



Aplicación de la metodología de caracterización de adhesivos hiperelásticos en el diseño de uniones reales

Francisco J. Simón Portillo¹, Óscar Cuadrado Sempere², David Abellán López³, Miguel Sánchez-Lozano⁴

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía Universidad Miguel Hernández, f.simon@umh.es

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía Universidad Miguel Hernández, ocuadrado@umh.es

³Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía Universidad Miguel Hernández, dabellan@umh.es

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía Universidad Miguel Hernández, msanchez@umh.es

En la industria de carrocerías para vehículos industriales, se observa un creciente uso de paneles sándwich estructurales combinados con perfiles de aluminio (Al), ensamblados mediante uniones adhesivas continuas. Esta configuración permite aprovechar la capacidad resistente de todos los componentes de la estructura, permitiendo importantes reducciones de peso y la mejora de la resistencia y rigidez. En esta aplicación, el uso de adhesivos de alta flexibilidad aporta grandes ventajas, por su capacidad de sellado y para absorber posibles desalineamientos y deformaciones de la estructura sin que se vea comprometida su durabilidad.

En trabajos previos publicados por los autores, se desarrolló una metodología de caracterización mecánica de los adhesivos hiperelásticos, y la determinación de modelos de material que mejor representan su comportamiento. Se aborda ahora la aplicación de las leyes de comportamiento así obtenidas, para la modelización, análisis y diseño de uniones adhesivas reales.

Los perfiles de aluminio suelen diseñarse con secciones específicas para alojar los paneles estructurales, que se fijan a ellos generalmente mediante uniones de simple solape (SLJ). La actuación de cargas laterales sobre los paneles, provoca sobre estas uniones esfuerzos de tracción y flexión, que se traducen en solicitaciones combinadas de cizalladura y pelado sobre los cordones adhesivos.

Este trabajo incluye la modelización y análisis por elementos finitos de distintos tipos de uniones, utilizando los modelos hiperelásticos de material antes mencionados. Los resultados ofrecidos por los modelos ante estas solicitaciones combinadas, se han validado mediante la comparación con resultados experimentales de ensayos de uniones reales llevados a cabo a tal efecto. Los modelos de elementos finitos utilizados, posibilitan un análisis detallado de la distribución de esfuerzos en el adhesivo. Pero permiten además estudiar a un tiempo y tener en cuenta la deformación de los propios perfiles y paneles, y la influencia que pueda tener en los esfuerzos transmitidos al adhesivo y su resistencia. Constituyen así una herramienta de gran utilidad para establecer directrices de diseño que mejoren la eficiencia y durabilidad de las uniones.

1. Introducción

Las uniones adhesivas surgen como una tecnología revolucionaria en el campo de la ingeniería y de los materiales[1]–[3]. El interés generado en la comunidad científica y tecnológica ha impulsado la investigación y desarrollo de nuevos materiales y técnicas para mejorar la eficiencia y resistencia de las uniones. En los últimos años, el uso de materiales compuestos se ha generalizado en una amplia gama de aplicaciones, con un aumento especialmente marcado en las industrias aeroespacial y automovilística. Esto se debe a la excelente relación rigidez-peso y resistencia-peso de estos materiales. En particular, los adhesivos estructurales altamente flexibles se utilizan principalmente cuando se espera una expansión y contracción considerables en la unión, cuando se trata de unir materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica (diferentes metales, plásticos y composites, paneles de vidrio), o cuando se requiere una unión muy flexible por las características de la propia estructura. Los adhesivos hiperelásticos también ofrecen buenas propiedades de sellado cuando las tolerancias y las holguras son elevadas. También tienen otras ventajas, como la capacidad de resistir impactos y altos niveles de vibración, aspectos críticos en la industria del automóvil. Por último, una ventaja de seguridad de los adhesivos hiperelásticos frente a los adhesivos rígidos es que evitan el fallo repentino, ya que tienen una gran resistencia a la propagación del desgarro, lo que permite identificar y reparar las juntas dañadas antes de la rotura completa.

A medida que ha aumentado la demanda de materiales ligeros, resistentes y versátiles, como los materiales compuestos, las uniones adhesivas se han consolidado como una opción para superar las limitaciones de las técnicas de unión tradicionales. Sin embargo, el éxito de las uniones adhesivas está ligado a un correcto entendimiento de los principios que determinan su comportamiento, así como a la aplicación de técnicas de diseño y fabricación adecuadas [4]–[6].

Los adhesivos utilizados en esta investigación se comportan de forma similar al caucho y otros elastómeros, presentan un comportamiento elástico en el rango de grandes deformaciones, mostrando una relación no lineal entre carga y deformación, pero manteniendo su capacidad de recuperación total de la deformación cuando cesa el esfuerzo. Es por ello que se propone su modelización como material hiperelástico, que veremos en detalle en los siguientes apartados.

El presente trabajo, pretende contribuir al desarrollo y aplicación de las uniones adhesivas que soporten grandes deformaciones antes de experimentar el fallo, proporcionando conocimientos detallados sobre la selección y optimización de adhesivos, así como la mejora continua de los procesos de unión [7]. El objetivo de este trabajo es fomentar el avance tecnológico y la implementación generalizada de las tecnologías adhesivas, impulsando así el avance en el diseño y fabricación de productos más eficientes y duraderos. En primer lugar, se ha llevado a cabo la caracterización del adhesivo, ajustando el modelo mediante la metodología desarrollada previamente por los autores de este trabajo [8-9]. Una vez ajustado el modelo hiperelástico, debería ser posible utilizarlo para simular el comportamiento de diferentes configuraciones de juntas. Para validar el modelo de material seleccionado, se han modelizado computacionalmente uniones de simple solape (SLJ) con diferentes espesores de adhesivo, comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente mediante el ensayo de probetas con las mismas configuraciones.

En este contexto, este trabajo se motiva principalmente por dos razones fundamentales:

- La importancia de adquirir conocimientos sobre el comportamiento mecánico de los adhesivos altamente flexibles, junto con el desarrollo de un modelo numérico constitutivo, como base para su aplicación en el diseño de componentes industriales.
- El margen de mejora que existe para la optimización de las uniones tanto en prestaciones como en coste, dado que en muchas ocasiones están sobredimensionadas debido al escaso conocimiento del comportamiento del material.

2. Ajuste de modelos hiperelásticos Teroson MS 939

En previos trabajos de los autores, se ha desarrollado y validado un procedimiento de caracterización aplicando un tipo de adhesivo concreto, en base poliuretano [10]. Los resultados mostraron que el modelo de Mooney-Rivlin ofrecía la mejor predicción del comportamiento mecánico del adhesivo hiperelástico ante diversas configuraciones de unión [10,11].

Para generalizar la aplicabilidad de los resultados y conclusiones, se debe validar la metodología con una gama más amplia de adhesivos flexibles. Para ello, en este trabajo se va a llevar a cabo el ajuste de los modelos para el adhesivo Teroson MS 939. Las figuras 1 y 2 muestran la comparación entre los resultados experimentales para el ensayo uniaxial y planar respectivamente, junto con los diferentes modelos considerados. Tras un análisis visual de los gráficos, se observa que todos los modelos muestran similitud con los ensayos experimentales, lo que dificulta determinar cuál ofrece un mejor ajuste. Por lo tanto, se lleva a cabo una evaluación de las curvas utilizando

el índice CORA [12]. La tabla 1 proporciona esta evaluación, permitiendo una comparación cuantitativa entre los modelos. En el caso del ensayo de halterio, la evaluación mediante CORA indica que la mejor concordancia con los resultados experimentales se alcanza con el modelo Ogden N=2 (ratio=0,931), seguido por el Ogden N=1 (ratio=0,898), Neo-Hookean (ratio=0,893) y finalmente el modelo de Mooney-Rivlin (ratio=0,851). Se observa que los índices de los diferentes modelos se encuentran cercanos a 0,9. No obstante si se evalúa la concordancia entre las curvas de los diferentes modelos limitando el rango de deformación hasta una deformación de 2,3, los modelos hiperelásticos que mejor reproducen el ensayo son el modelo de Ogden N=2 (ratio=0,961) seguido del modelo de Mooney-Rivlin (ratio=0,956).

Para el ensayo planar, el modelo hiperelástico que mejor reproduce el ensayo es el de Ogden N=2 (ratio=0,959), seguido muy cerca por el modelo de Mooney-Rivlin (ratio=0,945). Si se limita el rango de deformación a 2,1, llega a igualarse el ratio de deformación para ambos modelos (ratio=0,976).

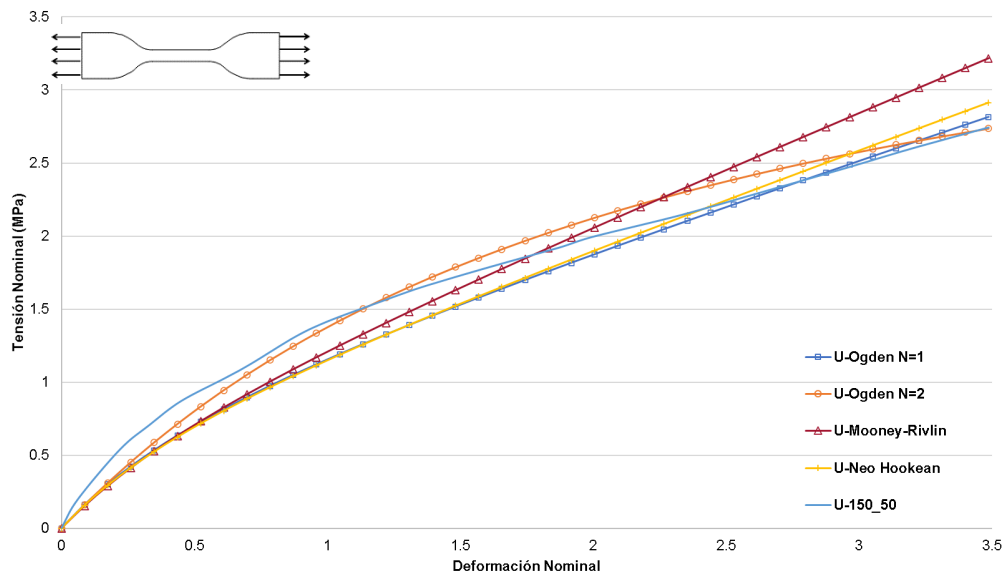


Figura 1: Comparación experimental-numérico para ensayo uniaxial con diferentes modelos hiperelásticos (Teroson MS 939).

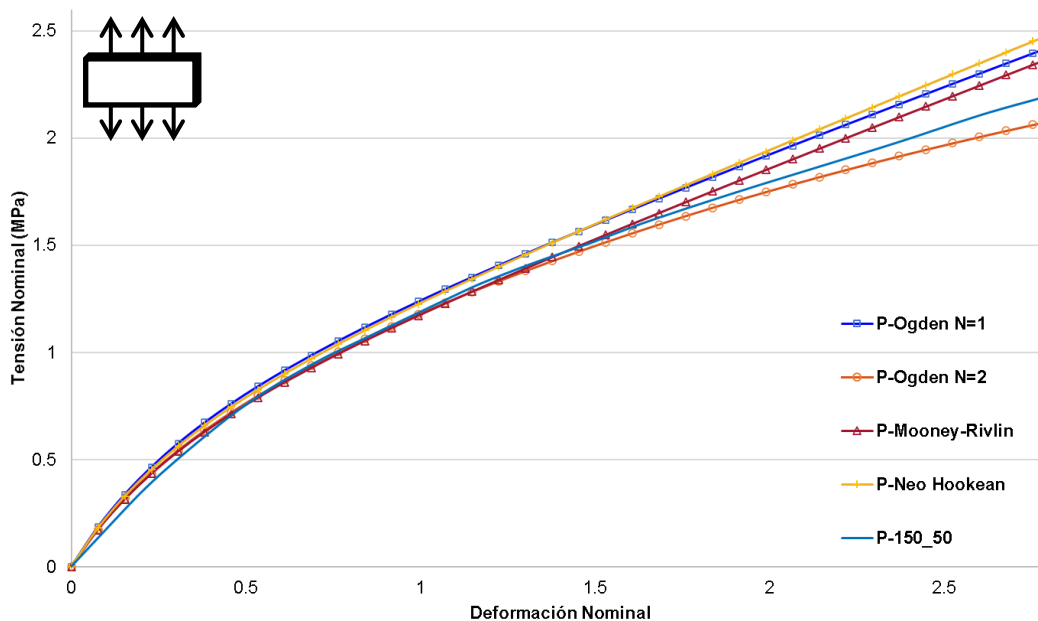


Figura 2: Comparación entre experimental-numérico para ensayo planar con diferentes modelos hiperelásticos (Teroson MS 939).

Tabla 1: Ratio entre los diferentes modelos con probeta planar 150x50x3 mm y halterio (Teroson MS 939).

N	R-Planar	R-planar-2.1	R-Uniaxial	R -Uniaxial-2.3
Ogden N=1	0,888		0,898	0,951
Ogden N=2	0,959	0,976	0,931	0,961
Mooney-Rivlin	0,945	0,976	0,851	0,956
Neo Hookean	0,879		0,893	0,951

No obstante, con los resultados obtenidos no es posible llegar a una conclusión definitiva sobre cuál de los modelos es el más apropiado. Por lo tanto, con el fin de determinar cuál de los 4 modelos estudiados es el más apropiado, se lleva a cabo una primera simulación de la probeta SLJ con espesor de adhesivo 3 mm. En las tablas 2, 3, 4 y 5 se presentan las constantes ajustadas para los modelos de Ogden N=1, Mooney-Rivlin, Ogden N=2 y Neo-Hookean, respectivamente.

Tabla 2: Constantes ajustadas para Ogden N=1.

N	μ	α	D ₁
1	0,673128153	1,94164846	0

Tabla 3: Constantes ajustadas para Mooney-Rivlin.

N	C ₁₀	C ₀₁	D ₁
1	0,376333002	-0,06255592790	0

Tabla 4: Constantes ajustadas para Ogden N=2.

N	μ	α	D ₁
1	16,1278246	0,573833109	0
2	-15,4969717	0,407510345	0

Tabla 5: Constantes ajustadas para Neo-Hookean.

N	C ₁₀	C ₀₁	D ₁
1	0,328140417	0	0

En la figura 3 se muestran los resultados de la comparación entre las simulaciones llevadas a cabo utilizando los 4 modelos y los datos obtenidos del ensayo correspondiente a la unión SLJ, fabricadas con 3 mm de espesor de adhesivo. Se puede apreciar que la simulación con las constantes ajustadas para el modelo de Ogden N=2 presenta una correlación aceptable con los resultados experimentales hasta deformaciones de 5,5 mm. Por otro lado, al comparar la simulación de Mooney-Rivlin, se observa que la curva obtenida presenta una correlación precisa con los datos experimentales hasta alcanzar deformaciones de 7,5 mm, momento en el cual comienza a manifestarse el daño en la unión. A partir de ratios Cora para los distintos modelos mostrados en la tabla 6, podemos confirmar que la caracterización más precisa del material se consigue con el modelo de Mooney-Rivlin, aunque Ogden N=2 puede ser válido sobre todo para rangos de bajas deformaciones. Por otro lado, los modelos de Ogden N=1 y Neo-Hookeano son los que presentan una mayor discrepancia respecto a las curvas experimentales, sobreestimando la rigidez.

Tabla 6: Ratio entre resultado experimental y computacionales para SLJ-3 mm (Teroson MS 939).

Modelo	Ratio
Ogden N=1	0,933
Ogden N=2	0,993
Mooney-Rivlin	0,998
Neo-Hookean	0,966

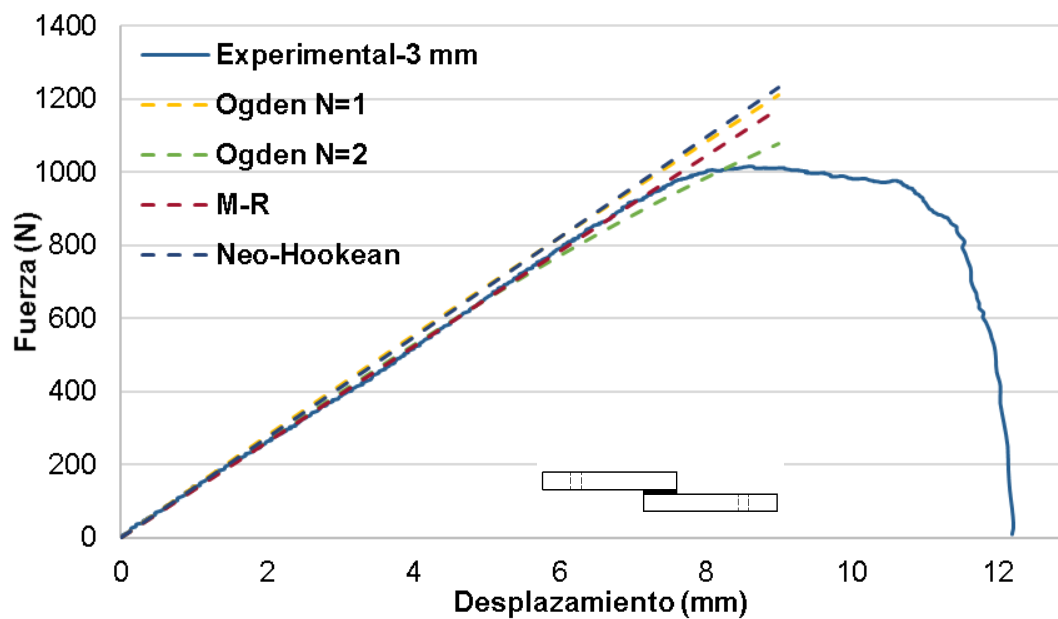


Figura 3. Resultado experimental y computacionales para SLJ-3 mm. Comparación entre los diferentes modelos (Teroson MS 939).

3. Validación SLJ-DCB

Se valida el modelo de Mooney-Rivlin ajustado mediante la simulación de ensayos de probetas SLJ, ver figura 4.a) con diferentes espesores de adhesivo, así como con la probeta DCB, ver figura 4.b).

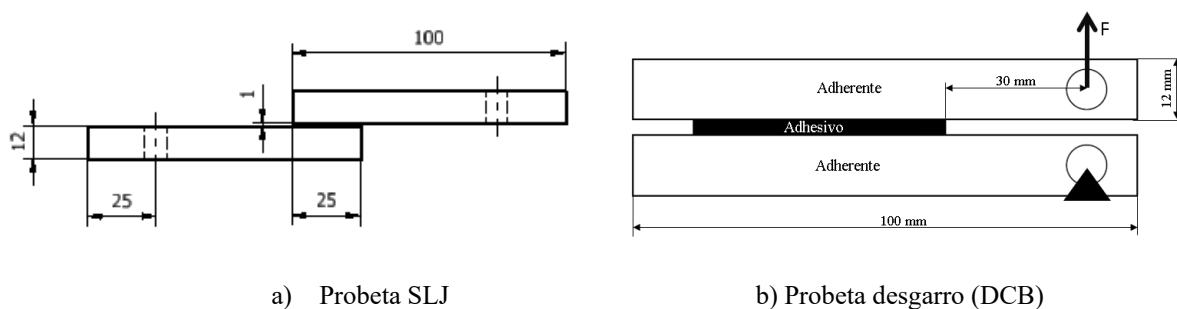


Figura 4: Geometría de probeta (dimensiones en mm).

En la figura 5 se muestran los resultados de las diferentes simulaciones en comparación con el resultado del ensayo SLJ de espesores de adhesivo 2, 4 y 5 mm. Los resultados obtenidos de la simulación muestran una correlación aceptable con los resultados experimentales para los tres casos de probetas.

Al analizar más en detalle cada configuración, se puede observar que la pendiente de las curvas experimentales y numéricas son muy similares en cada una de ellas.

Con el fin de cuantificar las diferencias entre las curvas experimentales y numéricas, se ha calculado el error relativo para cada espesor de adhesivo. Los resultados que se muestran en la tabla 7, siendo el mayor de ellos 2,5% para 5 mm de espesor de adhesivo.

Tabla 7: Error relativo entre simulación y experimental (SLJ).

SLJ	Error relativo
2mm	0,38 %
4 mm	0,31%
5 mm	2,5 %

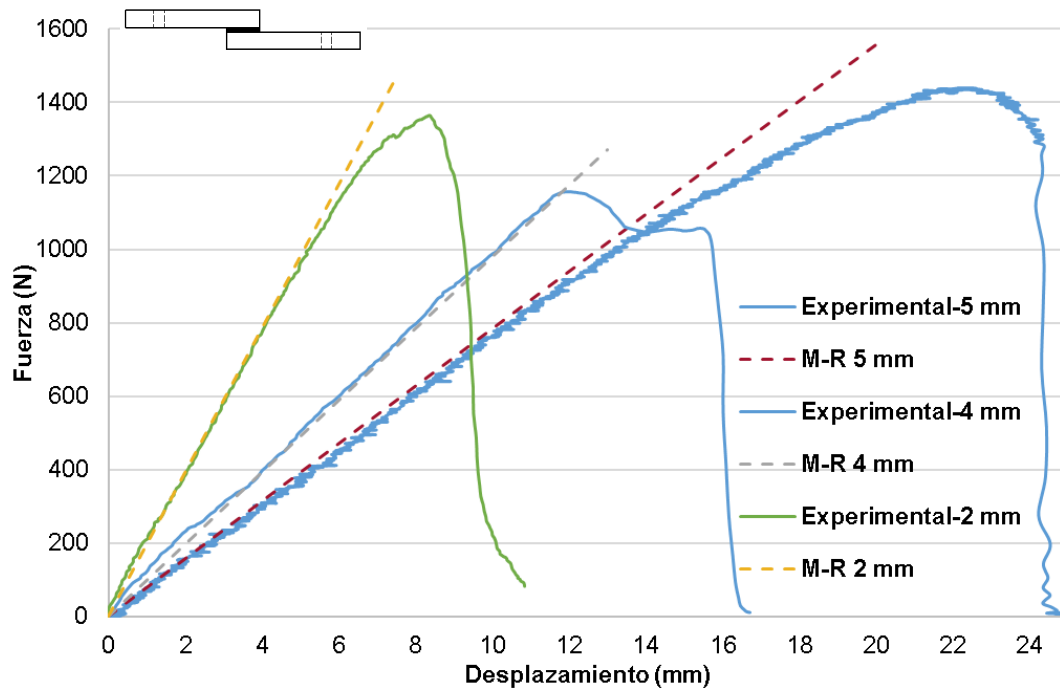


Figura 5: Resultados experimentales y computacionales para SLJ-2-4-5 mm (Teroson MS 939).

En la figura 6 se muestran los resultados de la simulación en comparación con el resultado del ensayo DCB, de espesor de adhesivo 4 mm. Los resultados obtenidos de la simulación muestran una correlación aceptable con los resultados experimentales, hasta momentos previos a la rotura del adhesivo.

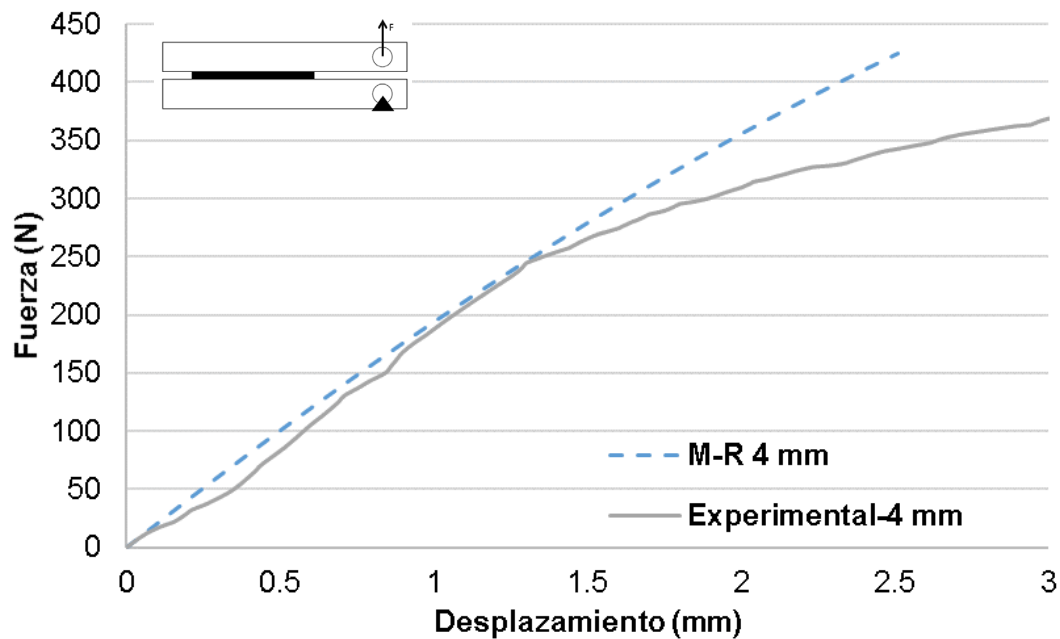


Figura 6. Resultado experimental y computacional para DCB-4 mm (Teroson MS 939).

La validación de los modelos mediante ensayos SLJ y DCB ha confirmado la capacidad del modelo antes de alcanzar un punto crítico de rotura. Estos resultados respaldan la elección del modelo de Mooney-Rivlin como el más adecuado para la caracterización del adhesivo Teroson MS 939 ante condiciones estándar.

4. Aplicación del modelo ajustado al análisis y optimización de uniones reales

Este capítulo, se aplican los modelos del material caracterizados utilizando el procedimiento descrito en el capítulo anterior, al estudio de uniones reales similares a las empleadas en carrocerías de vehículos industriales.

En la práctica las uniones suelen someterse a una combinación de diferentes esfuerzos, muchas veces debido a la propia deformación del sustrato. Por lo tanto, en este capítulo se va a realizar el estudio del comportamiento de una probeta SLJ fabricada con pletinas de pequeño espesor, cuya deformación dará lugar a la aparición de esfuerzos de pelado combinados con cizalladura. La comparación de los resultados del modelo y los experimentales para este tipo de probetas, permitirá validar el buen comportamiento del modelo de material caracterizado frente la actuación de esfuerzos combinados.

El adhesivo empleado en este estudio es el Teroson MS 939. Las probetas consisten de dos sustratos de Al de 120 mm de longitud por 25 mm de ancho por 2 mm espesor, con longitud de solape de 25 mm y espesores de adhesivo 2 y 3 mm, tal y como se muestra en la figura 7.

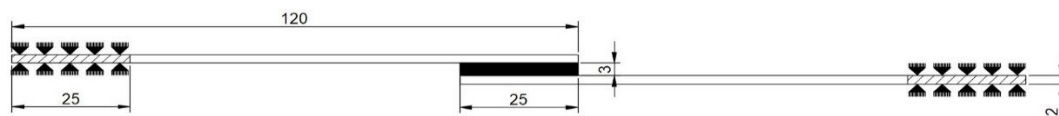


Figura 7. Geometría probeta SLJ-Al (dimensiones en mm).

Empleando una metodología similar a la utilizada para modelar las probetas SLJ de este trabajo, se ha desarrollado un modelo 3D de elementos finitos para validar ambas configuraciones de probetas. Utilizando el modelo de Mooney-Rivlin con las leyes de material ajustadas en el capítulo 2 para el adhesivo, se analiza la respuesta fuerza-desplazamiento hasta alcanzar un rango de desplazamiento de 7 mm tanto para la probeta modelada con 2 mm como para la de 3 mm de espesor de adhesivo.

En la figura 8 se presentan las curvas de fuerza-desplazamiento correspondientes a los ensayos SLJ para espesores de adhesivo 2-3 mm. Se puede apreciar que a medida que se reduce el espesor del adhesivo, la pendiente aumenta, lo que indica que la rigidez de la unión incrementa. Sin embargo, se puede apreciar una carga de rotura similar para ambos casos. En la misma figura se muestran los resultados de las simulaciones en comparación con el resultado del ensayo SLJ de ambos espesores de adhesivo. Los resultados obtenidos de la simulación muestran una correlación aceptable con los resultados experimentales en la zona lineal para ambos casos. Cabe destacar que para la probeta de 2 mm de espesor de adhesivo la correlación es más precisa.

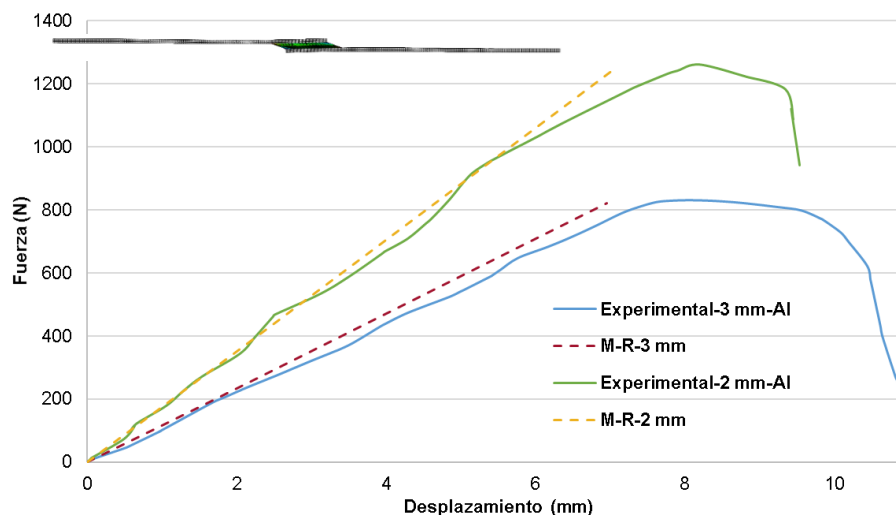


Figura 8. Resultados experimentales y computacionales para SLJ-2-3 mm (Al).

En la figura 9 podemos apreciar la desalineación en los adherentes, provocando esfuerzos de pelado en el adhesivo.

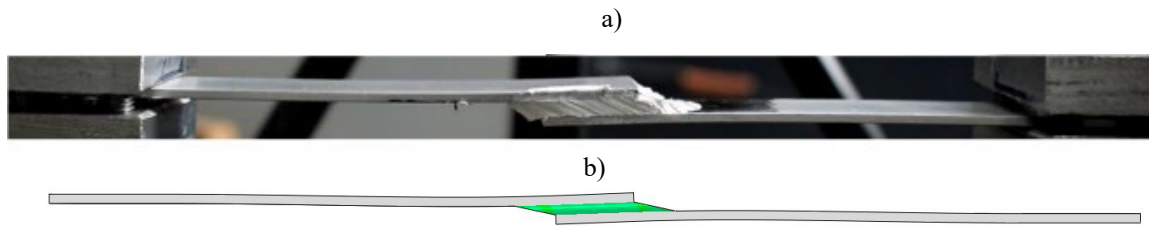


Figura 9. a) Ensayos SLJ-AI-2 mm; b) Simulación FEA.

5. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo inicial de esta línea de investigación es proponer métodos y herramientas para el estudio y la optimización de uniones adhesivas altamente flexibles. Para ello, en trabajos previos del grupo se ha desarrollado un procedimiento para la caracterización mecánica de los adhesivos hiperelásticos, que permite el ajuste de modelos hiperelásticos a partir dos ensayos simples de material (uniaxial-planar), más un ensayo de probeta SLJ para confirmar la selección final del modelo. En este trabajo, se ha demostrado la validez del procedimiento de caracterización desarrollado, con el adhesivo Teroson MS 939, en base silanos modificados.

La validación del modelo mediante ensayos SLJ y DCB ha confirmado la capacidad del modelo antes de alcanzar un punto crítico de rotura. Estos resultados respaldan la elección del modelo de Mooney-Rivlin como el más adecuado para la caracterización de adhesivos altamente flexibles ante condiciones estándar. Además, la validez del modelo se ha demostrado mediante ejemplos de aplicación a uniones adhesivas con configuraciones y modos de trabajo habituales en vehículos industriales. No obstante, el análisis de uniones de doble solape, empleadas habitualmente en la fabricación de vehículos industriales, queda pendiente de estudio.

Tras los avances logrados en esta línea, se abren nuevas líneas de trabajo por nuestro grupo de investigación. El uso sostenible de los recursos a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto se ha convertido en un reto clave para la industria europea. Este reto ha llevado a impulsar nuevos materiales y tecnologías de unión que apoyen modelos de economía circular, especialmente en sectores como el transporte, donde la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental son preocupaciones fundamentales.

En este contexto, el proyecto RECYBOND se centra en el desarrollo de adhesivos de alta elasticidad reforzados con nanocelulosa, y de imprimaciones separables que faciliten la reparación y el reciclado en aplicaciones estructurales en vehículos. El trabajo se desarrollará durante 3 años en coordinación con INESCOP, y establecerá directrices de diseño para soluciones adhesivas sostenibles en la fabricación de vehículos más ligeros, contribuyendo a un futuro de tecnologías de pegado más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. El proyecto RECYBOND ha recibido recientemente financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en la convocatoria 2023 de Proyectos de Generación de Conocimiento (PID2023-147882OB-C22).

6. Referencias

- [1] P. et al. Borges, C.S.P., Akhavan-Safar, A., Tsokanas, “From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view,” *Mech. Eng.*, vol. 2, no. 8, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s44245-023-00014-7>.
- [2] J. Liu, T. Kan, J. Lou, L. Xiang, X. Zhu, and Y. Tang, “Localized damage response of carbon fiber reinforced polymer composite sandwich panel after thermal exposure,” *Polym. Test.*, vol. 50, 2015, doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.12.006.
- [3] S. Khalili, S. M. R. Khalili, R. E. Farsani, and P. Mahajan, “Flexural properties of sandwich composite panels with glass laminate aluminum reinforced epoxy facesheets strengthened by SMA wires,” *Polym. Test.*, vol. 89, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106641.
- [4] D. J. Hu, D. Bin Luo, D. H. Xia, and D. P. Zou, “Advances in Adhesively Bonded Joints: Testing, Analysis, Design and Application,” *Materials (Basel)*, 2024, Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/6602RYSY98
- [5] D. A. Dillard, “Advances in structural adhesive bonding,” p. 638, 2010.
- [6] H. Chen, D. Wang, J. Na, and X. Chen, “Effect of sealing treatment on mechanical properties of CFRP-Aluminum alloy single lap joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 119, p. 103236, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.IJADHADH.2022.103236.
- [7] D. C. Moreira and L. C. Nunes, “Experimental analysis of bonded single lap joint with flexible adhesive,” *Appl. Adhes. Sci.*, 2014, doi: 10.1186/2196-4351-2-1.
- [8] R. A. Dickie and S. M. Ward, “Durability of automotive adhesive bonds: Test methods and failure mechanisms,” in *First International Congress on Adhesion Science and Technology Invited Papers: Festschrift in Honor of Dr. K.L. Mittal on the Occasion of his 50th Birthday*, CRC Press, 2023, pp. 641–653. doi: 10.1201/9780429087486-39.
- [9] A. Tiwary, R. Kumar, and J. S. Chohan, “A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications,” *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 865–870, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.06.276.
- [10] F. J. Simón-Portillo, D. Abellán-López, F. Arán, L. F. M. Da Silva, and M. Sánchez-Lozano. “Methodology for the mechanical characterisation of hyperelastic adhesives. Experimental validation on joints of different thicknesses,” *Polymer Testing*, vol. 129, p. 108286, 2023, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2023.108286
- [11] M. Mooney, “A theory of large elastic deformation,” *J. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 9, pp. 582–592, 1940, doi: 10.1063/1.1712836.
- [12] C. Gehre, H. Gades, and P. Wernicke, “Objective rating of signals using test and simulation responses,” in *Proceedings of 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)*, 2009, pp. 15–18.