de parámetros se ha mantenido constante con los valores que anteriormente se han definido como estándar.

A continuación se exponen los resultados de cada serie en un formato idéntico al del apartado anterior.

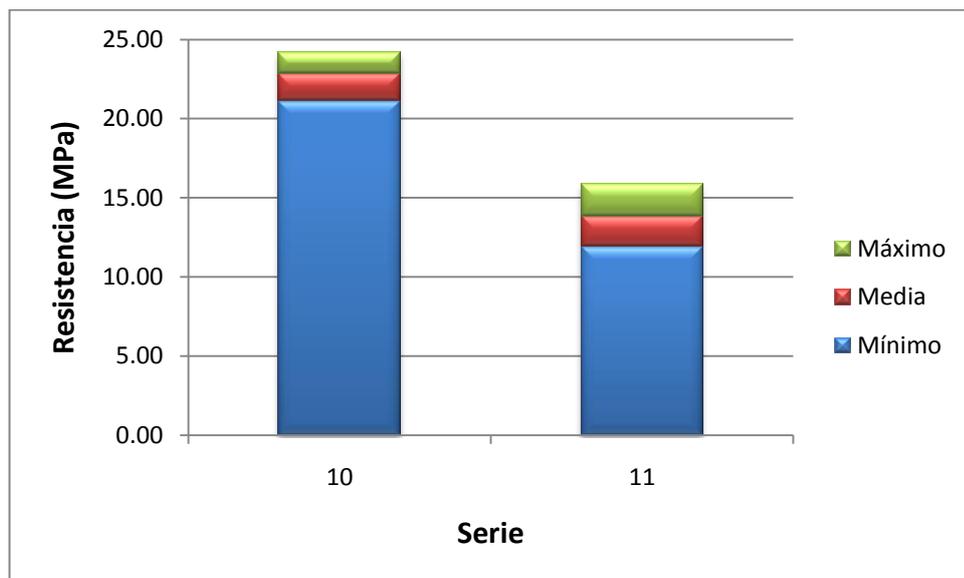
Efecto del espesor								
Referencia	Espesor de adhesivo	Dimensiones		Propiedad	Máximo	Mínimo	Media	C.V. (%)
	(mm)	Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-10	0.6	24.98	12.44	Resistencia (MPa)	24.19	21.10	22.84	5.26
Serie-11	3.0	25.03	12.55	Resistencia (MPa)	15.85	11.89	13.83	8.75

Tabla 20. Resultados del estudio del efecto de adhesivo

De los resultados expuestos en esta tabla parece claro que una reducción de adhesivo aumenta considerablemente la resistencia de la unión. Aunque no sea en este caso necesario, para una mayor claridad se mostrarán los resultados gráficamente. Una segunda gráfica muestra la dispersión de los resultados. Las gráficas se encuentran en la página siguiente.



Gráfica 17. Comparación de los resultados en función del espesor.



Gráfica 18. Comparativa de resultados con la dispersión incluida

En esta gráfica se puede comprobar que la dispersión de los resultados no afecta en nada a la interpretación de los resultados.

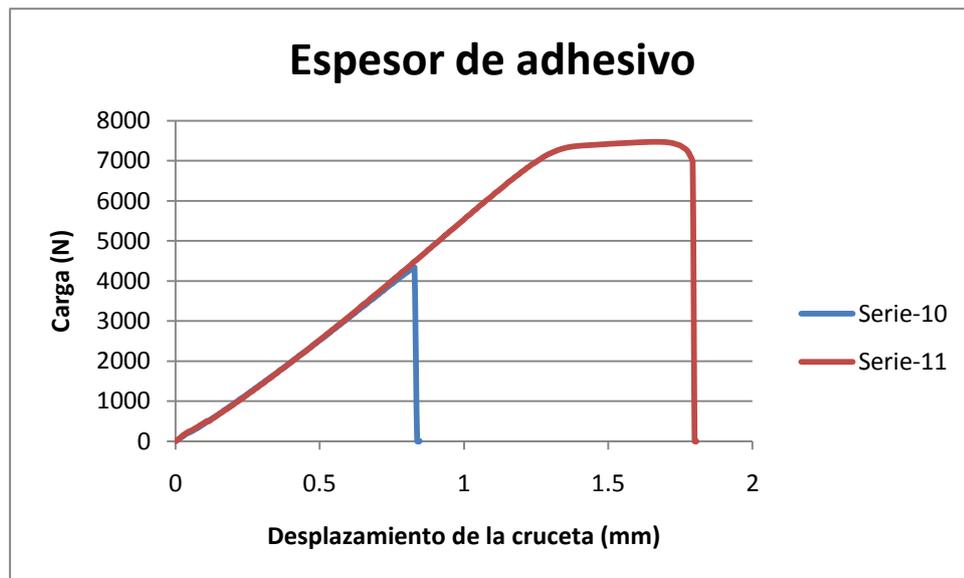
Como en el apartado anterior continuaremos con una tabla resumen del tipo de rotura.

Referencia	Media
Serie-10	56.00
Serie-11	36.00

Tabla 21. Fallo cohesivo medio de cada serie en %

Como en el apartado anterior y para el resto de apartados comentar que el anexo II encontrará una tabla con todos los resultados de todas las probetas.

Se va a mostrar un la curva carga-desplazamiento de la probeta más representativa de cada serie.



Gráfica 19. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

3.3.3. Efecto del ciclo de curado

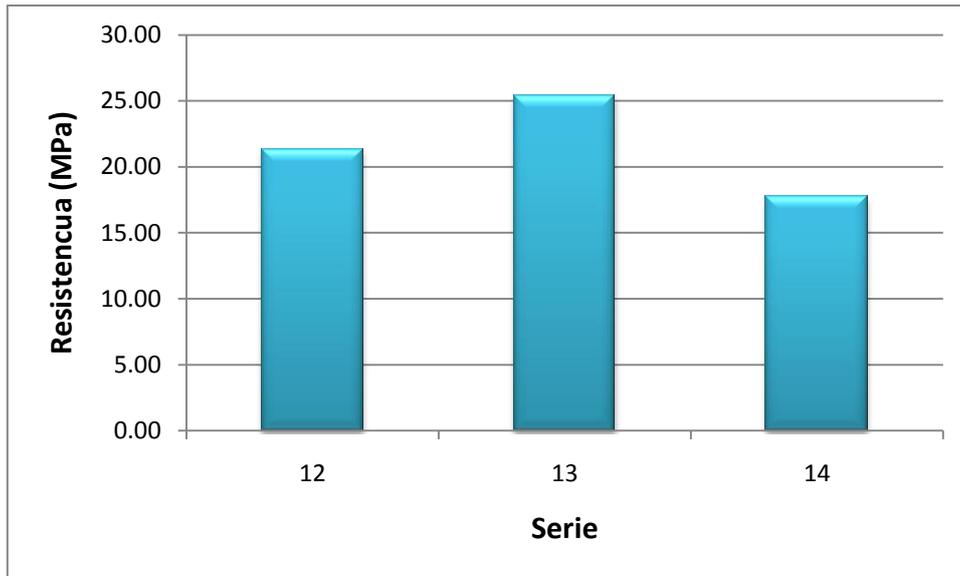
Como su nombre indica en este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de ensayar tres series, cada serie tiene un ciclo de curado distinto. En este caso no se dispone del ciclo de curado recomendado por el fabricante. Los ciclos a los que se sometió cada serie se describieron en el apartado 2.3.3. Así que sin más mostramos la tabla resumen.

Efecto del ciclo de curado									
Referencia	Meseta		Dimensiones		Propiedad	Máximo	Mínimo	Media	C.V. (%)
	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-12	80	60	25.01	12.53	Resistencia (MPa)	23.97	18.75	21.36	9.51
Serie-13	40	90	25.00	12.54	Resistencia (MPa)	26.82	22.90	25.39	5.37
Serie-14	80	40	24.99	12.49	Resistencia (MPa)	19.45	15.79	17.84	7.97

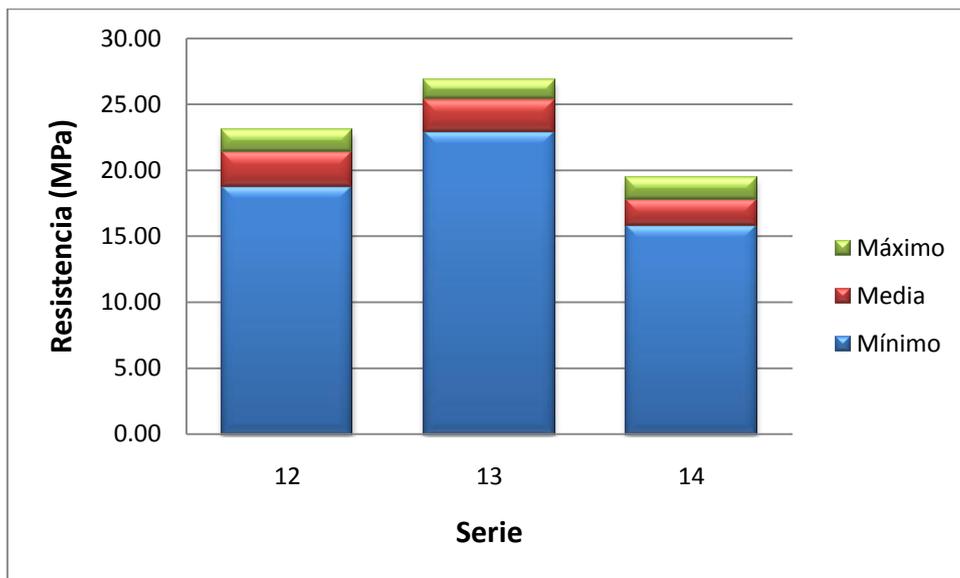
Tabla 22. Resumen de resultados con los distintos ciclos de curado

De los resultados de la tabla se puede observar que el ciclo de curado que dio mejor resultado fue el de meseta de 40 minutos a 90 °C, seguido del ciclo de 80 minutos a 60 °C, el ciclo de curado restante es el que dio los resultados más pobres. En la siguiente figura se muestra de forma gráfica la comparación entre los tres ciclos de curado. La serie 12 tiene una resistencia media un 15.87% inferior a la resistencia de la serie 13 y a su vez la serie 14 tiene una resistencia media un 16.76% inferior a la de la serie 12.

En la siguiente página puede observarse gráficamente los valores de la resistencia media y los valores de la dispersión (gráficas 17 y 18).



Gráfica 20. Resistencia media de cada serie



Gráfica 21. Resumen de resultados con la dispersión incluida

Se puede observar en esta última figura que la dispersión no es lo suficientemente alta como para alterar la interpretación de los resultados.

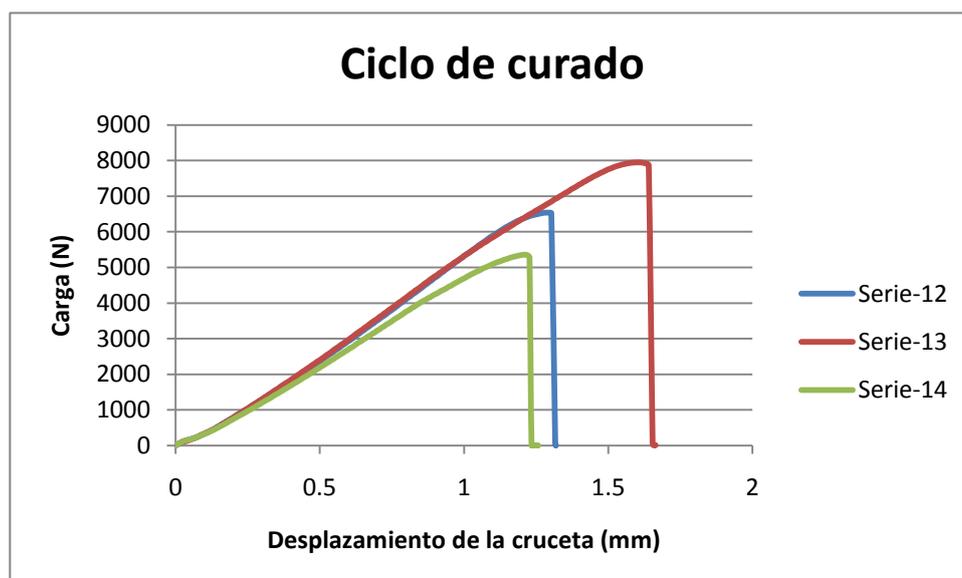
Mostramos una tabla resumen indicando si el ciclo de curado afectó al tipo de rotura o no.

Referencia	Media
Serie-12	88.5
Serie-13	37.50
Serie-14	25.50

Tabla 23. Fallo cohesivo en cada serie en %

Se observa que cuánto más pequeña es la combinación tiempo-temperatura más tendencia hay al fallo adhesivo, este tipo de fallo no es deseable, ya que con estos fallos no se ha agotado la capacidad portante del adhesivo.

Se va a mostrar un la curva carga-desplazamiento de la probeta más representativa de cada serie, esta probeta ha sido la más cercana a la media, siempre que la media este dentro de un rango pequeño en el que se encuentran la mayoría de probetas ensayadas.



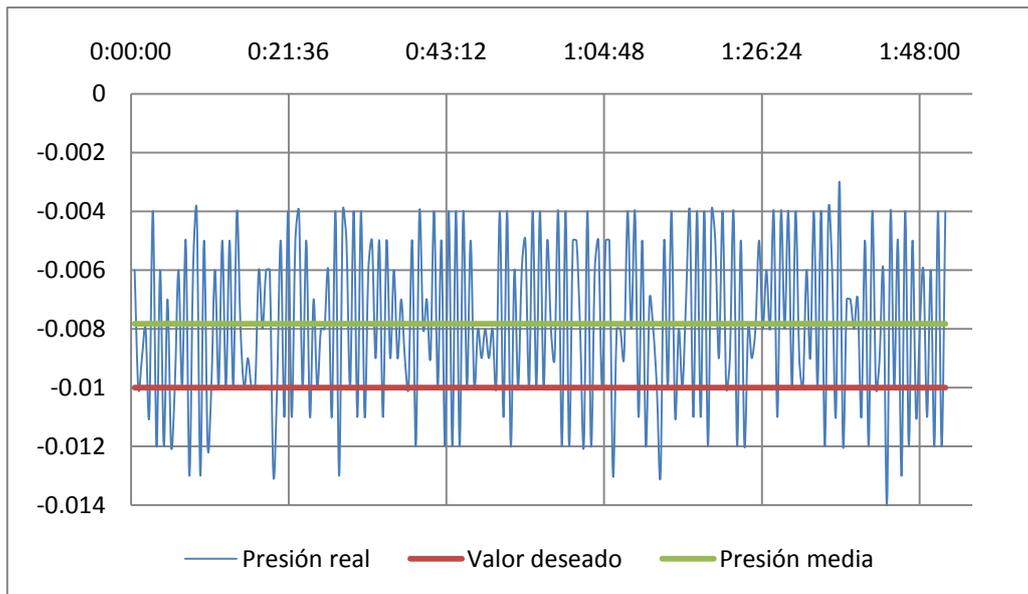
Gráfica 22. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

3.3.4. Efecto del vacío

Un aspecto fundamental en el curado de un adhesivo es la presión que se ejerce sobre la unión durante el ciclo de curado, para todas las series anteriores y para las siguientes a las que se muestran en este apartado se ha aplicado una presión relativa de 0.5 bares, el objeto de la aplicación de la presión es para conseguir que las superficies de los adherentes y el adhesivo estén en contacto absoluto y no queden zonas sin pegar. Otro de los aspectos a tener en cuenta es que con más presión es más fácil que la humedad que haya podido absorber el adhesivo no va a crear porosidad en el ciclo de curado si éste es a temperaturas superiores a 100 °C, aunque no es el caso es instructivo el comentario.

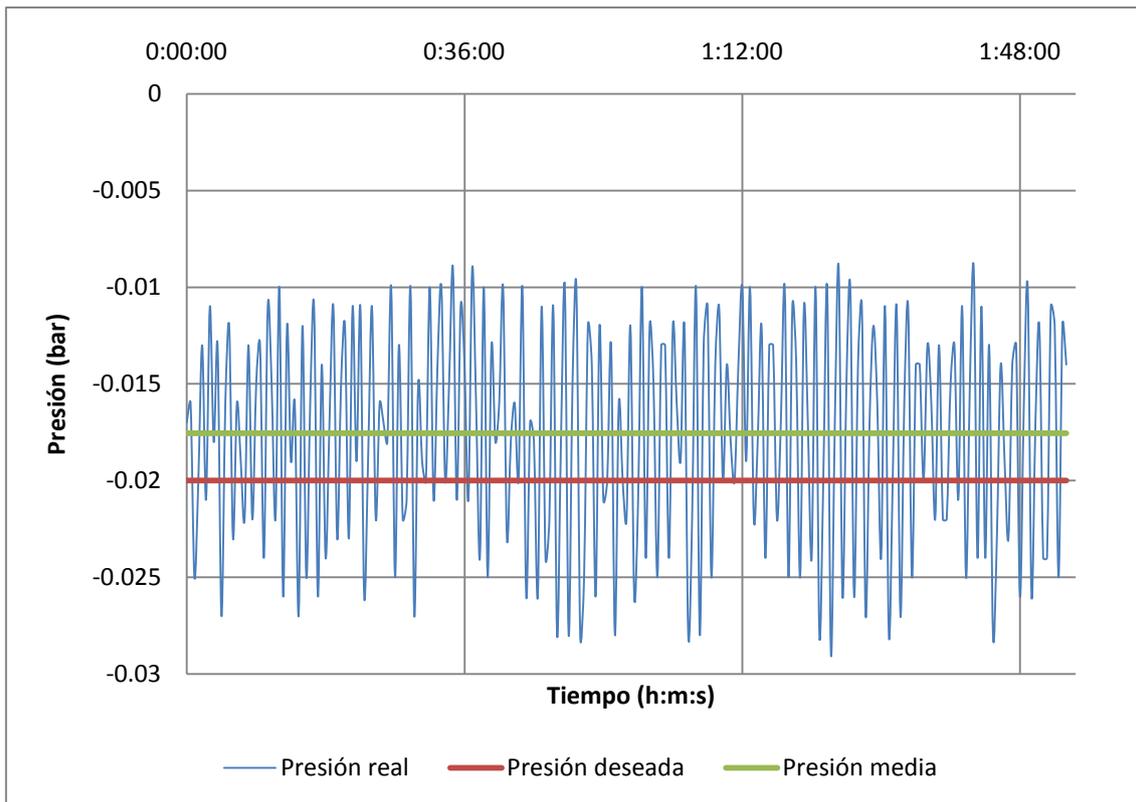
En este caso se ha aplicado una pequeña presión de vacío mediante el empleo de una bolsa de vacío y curado en autoclave a cada serie, para ver el efecto que provoca un poco de vacío sobre la unión, cada serie con un poco más de vacío que la anterior.

Decir que la presión de vacío era muy pequeña, un vacío de -10 mbar, -20 mbar, -30 mbar es prácticamente presión ambiente. Esto provocó problemas, ya que la bomba de vacío de autoclave donde se curó el adhesivo no era capaz de dar ese valor y, aunque intentaba adaptarse a ese valor resultó que hubo una gran oscilación en torno al valor dado, siendo los valores de la oscilación del mismo orden de magnitud que el vacío deseado. En las gráficas de la figura se muestra la evolución de la depresión con el tiempo de cada una de las tres series.



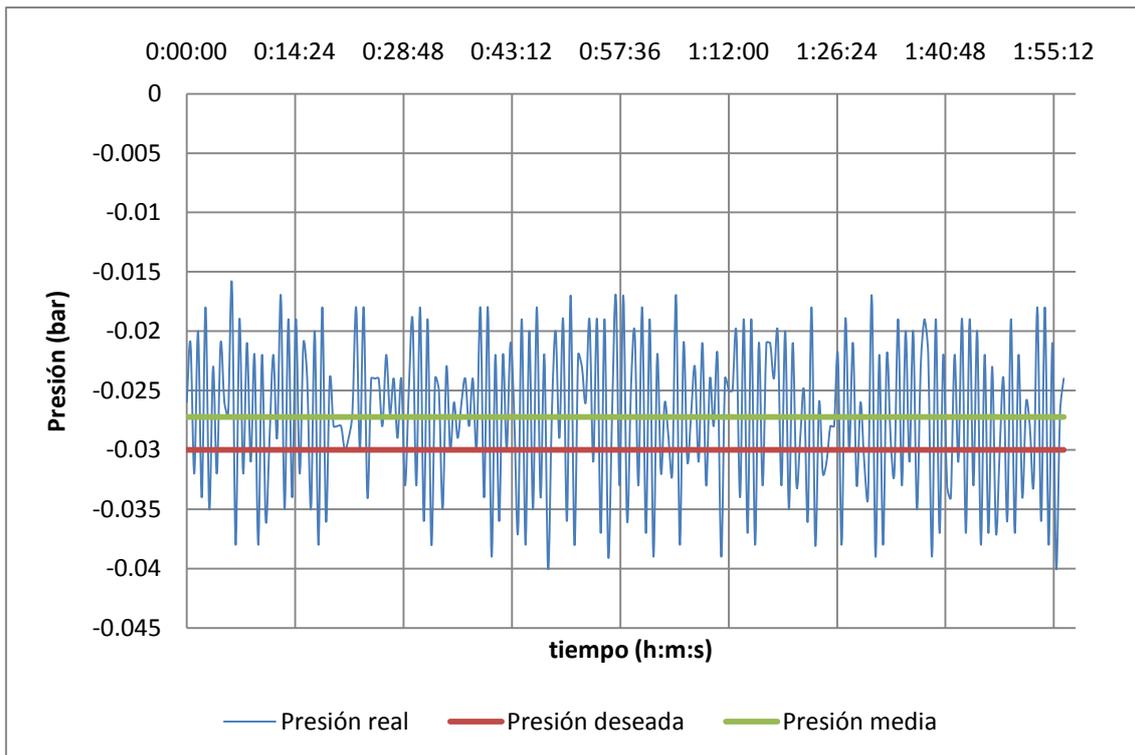
Gráfica 23. Evolución de la presión con el tiempo para el ciclo de curado con vacío de -10 mbar

Se puede observar en la figura la gran oscilación debido a que la precisión de la bomba de vacío del autoclave no es capaz de adaptarse a la presión indicada, el valor deseado es de -10 mbar, mientras que el valor medio es de -7.82 mbar. Existiendo una diferencia entre ambos de un 21.8 %. Pero como se podrá observar en las dos figuras siguientes es que, a pesar de la gran dificultad para estabilizar el valor de la presión si va a haber una diferencia de vacío significativa entre cada serie. Puede verse en la siguiente figura que la oscilación es tan importante como la gráfica anterior, pero que lo hace en torno a un valor de vacío mayor.



Gráfica 24. Evolución de la presión con el tiempo para el ciclo de curado con vacío de -20 mbar

En la gráfica se puede ver cómo la oscilación se hace en torno a otros valores distintos, dando como presión media -17.55 mbar que con respecto a la presión deseada de -20 mbar representa un error de 12.25 %, que es un error considerablemente menor que el anterior, además si vemos el valor de vacío en torno al cual oscila este ciclo de curado es un número considerablemente mayor respecto al cual oscila el ciclo de curado anterior. En el siguiente ciclo de curado se va a observar esto mismo que acabamos de comentar.

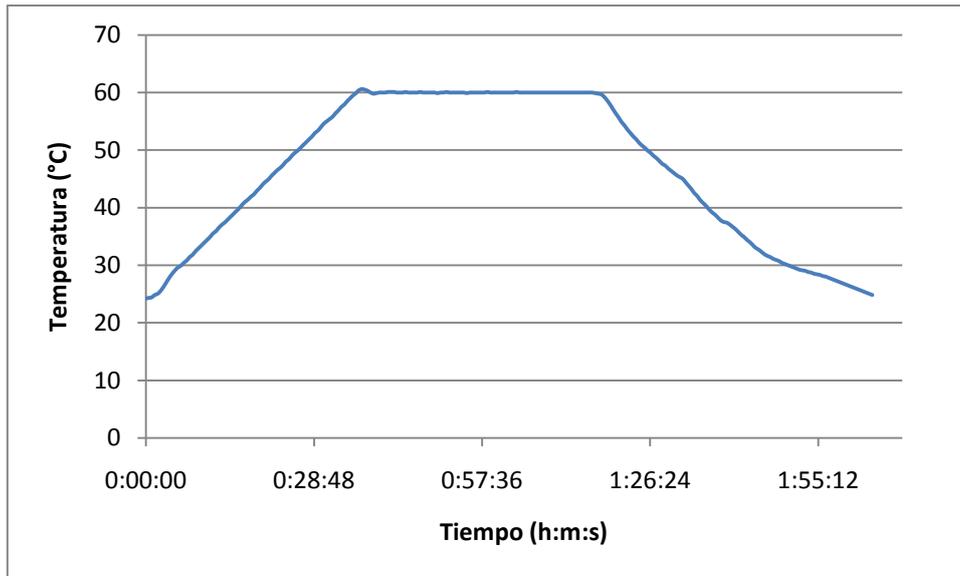


Gráfica 25. Evolución de la presión con el tiempo para el ciclo de curado con vacío de -30 mbar

Se puede apreciar en la figura que la presión media en torno a la que oscila la presión del curado frente al tiempo es de -27.24 mbar, esto supone un error con respecto a la presión deseada del 9.22 % una desviación todavía más pequeña que el anterior.

Por supuesto que la gráfica muestra que a lo largo de todo el periodo la el error cometido es alto, pero el hecho de mostrar las gráficas es para resaltar que, si bien, no se ha obtenido lo deseado, también es cierto que ha habido diferencias significativas en orden de magnitud de un vacío respecto a otro.

En cuanto a la evolución de la temperatura dentro de autoclave, en la siguiente figura se muestra que el ciclo de curado si se siguió correctamente.

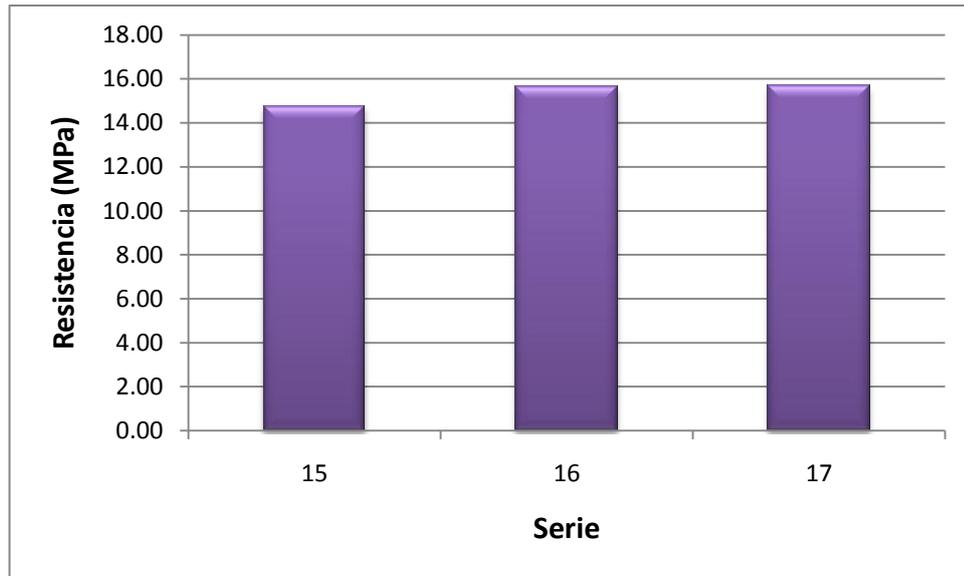


Gráfica 26. Evolución de la temperatura para el ciclo de -30 mbar

Efecto del vacío								
Referencia	Vacío	Dimensiones		Propiedad	Máximo	Mínimo	Media	C.V. (%)
	(mbar)	Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-15	-10	25.02	12.47	Resistencia (MPa)	15.61	13.81	14.77	4.40
Serie-16	-20	24.94	12.51	Resistencia (MPa)	17.63	13.51	15.63	9.26
Serie-17	-30	24.96	12.53	Resistencia (MPa)	16.79	13.79	15.67	7.03

Tabla 24. Resumen de resultados del efecto del vacío en el ciclo de curado

En este caso parece que el vacío que se le ha aplicado es tan pequeño y las diferencias entre un vacío y otro también son tan pequeñas que parece no haber afectado significativamente a la resistencia de la unión. En la siguiente página se muestra una gráfica comparativa con los resultados.



Gráfica 27. Resumen de resultados con la dispersión incluida

Como se comentó anteriormente, la gráfica muestra que la resistencia de las tres series es prácticamente la misma.

Observando la dispersión de cada serie (a pesar de que la dispersión no es muy elevada teniendo en cuenta que los ensayos llevados a cabo son de solape simple). La dispersión de los resultados es suficiente como para que cualquiera de las series fuese la que tuviese una mayor resistencia.

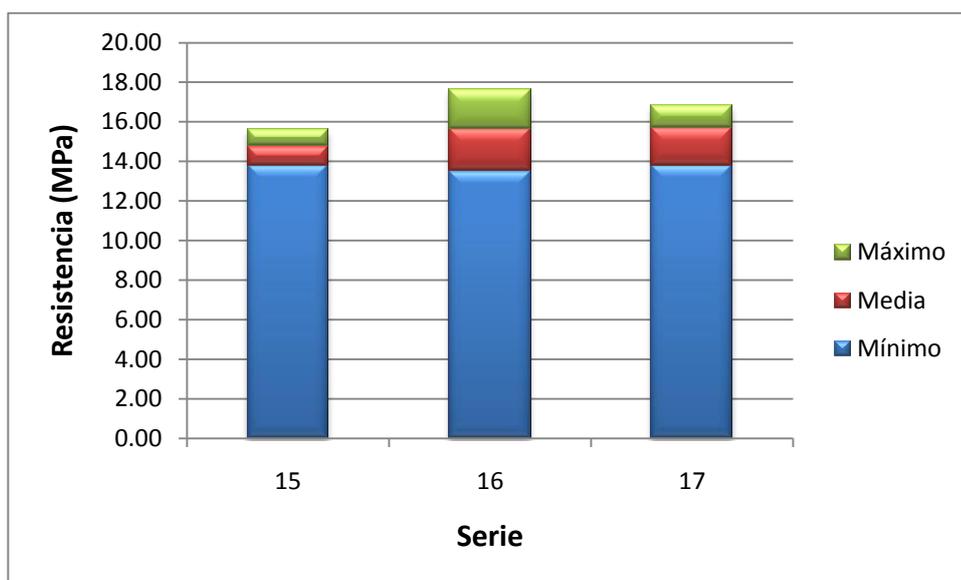


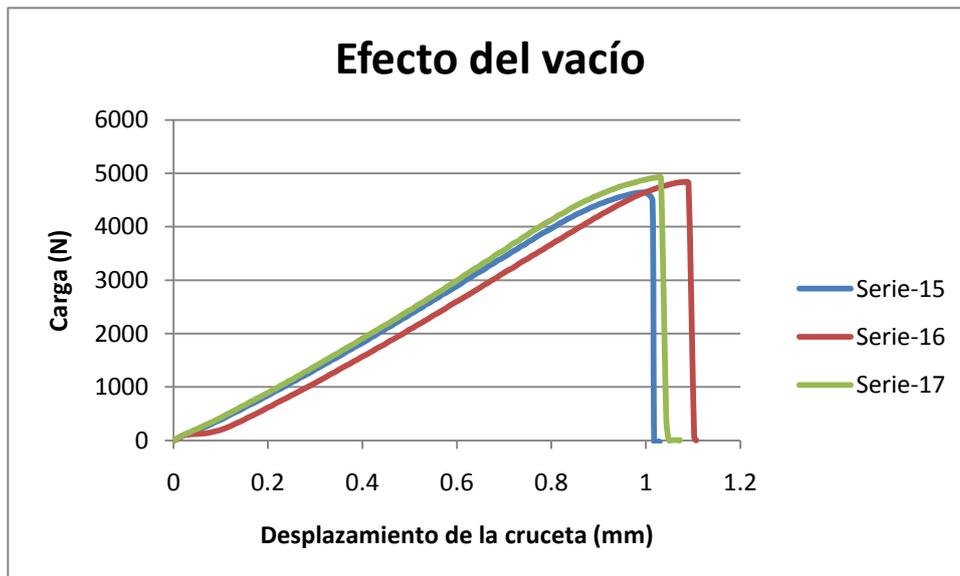
Figura 40. Resumen de los resultados con la dispersión incluida

Se procede a mostrar una tabla resumen con el tipo de rotura.

Referencia	Media
Serie-15	65.5
Serie-16	100
Serie-17	69

Tabla 25. Fallo cohesivo en cada serie en %

Se va a mostrar un la curva carga-desplazamiento de la probeta más representativa de cada serie.



Gráfica 28. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

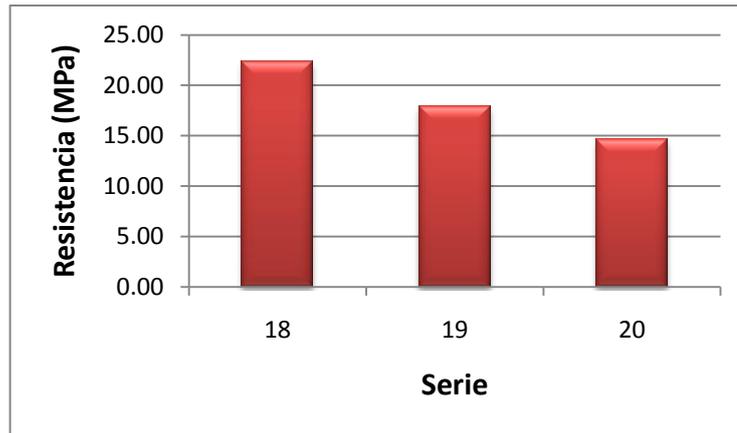
3.3.5. Efecto de la exposición al ambiente

Este estudio consistió en quitar el pelable al material y dejarlo expuesto a las condiciones del laboratorio, es decir, temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $50 \pm 10\%$ un número determinado de horas, pasadas estas horas se procede al encolado. Se llevaron a cabo tres series cuyos resultados se resumen a continuación.

Efecto tiempo sin pelable								
Referencia	Tiempo sin pelable (h)	Dimensiones		Propiedad	Máximo	Mínimo	Media	C.V. (%)
		Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-18	6	24.93	12.57	Resistencia (MPa)	24.07	20.37	22.36	5.85
Serie-19	12	25.02	12.43	Resistencia (MPa)	19.96	17.92	19.06	3.67
Serie-20	24	24.98	12.42	Resistencia (MPa)	16.78	13.45	14.59	7.08

Tabla 26. Resumen de resultados del efecto del tiempo sin pelable

En este caso se observa que a medida que aumente el tiempo del material sin protección antes de ser encolado la resistencia de la unión disminuye. A continuación procedemos a mostrar gráficamente el resumen de resultados.



Gráfica 29. Resumen de resultados

En este caso queda claro que cuanto mayor sea el tiempo sin pelable menor será la resistencia del material.

Podemos observar cómo, en este caso, la dispersión de los resultados no afecta la interpretación de los resultados.

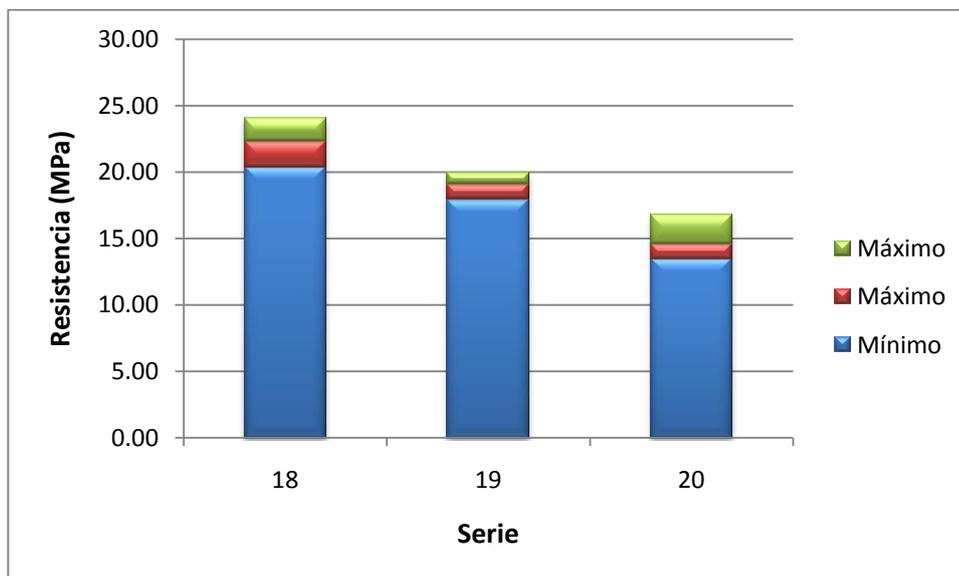


Figura 41. Resumen de resultados con la dispersión incluida

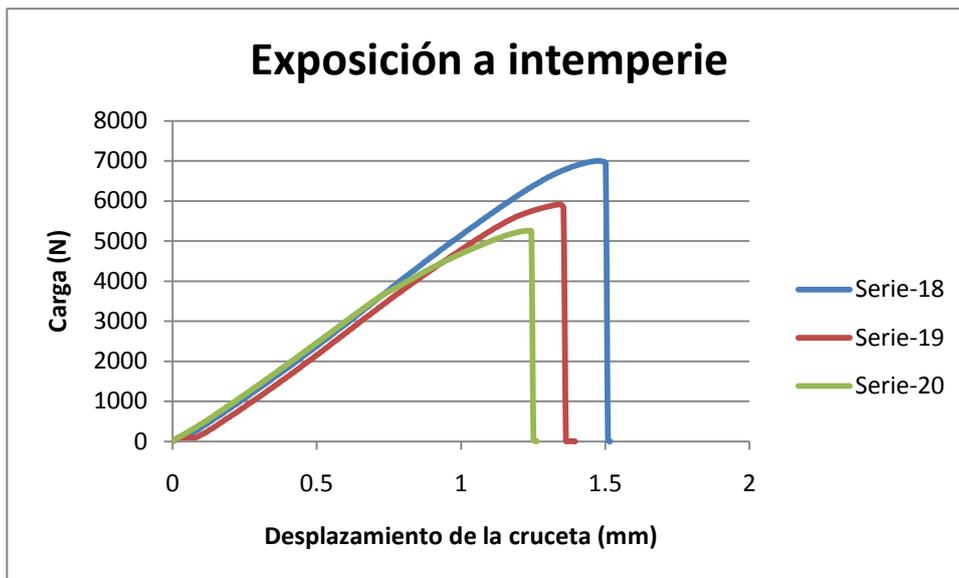
Procedemos a mostrar una tabla resumen con el tipo de rotura.

Referencia	Media
Serie-18	18.5
Serie-19	62.4
Serie-20	100

Tabla 27. Fallo cohesivo en cada serie en %

Contra todo pronóstico, cuanto mayor es el tiempo de exposición de la superficie de los adherentes a la intemperie, mayor es el fallo cohesivo de material.

Se va a mostrar un la curva carga-desplazamiento de la probeta más representativa de cada serie.



Gráfica 30. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

3.3.6. Influencia del tipo de pelable y del sistema de desmolde

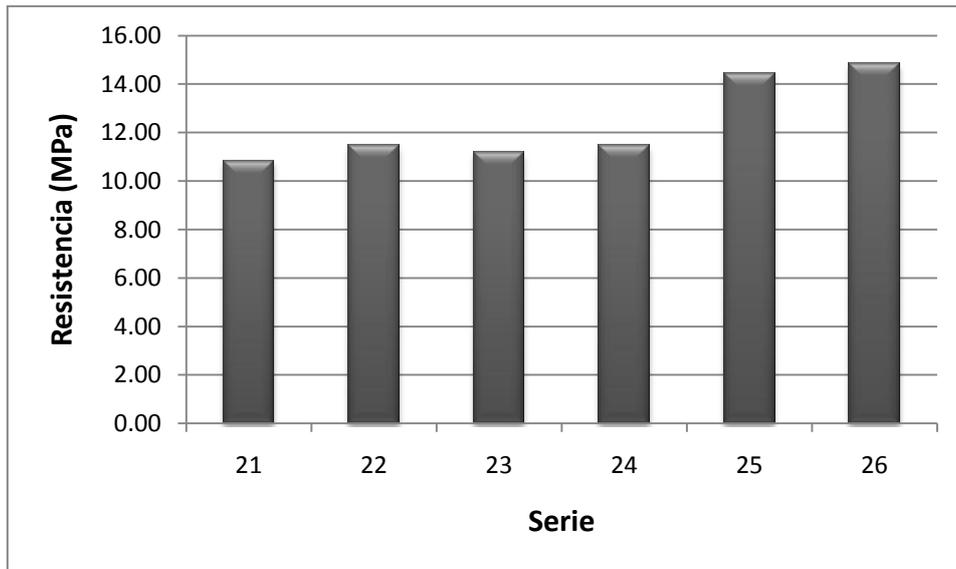
En el estudio de la influencia de tipo de pelable y tipo de sistema de desmolde vamos a ver qué tipo de agente de desmolde resulta de un mejor resultado y también veremos cuál de las seis combinaciones da un mejor resultado. Pasamos a ver la tabla resumen con los resultados de los ensayos.

Influencia del sistema de desmolde y del pelable									
Referencia	Combinación		Dimensiones		Propiedad	Máximo	Mínimo	Media	C.V. (%)
	Pelable	Sistema de desmolde	Ancho medio (mm)	Largo medio (mm)					
Serie-21	Hexcel	agua	24.91	12.38	Resistencia (MPa)	11.95	9.56	10.85	9.97
Serie-22	Hexcel	solvente	25.00	12.42	Resistencia (MPa)	12.70	10.35	11.46	8.57
Serie-23	Tygavac	agua	24.95	12.35	Resistencia (MPa)	12.22	10.35	11.18	6.17
Serie-24	Tygavac	solvente	25.00	12.38	Resistencia (MPa)	11.97	10.65	11.48	4.72
Serie-25	Gurit	agua	24.97	12.61	Resistencia (MPa)	15.67	13.93	14.43	4.49
Serie-26	Gurit	solvente	24.98	12.42	Resistencia (MPa)	15.22	14.04	14.85	2.93

Tabla 28. Resumen de resultados del conjunto de ensayos

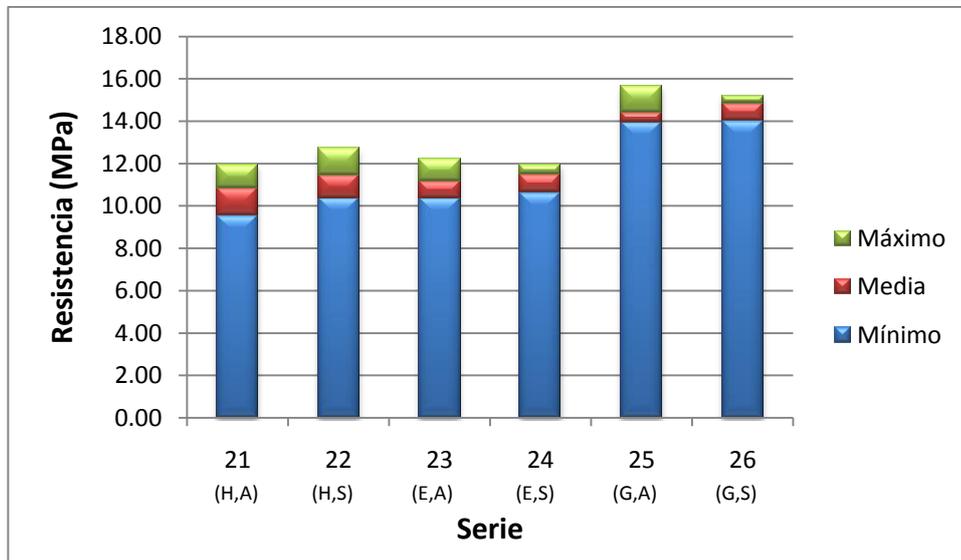
Como se puede observar en el conjunto de ensayos, el sistema de desmolde de base solvente da mejores resultados que el sistema de desmolde base agua, sea cual sea el tipo de pelable utilizado, si bien es verdad que la diferencia no es muy elevada y que, es probable que no valga la pena el usar un sistema basado en un disolvente que es más caro que un sistema basado en agua.

Pero sí existen diferencias más apreciables en función del tipo de pelable utilizado. Sobre todo entre el pelable denominado como Hexcel y el pelable denominado como Gurit, la diferencia entre la serie 21 y la serie 25 es de un 24.81 % y la diferencia entre la serie 25 y la serie 26 es de un 19.39 %. En las gráficas siguientes se verá con más claridad.



Gráfica 31. Comparativa de resultados

En la gráfica 31 se muestran los resultados con los valores máximos y mínimos.



Gráfica 32. Resumen de resultados con la dispersión incluida

Como se comentó anteriormente, queda con este gráfico patente que no hay diferencia entre los pelables Hexcel y Econostitch, pero sí con el Gurit.

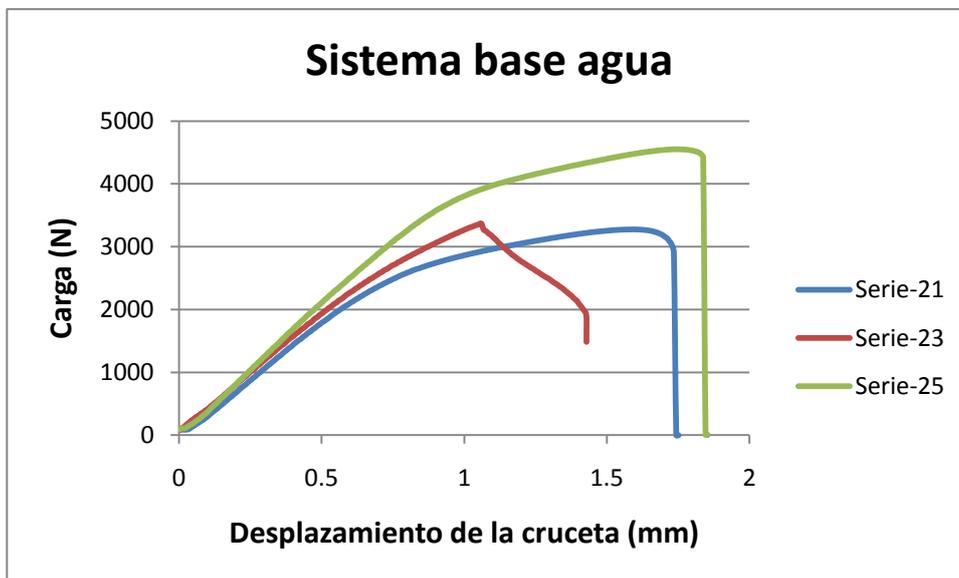
En la siguiente tabla se muestra el valor medio del porcentaje de rotura cohesiva de cada serie.

Referencia	Media
Serie-21	10.00
Serie-22	5.83
Serie-23	95.00
Serie-24	12.5
Serie-25	23.33
Serie-26	1.67

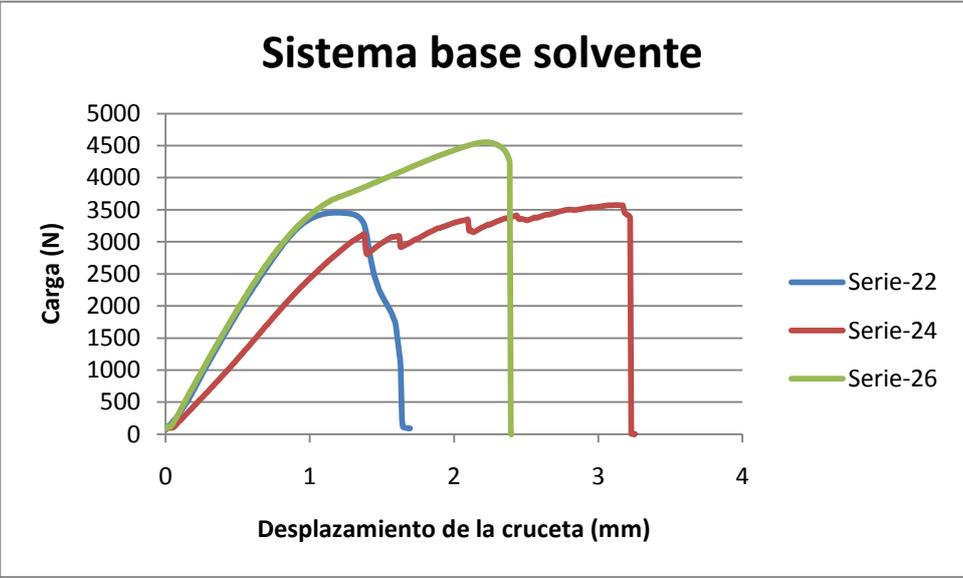
Tabla 29. Resumen del % de fallo cohesivo de la unión

En este caso, salvo la serie 23, todas las series tienen un tipo de rotura adhesiva.

Se va a mostrar un la curva carga-desplazamiento de la probeta más representativa de cada serie.



Gráfica 33. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas



Gráfica 34. Diagramas Carga-desplazamiento de las probetas más representativas

3.3.7. Comprobación del curado completo del adhesivo

A modo de comprobación de que con la eliminación de los extremos de cada curado se eliminó todo el material sujeto a efectos de borde y que todo el adhesivo ensayado ha curado correctamente dentro del horno, o en su caso, dentro de autoclave. En la mitad de las series ensayadas se han numerado las probetas no de manera aleatoria, sino que se han numerado siguiendo el orden de mecanizado, de esta forma sabemos en qué posición se encontraba el adhesivo de esa probeta cuando se estaba curando y sabremos si todo el adhesivo ha curado adecuadamente. En la figura mostramos un esquema del marcado de las probetas.

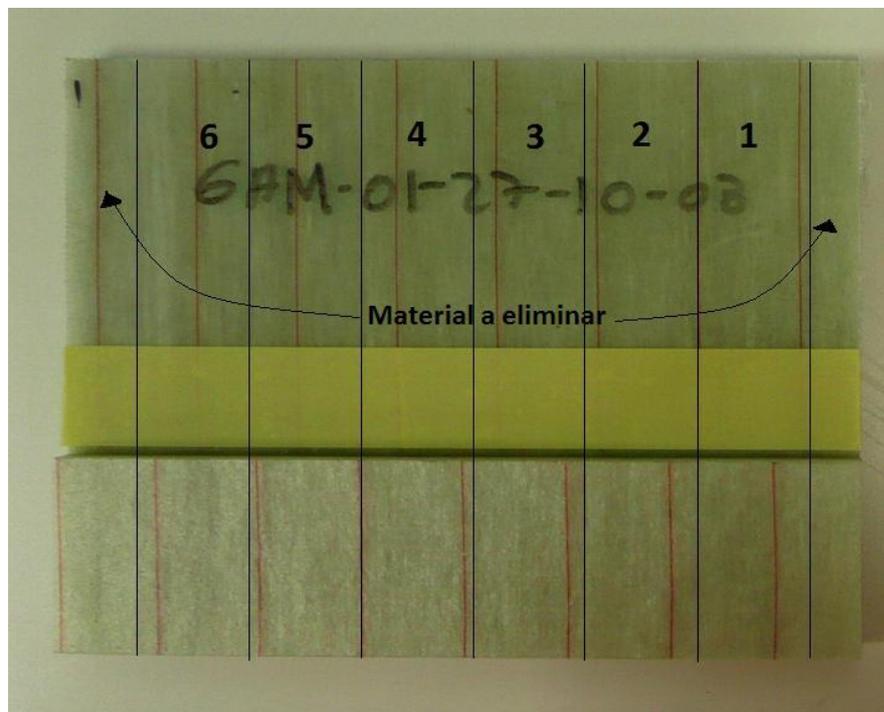


Figura 42. Esquema de la numeración de las probetas en función del orden de mecanizado

De esta manera, si en las probetas centrales no se encuentra una variación significativa de resistencia respecto a las probetas extremas, podremos estar seguros de que el curado del adhesivo ha sido homogéneo y que no va a haber lugares donde la polimerización se distinga.

Se muestran tablas resumen de series ensayadas con esta numeración.

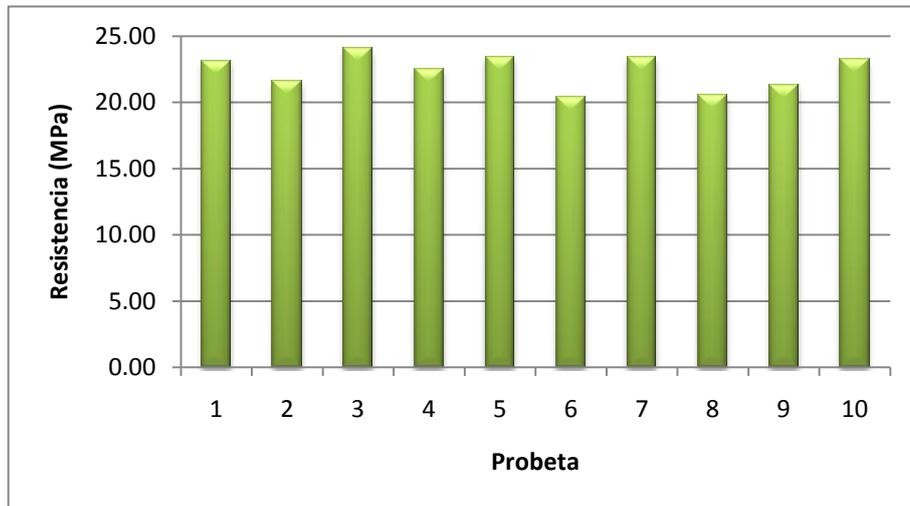
Serie	Probeta	Anchura (mm)	Longitud solape (mm)	Carga Última (N)	Resistencia (Mpa)	Tipo de Rotura (%)
18	Probeta 1	25.03	12.65	7327.46	23.14	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 2	25.00	12.59	6789.28	21.57	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 3	24.96	12.68	7617.47	24.07	Cohesivo: 60; Adhesivo: 40
	Probeta 4	24.75	12.56	7004.12	22.53	Cohesivo: 95; Adhesivo: 5
	Probeta 5	24.95	12.62	7375.74	23.42	Cohesivo: 30; Adhesivo: 70
	Probeta 6	24.92	12.70	6445.22	20.37	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 7	24.94	12.49	7284.73	23.39	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 8	25.00	12.33	6348.23	20.59	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 9	25.01	12.38	6586.22	21.27	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 10	24.75	12.70	7297.29	23.22	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Máximo	25.03	12.70	7617.47	24.07	
	Mínimo	24.75	12.33	6348.23	20.37	
	Valor medio	24.93	12.57	7007.58	22.36	
	DST	0.10	0.13	440.55	1.31	
	CV%	0.41	1.05	6.29	5.85	

Tabla 30. Resumen de la serie 18

Se puede observar como no hay diferencia significativa entre las probetas extraídas de la parte central y las probetas extraídas de la parte externa, así como no hay diferencia entre las probetas de un panel y las del otro panel. Por motivos constructivos, para cada serie era necesario hacer dos montajes, de cada montaje se sacaban 6 ó 7 probetas, esto nos da un total de 12, 13 ó 14 probetas de las que se ensayaban 10, las otras estaban de reserva por si ocurría cualquier accidente durante su manipulación en el montaje para el ensayo, como que se cayera al suelo, que por descuido no hubiera una buena alineación, que no se almacenasen los datos, etc.

Resulta curioso el hecho de que algunas probetas teniendo una rotura más adhesiva que otras de una resistencia mayor que las que tienen una rotura más cohesiva. Cuando lo que se desea es que la rotura sea cohesiva, antes que adhesiva, ya que esto indica que se ha agotado toda la capacidad portante del adhesivo. Que la rotura sea adhesiva indica que la unión se ha efectuado todo lo bien que se desearía y la interfase falla.

Se va a mostrar gráficamente, que resulta de más claridad, el resultado del ensayo de la serie 18.

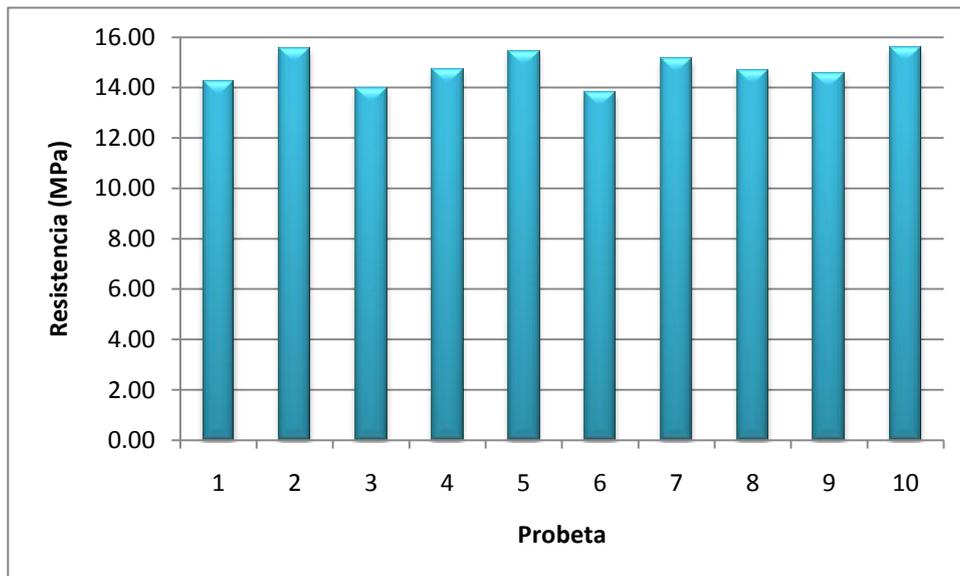


Gráfica 35. Conjunto completo de resultados de la serie-18

Se van a mostrar otras dos series más para demostrar que el curado se hizo adecuadamente en todas las series, si alguien quiere comprobar que en todas las series se hizo un buen curado no tiene más que consultar el anexo I, donde se recopilan todos los resultados de todas las probetas ensayadas.

Serie	Probeta	Anchura (mm)	Longitud solape (mm)	Carga Última (N)	Resistencia (Mpa)	Tipo de Rotura (%)
15	Probeta 1	25.05	12.48	4445.76	14.22	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Probeta 2	24.94	12.41	4814.64	15.56	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Probeta 3	25.04	12.36	4328.13	13.98	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 4	25.03	12.60	4641.77	14.72	Cohesivo: 25; Adhesivo: 75
	Probeta 5	25.05	12.53	4848.71	15.45	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Probeta 6	25.06	12.64	4373.73	13.81	Cohesivo: 0; Adhesivo: 100
	Probeta 7	25.01	12.32	4663.34	15.13	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Probeta 8	25.00	12.30	4514.70	14.68	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Probeta 9	24.99	12.69	4623.61	14.58	Cohesivo: 30; Adhesivo: 70
	Probeta 10	25.00	12.39	4835.08	15.61	Cohesivo: 100; Adhesivo: 0
	Máximo	25.06	12.69	4848.71	15.61	
	Mínimo	24.94	12.30	4328.13	13.81	
	Valor medio	25.02	12.47	4608.95	14.77	
	DST	0.04	0.14	189.99	0.65	
	CV%	0.15	1.11	4.12	4.40	

Tabla 31. Resumen de la serie 15



Gráfica 36. Conjunto completo de resultados de la serie-12