



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2020/2021

*Estudio Experimental y Numérico para Caracterizar
la Fractura de una Unión Adhesiva Aplicada a la
Industria Naval*

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

Romel Tomas Fragoso Tarasco

TUTORA:

Dra. Ana Álvarez García

FECHA

Septiembre 2021

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría demostrar mi más sincero agradecimiento a la doctora Ana Álvarez García por todos los conocimientos aportados en sus clases y su apoyo en la elaboración del proyecto. También quiero agradecer a mis padres el apoyo brindado durante toda mi fase universitaria y por sus ánimos para seguir luchando.

Gracias de corazón a todas aquellas personas, amigos y compañeros de clase que me han aportado crecimiento en el ámbito profesional y personal.

RESUMEN

La industria 4.0 o cuarta revolución industrial necesita contar con novedosos enfoques que permitan alcanzar nuevos hitos industriales. En este estudio se vislumbra un horizonte en el que las uniones adhesivas metal-metal en el buque, sean una realidad. Por ello, en este trabajo se ha caracterizado la fractura de una unión adhesiva mediante los ensayos experimentales *Tapered Double Cantilever Beam* y *Single Leg Bending*. Además, a los resultados obtenidos de carga-desplazamiento en la fase experimental, se les han aplicado varios modelos matemáticos (CBBM, SBT y CBT) para calcular las energías críticas de fractura en tracción y cizalla. Estas energías se han utilizado para validar los ensayos experimentales incorporándolas en un modelo de simulación cohesivo mediante una ley de tracción-separación. Los resultados revelan que se ha conseguido un buen modelo de simulación numérica que puede ser utilizado en el diseño de la unión de cualquier elemento en el buque.

RESUMO

A industria 4.0 ou cuarta revolución industrial necesita contar con novos enfoques que permitan alcanzar novos fitos industriais. Neste estudo albíscase un horizonte no que as unións adhesivas metal-metal no buque, sexan unha realidade. Por iso neste traballo caracterizouse a fractura dunha unión adhesiva mediante os ensaios experimentais *Tapered Double Cantilever Beam* e *Single Leg Bending*. Ademais, aos resultados obtidos de carga-desprazamento na fase experimental, aplicáronselles varios modelos matemáticos (CBBM, SBT e CBT) para calcular as enerxías críticas de fractura en tracción e cizalla. Estas enerxías utilizáronse para validar os ensaios experimentais incorporándoas nun modelo de simulación cohesivo mediante unha lei de tracción-separación. Os resultados revelan que se conseguiu un bo modelo de simulación numérica que pode ser utilizado no deseño da unión de calquera elemento no buque.

ABSTRACT

Industry 4.0 or the fourth industrial revolution needs novel approaches to achieve new industrial milestones. This study envisions a horizon in which metal-to-metal adhesive bonds on the ship become a reality. Therefore, in this work, the fracture of an adhesive bond has been characterized by means of the Tapered Double Cantilever Beam and Single Leg Bending experimental tests. In addition, several mathematical models (CBBM, SBT and CBT) have been applied to the load-displacement results obtained in the experimental phase to calculate the critical fracture energies in tension and shear. These energies have been used to validate the experimental tests by incorporating them into a cohesive simulation model using a traction-separation law. The results reveal that a good numerical simulation model has been achieved that can be used in the design of the joint of any element in the vessel.



ÍNDICE

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Lista de Figuras.....	6
Lista de Tablas	8
Lista de Acrónimos	9
1. Introducción.....	10
1.1 Historia.....	10
1.2 Motivación y Objetivo.....	11
1.3 Características de los Adhesivos	12
1.4 Tipos de Adhesivos	14
1.5 Ventajas y Desventajas de los Adhesivos	15
2. Caracterización de los Adhesivos.....	18
2.1 Ensayo Bulk y TAST	22
2.2 Ensayos Modo I.....	23
2.2.1 Esquema DCB	24
2.2.2 Esquema TDCB.....	28
2.3 Ensayo Modo II.....	33
2.4 Modelo CBBM.....	35
2.5 Modo Mixto (I-II).....	37
2.6 Aplicación de la Integral J.....	39
2.7 Análisis con Elementos Finitos	40
2.2.1 Pasos a Seguir para el FEA	40
2.2.2 Aplicación para el Análisis de Uniones Adhesivas.....	41
3. Estudio Experimental	43
3.1 Selección del Adhesivo	43
3.2 Aplicación del Adhesivo Sobre los Sustratos.....	44
3.2.1 Despegado	47
3.3 Pruebas Realizadas.....	48
3.3.1 Ensayos G_I y G_{II}	49
3.3.2 Ensayo TDCB	50
3.3.3 Ensayo ENF.....	54



3.3.4	Ensayo SLB.....	55
4.	Estudio Numérico.....	61
4.2	Ensayo del TDCB.....	62
4.2.1	Análisis Estático.....	65
4.2.2	Análisis Dinámico.....	68
4.2.3	Discusión de los Resultados.....	68
4.3	Ensayo SLB.....	70
4.3.1	Análisis Estático.....	72
4.3.2	Análisis Dinámico.....	74
4.3.3	Discusión de los Resultados.....	74
5.	Conclusiones.....	77
6.	Trabajos Futuros.....	79
7.	Referencias Bibliográficas.....	80



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de dos sustratos adheridos.....	13
Figura 2. Representación molecular de la adhesión y cohesión.....	13
Figura 3. Ensayo del modo I y II.....	18
Figura 4. Ley cohesiva triangular y trapezoidal para los modos puros I y II y mixto.....	20
Figura 5. Probeta del ensayo <i>Bulk</i>	22
Figura 6. Muestra del ensayo TAST	23
Figura 7. Probeta de un ensayo DCB.....	24
Figura 8. Carga-deformación de un adhesivo con ensayo DCB o TDCB.....	27
Figura 9. Características de un ensayo TDCB.	28
Figura 10. Referencia de Dimensiones para un Brazo de la Viga TDCB.....	30
Figura 11. Comportamiento de C para esquema TDCB.	31
Figura 12. Características de un ensayo ENF.	34
Figura 13. Limpieza de los sustratos.....	44
Figura 14. Marcas en los sustratos.	45
Figura 15. Activador y cartucho del adhesivo.	45
Figura 16. Pistola.	46
Figura 17. Adhesivo aplicado.	46
Figura 18. Secado del adhesivo.....	47
Figura 19. Estado de la superficie del ensayo del TDCB.....	47
Figura 20. Estado de la superficie del ensayo SLB.....	48
Figura 21. Dimensiones de la probeta TDCB.....	50
Figura 22. Ensayo TDCB antes de aplicar la carga.	50
Figura 23. Ensayo TDCB después de aplicar la carga.	51
Figura 24. Ensayos TDCB	52
Figura 25. R-Curves empleando el método CBT.....	53
Figura 26. R-Curves empleando el método SBT.	53
Figura 27. R-Curves empleando el método CBBM.....	53
Figura 28. Resumen R-Curves.....	54
Figura 29. Ensayo ENF antes de aplicar la carga.....	55
Figura 30. Ensayo SLB.....	55
Figura 31. Ensayo SLB en Laboratorio.....	56



Figura 32. Tensión-deformación del ensayo SLB.....	57
Figura 33. R-Curves para el modelo SLB-G _I	58
Figura 34. R-Curves para el modelo SLB-G _{II}	58
Figura 35. R-Curves para el modelo SLB-G _T	59
Figura 36. Modelo de la probeta TDCB (2D).....	62
Figura 37. Modelo de la probeta TDCB I (3D).....	62
Figura 38. Modelo de la probeta TDCB II (3D).....	62
Figura 39. Mallado del ensayo TDCB.....	64
Figura 40. Condición de contorno y carga aplicada (TDCB).....	65
Figura 41. Deformación obtenida del ensayo TDCB.....	66
Figura 42. Distribución de las reacciones generadas en el adhesivo.....	67
Figura 43. Ensayo numérico del esquema TDCB estático-I.....	67
Figura 44. Ensayo numérico del esquema TDCB (P- δ) dinámico.....	68
Figura 45. CZM trapezoidal de los 5 ensayos TDCB.....	69
Figura 46. Modelo de la probeta SLB I (3D).....	70
Figura 47. Modelo de la probeta SLB II (3D).....	70
Figura 48. Modelo de la probeta SLB (2D).....	70
Figura 49. Mallado del ensayo SLB.....	71
Figura 50. Condición de contorno y desplazamientos impuestos (SLB).....	72
Figura 51. Deformación obtenida del ensayo SLB.....	72
Figura 52. Ensayo numérico del esquema SLB estático.....	73
Figura 53. Ensayo numérico del esquema SLB dinámico.....	74
Figura 54. Ley CZM modelo mixto modo I.....	75
Figura 55. Ley CZM modelo mixto modo II.....	75



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa general entre uniones disponibles.....	17
Tabla 2. Propiedades del adhesivo SikaFast 5211 NT.....	43
Tabla 3. Resultados proporcionados por el fabricante.	48
Tabla 4. Valor de G_I	54
Tabla 5. Valor para G_I y G_{II} del Modo Mixto.	59
Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero.....	63
Tabla 7. Propiedades mecánicas del adhesivo para el ensayo TDCB.....	63
Tabla 8. Propiedades mecánicas del adhesivo SikaFast 5211-NT.	64
Tabla 9. Comparativa de resultados entre los métodos empleados (N/mm).	69
Tabla 10. Propiedades mecánicas del adhesivo para el ensayo SLB.	70
Tabla 11. Porcentaje de error obtenido del modelo mixto (N/mm).	75



LISTA DE ACRÓNIMOS

FEA	Análisis de Elementos Finitos
PAR	Adhesivos Reactivos de Poliuretano
MMA	Adhesivos de Metacrilato de Metilo
TAST	Thick Adherend Shear Test
TDCB	Tapered Double Cantilever Beam
ENF	End Notched Flexure
SERR	Strain Energy Release Rate
CZM	Cohesive Zone Model
DCB	Double Cantilever Beam
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
SBT	Simple Beam Theory
CBT	Corrected beam Theory
CBBM	Compliance Based Beam Method
ECM	Método de Cumplimiento Experimental
LEFM	Linear Elastic Fracture Mechanics
ELS	End Loaded Split
4ENF	Four-Point End Notched Flexure
JIS	Normas Industriales Japonesas
AECMA	Asociación de Empresas de Consultoría Medioambiental de Andalucía
FPZ	Fracture Process Zone
SLB	Single Leg Bending
ATDCB	Tapered Double Cantilever Beam
ADCB	Asymmetric Double Cantilever Beam
CLS	Crack Lap Shear
MMB	Mixed-Mode Bending
ATDCB	Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam
ABS	American Bureau Society
CCM	Compliance Calibration Method



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Historia

La utilización de adhesivos para unir objetos nace en la prehistoria, siendo empleado en diferentes culturas como egipcios (utilizaban adhesivos de caseína), chinos (utilizaban sustancias de la boca del esturión), romanos (empleaban la clara de huevo como adhesivo), griegos (empleaban adhesivos naturales para edificaciones) y babilonios. Los adhesivos eran de origen natural y eran utilizados para diferentes funciones (herramientas de caza, edificaciones, etc.) presentando una buena fiabilidad para la época. Además, existen otros ejemplos de adhesión como es el caso de las telas de araña.

A finales del siglo XVII, en Holanda, surge la primera planta de producción industrial de adhesivos con colas de animales al mismo tiempo que Inglaterra obtuvo la primera patente para la fabricación de colas de pescado y a finales del siglo comienza a emplearse el caucho natural como adhesivo. En el siglo XX después de la revolución industrial se empezó a desarrollar la ciencia de los polímeros y con ello nacieron los adhesivos sintetizados (inicialmente de urea-formaldehidos y fenólicos). Se crearon adhesivos con nuevos diseños para ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones industriales. Con la salida de los adhesivos orgánicos sintéticos, se alcanzó niveles altos de aplicabilidad, en diferentes áreas industriales, presentando mejoras en las características mecánicas respecto a los métodos tradicionales de unión.

La industria aeronáutica fue la primera en emplear los adhesivos debido a sus ventajas en sus propiedades (resistencia, mantenimiento, etc.) frente a otras uniones. Las uniones clásicas empleadas otorgan otros problemas que los adhesivos no tienen, como puede ser: máximas tensiones en orificios, mantenimiento y supervisión periódica, tensiones no uniformes, corrosión galvánica, etc. El sector alimentario ha utilizado las uniones adhesivas para reducir el peso de los envases, haciéndolos más prácticos, menos costosos y sin problemas de corrosión que presentaban los envases mecánicos.

El desarrollo en la tecnología de los adhesivos ha permitido obtener nuevas generaciones de adhesivos que combinan alta resistencias a esfuerzo cortante, momentos, cargas axiales, etc. donde se presentan mejoras de funcionamiento en condiciones de temperatura elevada y ambientales (viento, agua, etc.). Hoy en día, podemos encontrar una gran variedad de productos adhesivos con aplicaciones más específicas a nivel industrial (automoción, farmacéutica, arquitectura, naval, etc.) y fuera de esta área (uso doméstico). La utilización de un adhesivo frente a otro dependerá de las condiciones a las que esté sometido y del ciclo de vida del producto. Al igual que las pinturas, los adhesivos están formados por diversos componentes químicos donde cada compuesto presenta una función específica. En la composición de un adhesivo, aparte del



polímero principal que lo forma, se encuentran otros compuestos como los aditivos y cargas para soportar propiedades específicas.

La aplicación de las uniones adhesivas en la industria naval tuvo sus comienzos inicialmente en buques de pasaje, de alta velocidad y embarcaciones de recreo; permitiendo reducir tiempos de construcción, costes y peso. En la actualidad se aplica para uniones ligeras (no estructurales) entre metales o materiales compuestos con capacidad de soportar ciertas cargas ambientales y otros fenómenos. Sin embargo, todavía se siguen estudiando estas uniones con el objetivo de conseguir mayores aplicaciones debido a las numerosas ventajas que aportan estas técnicas de unión [1].

Se espera que los adhesivos del futuro estén diseñados para adherirse en cualquier sustrato sin necesidad de preparación superficial y que se mejoren las propiedades mecánicas de resistencia y deformación, soportando cualquier ambiente y temperatura. El curado será instantáneo como en la soldadura y posibilitando el pegado y despegado en el momento deseado.

1.2 Motivación y Objetivo

Durante los procesos de fabricación, transformación y reparación de buques se realiza un gran número de uniones metálicas. La tecnología más usada es la soldadura. Sin embargo, en muchos casos sería más ventajosa la utilización de adhesivos, que permiten modernizar y optimizar los procesos y así potenciar la competitividad de la construcción naval. Actualmente las uniones adhesivas ofrecen numerosas ventajas respecto a otros sistemas de unión ya que ha mejorado mucho la calidad de los adhesivos y el conocimiento técnico. Sin embargo, presentan una desventaja que dificulta su aplicación estructural, se trata de su durabilidad a largo plazo. Este proceso de fallo es la causa del 85% de las roturas de los materiales estructurales en servicio. El presente trabajo tiene como objetivo investigar la aplicación de uniones adhesivas y su implementación en el astillero 4.0. De esta manera, se utilizarán estudios previos, con el propósito de alcanzar nuevas metas sobre:

- El comportamiento experimental de los adhesivos.
- La fractura de uniones adhesivas.
- El análisis mediante elementos finitos (FEA) de uniones adhesivas.
- La evaluación de ensayos para uniones adhesivas.
- Posibles aplicaciones de adhesivos en el sector naval.

Además, esta memoria pretende ampliar la información sobre la aplicación de uniones adhesivas en el astillero 4.0 para servir de guía en futuras investigaciones. Con el objeto de facilitar la comprensión, este trabajo se ha estructurado en varios bloques. En el primero, se introduce la técnica de unión adhesiva y se detallan sus particularidades frente a otros métodos de



unión. En el segundo, se definen las herramientas y ensayos empleados para la caracterización de un adhesivo. En el tercero, se realizan ensayos experimentales en modo I y II a los que se les aplican diferentes modelos para definir las propiedades del adhesivo. En el cuarto, se presenta la simulación numérica de fractura, con un análisis estático y dinámico en dos y tres dimensiones, con el objeto de examinar los resultados y discutir la posibilidad de emplear diferentes metodologías de modelado matemático. Finalmente, se exponen las conclusiones destacando los objetivos alcanzados y se muestran unas líneas en las que se podría continuar trabajando.

1.3 Características de los Adhesivos

En el estudio de los adhesivos se incluyen disciplinas científicas como la física, química y mecánica, solapándose entre ellas en ciertas áreas como son las de superficies, materiales poliméricos y diseño de uniones que en conjunto son relevantes para la ciencia de la adhesión. Esto sucede debido a que el adhesivo está formado por una composición química destinada a realizar una función mecánica de la que requieren ciertas propiedades físicas para conseguir los resultados de unión esperados.

En la actualidad, se dispone en el mercado una gran variedad de adhesivos que posibilita el que materiales muy diversos puedan unirse de forma efectiva y económica. La elección del adhesivo para unir dos superficies, especialmente si son materiales diferentes, no resulta tarea fácil debido a que, para obtener resultados óptimos, hay que considerar muchos aspectos técnicos, económicos, mecánicos, etc.

Se puede definir la palabra adhesivo como un material o compuesto que al ser aplicado sobre dos superficies permite la unión de ambos sustratos. La formación de la unión viene dada por los sustratos o adherentes que son aquellos materiales que se pretenden unir mediante el uso de un adhesivo y la adhesión son las interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interface entre el adhesivo y adherente. Por último, y no menos importante, la cohesión es la fuerza interna del adhesivo para soportar las fuerzas externas que permiten evitar la rotura del adhesivo. A continuación, se definen más en detalle estos conceptos que son relevantes para entender el problema que se pretende evaluar.

El fenómeno de la adhesión debe de ser evaluado planteando dos aspectos importantes. El primero, se ocupará de analizar las fuerzas que deben aplicarse para separar los componentes adheridos y el segundo, se enfoca en los componentes de la unión. A estos dos aspectos se les suele conocer como la adherencia práctica y la adherencia fundamental.

La adherencia práctica está enfocada en el estudio de la magnitud de la fuerza o energía (mecánica) que debe de aplicarse para conseguir romper la unión adhesiva. Dicho esto, es importante conocer cuáles son las capacidades de unión, de modo que, evitemos cualquier rotura

en la operación de los sustratos adheridos requiriendo realizar estudios de la adhesión práctica en laboratorios que permitan identificar las capacidades físicas del adhesivo. La adhesión fundamental se ocupa de las fuerzas y los mecanismos a escala molecular determinando la composición ideal que debe poseer el adhesivo en función del medio de trabajo en el que vaya operar y las características físicas que deba cumplir.

En la utilización de los adhesivos es importante definir cada elemento y componente. Seguidamente, se identifican las partes más importantes de una unión adhesiva.

- Adhesión. Es la propiedad del material por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, manteniéndose juntas por fuerzas intermoleculares. En la figura 2 se puede observar un ejemplo de dicha unión.
- Sustrato. Como se mencionó, con anterioridad, los sustratos son los materiales que se pretenden unir mediante un adhesivo.
- Cohesión. Se define como la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro del mismo cuerpo, en este caso el adhesivo. Una cohesión alta significa que la adherencia es fuerte, resistente y estable en sí misma.

En las figuras 1 y 2 se muestra la unión de los sustratos con el adhesivo, diferenciando la zona de adhesión y cohesión.

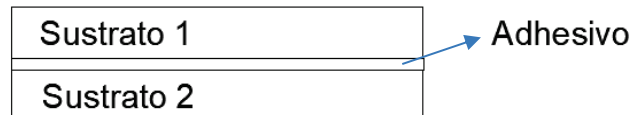


Figura 1. Esquema de dos sustratos adheridos.

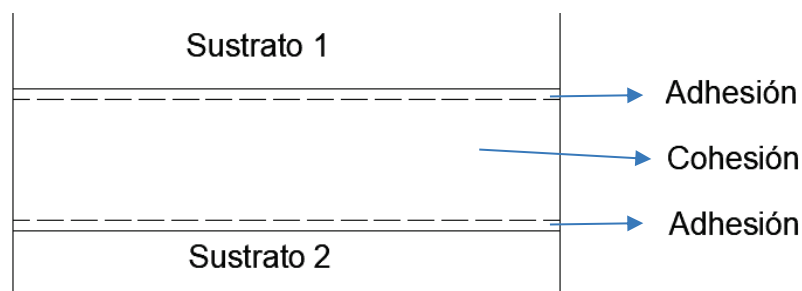


Figura 2. Representación molecular de la adhesión y cohesión.

Además, en una unión adhesiva participan dos tipos de fuerzas de adhesión y de cohesión, que se describen a continuación y que vienen dadas por las dos zonas definidas anteriormente en una unión adhesiva (adhesión y cohesión) [2].

- La fuerza de adhesión corresponde con las propiedades mecánicas del adhesivo que permite mantener unidos a los sustratos mediante mecanismos y fuerzas situadas en la capa del adhesivo.



- La fuerza de cohesión se corresponde con todas las fuerzas o mecanismos que posee el propio adhesivo para mantenerse unido y evitar la rotura o formación de grietas.

De esta manera, los resultados obtenidos en una unión, no dependerán solo del adhesivo sino también de la resistencia mecánica de los materiales que se unan y del estado de cargas a las que estará sometida la unión. Además, los criterios de resistencia y estabilidad no son los únicos criterios que determinan el empleo de un adhesivo u otra unión, también intervienen criterios económicos.

1.4 Tipos de Adhesivos

Los adhesivos se pueden clasificar de múltiples maneras. El criterio de clasificación, en este caso, será en función de los requerimientos de uso destacando la variedad de estos productos y las áreas de aplicación correspondientes a las mismas.

Adhesivos estructurales. Son empleados para obtener una unión permanente de manera que permita asegurar la integridad estructural (entre los sustratos). Estos adhesivos deben de ser capaces de soportar una carga superior a la del propio peso de los sustratos (cargas externas como pueden ser las ambientales) y un fallo puede comprometer a la estructura. El proyecto se centra en evaluar estas características del adhesivo. Estos adhesivos son los que se utilizan para evitar métodos de uniones mecánicas más tradicionales como pueden ser la soldadura o el remacho. Los tipos de adhesivos estructurales son:

- Adhesivos epoxi.
- PAR o adhesivos de poliuretano.
- MMA o adhesivos de metacrilato de metilo.
- Adhesivos anaeróbicos.

Adhesivos de apoyo se emplean cuando sólo debe soportar el peso de los sustratos (ausencia de cargas externas). También tienen aplicación en la industria naval, pero en menor énfasis.

Adhesivos selladores son aquellos que evitan el paso de fluidos a través de una junta. Se suelen emplear adhesivos en base polímero. Permiten la aplicación en lugares húmedos e incluso bajo el agua, estos también son bastante utilizados en el sector naval. Además, podemos encontrarnos dos tipos según su elongación, fuerza, tensión y dureza. En el primer caso, tenemos los adhesivos selladores, óptimos para trabajos de pegado, con una baja elongación, una baja resistencia a la fuerza de tensión y una alta dureza. En el segundo caso, los adhesivos selladores son aplicados para trabajos de sellado, que se caracterizan por tener una alta elasticidad, una alta resistencia a la fuerza de tensión, y una baja dureza.

Por último, están los termoplásticos y termo-endurecibles. Se diferencian principalmente en que el primero se deforma y fluye cuando se calientan a una temperatura y posteriormente se



endurece al enfriarse. Estos polímeros tienen la característica de poseer un alto peso molecular y permitir enlaces fuertes entre moléculas. Como ya se comentó, permiten calentarse y enfriarse con el fin de modificar sus propiedades físicas (a mayor número de veces se debilitan los enlaces).

En el segundo caso (adhesivos termo-endurecibles) no se ablandan al calentarse pueden carbonizarse si la temperatura es elevada y no fluyen. Para obtener más información respecto a los tipos de adhesivos visitar la referencia [3].

1.5 Ventajas y Desventajas de los Adhesivos

Las ventajas que presentan los adhesivos para realizar uniones entre materiales son numerosas en comparación con las uniones mecánicas tradicionales como la soldadura, el remachado, atornillado, etc.

- Permiten obtener una reducción de costes de inventario debido a la facilidad de aplicación respecto a otras uniones mecánicas de las que no requiere tornillos, arandelas, etc. y siendo un proceso de aplicación muy sencillo.
- También permite un descenso en los tiempos de trabajo (comparado con una soldadura o atornillado) puesto que la aplicación del adhesivo se puede llevar a cabo en unos pocos minutos.
- Se consigue una disminución de peso significativo comparado con las uniones metálicas puesto que se utilizan polímeros ligeros.
- Una ventaja importante es que las uniones adhesivas reparten la tensión de una unión a través de toda la superficie del área de aplicación. En el caso de las fijaciones mecánicas se generan concentración de tensión en los puntos de enlace.
- Es importante destacar que el uso de adhesivos no genera deformación ni ningún tipo de agresión mecánica al sustrato, eliminando los procesos de rectificación y los costes en la fabricación.
- Además, los adhesivos permiten absorber parte de las vibraciones y ruido a las que está sometida una estructura (resistencia a fatiga) evitando la pérdida de apriete como ocurre en las uniones mecánicas atornilladas. También permite un mejor funcionamiento de equipos electrónicos al reducir las vibraciones de la estructura soporte (ejemplo de las antenas situadas en el mastelero de un buque).
- Por último, y no menos importante, disminuye el fenómeno de corrosión; las uniones adhesivas no generan óxido al exponerse al agua o al unir dos metales diferentes, siendo una gran ventaja en la industria de la construcción. Además, aporta una mejora en la estética.



Los inconvenientes y desventajas de los adhesivos también deben de ser considerados a la hora de decidir qué tipo de unión es la más adecuada de ejecutar [4]. A continuación, se describen los inconvenientes:

- Tiempos de espera. Es necesario esperar un tiempo determinado para obtener la resistencia final del adhesivo, el cual depende del tipo de adhesivo y de las condiciones ambientales. Esto es una desventaja frente a los métodos mecánicos como son el remachado o atornillado.
- Resistencia a altas temperaturas. Los adhesivos son materiales basados en polímeros con una resistencia media a la temperatura. Por supuesto, la capacidad depende del tipo de adhesivo, los fabricados con base de silicona pueden soportar hasta 800°C.
- Envejecimiento. Esta afectado por la resistencia a largo plazo, viene dado por diferentes acciones físicas y químicas del ambiente (luz ultravioleta, humedad). Es necesario realizar una serie de ensayos de resistencia de ciclo de vida acelerados con el objeto de observar la bondad de la unión adhesiva.
- Preparación superficial. Requiere de una preparación de la superficie previo al proceso de aplicación de adhesivos con el objetivo de conseguir la mejor adhesión entre adhesivo y sustratos. De manera breve, la preparación depende del tipo de materiales a unir, el adhesivo seleccionado y los requisitos funcionales que debe cumplir la unión adhesiva.
- Desmontaje. En la actualidad, el proceso de desmontaje puede generar daños a los sustratos e incluso destruirlos al igual que en una soldadura, siendo además un proceso costoso de realizar. Esto no ocurre en las uniones mecánicas atornilladas cuyo desmontaje es sencillo y no destructivo.
- Seguridad y medioambiente. Se deben definir acciones para evitar la exposición de personas a estos productos durante el momento de aplicación. Esto es debido a que los adhesivos están formados por compuestos químicos. Las medidas dependerán del tipo de adhesivo y la extensión de aplicación. También se debe de gestionar los residuos generados durante el proceso de aplicación para un posible tratamiento y reciclaje.
- Nivel de preparación. La aplicación de las uniones adhesivas se está implementando en normativas con el objetivo de tener un control adecuado y un nivel de seguridad óptimo. Se requiere de personal de supervisión, verificación y de aplicación para asegurar una correcta aplicación del adhesivo.

Como se pudo observar, la aplicación de los adhesivos como unión es una herramienta muy práctica en la industria de la construcción, Por ello, es importante conocer todos los métodos de



unión, para seleccionar el más adecuado en cada situación. En la tabla 1 se ilustra una comparativa.

	Soldadura	Soldadura blanda	Unión Mecánica	Unión adhesiva
Tipo de unión (Permanencia)	Alta	Media	Variable	Alta
Distribución de Tensiones	Malo	Buena	Intermedio	Excelente
Aspecto de la unión	Bueno	Bueno	Intermedio/Mala	Excelente
Materiales a unir	Mismos metales	Mayor flexibilidad	Mayor flexibilidad	Ideal materiales diferentes
Resistencia a Temperatura	Alta	Limitada	Alta	Limitada
Vida a fatiga	Media	Buena	Medio/Malo	Excelente

Tabla 1. Comparativa general entre uniones disponibles [5].

De la tabla anterior se infiere la necesidad de aprovechar las características del adhesivo para implementar su uso en la industria naval y aportar mejores formas de unión respecto a las existentes. Los materiales empleados para establecer una unión adhesiva son en su mayoría compuestos reforzados con fibra. Estos materiales permiten un fácil ensamblaje utilizando dicha técnica.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ADHESIVOS

Actualmente, la mayor parte de los astilleros que se dedican a diseñar barcos en donde la tecnología es considerada uno de los aspectos más importantes (como es el caso de los buques de guerra), se centran en la innovación de materiales que repercuten en el diseño de la estructura y en la reducción de peso de la misma. Esto se consigue introduciendo nuevos materiales (no metálicos) como pueden ser los materiales compuestos, y aplicando distintas estrategias de unión.

Los astilleros competitivos se centran en la construcción y desarrollo de la estructura (casco, apéndices, refuerzos, etc.) y, por tanto, la tecnología no está fabricada por la empresa. Para alcanzar el astillero 4.0, las empresas buscan innovar y aportar dentro de las previsiones que tiene el mundo de ser ecológicos (menor consumo de recursos, aprovechamiento de las materias primas, etc.) avances que le permitan establecer nuevas estrategias de mercado.

En el estudio de las uniones es necesario caracterizar el material y el tipo de unión que se va a emplear. En el caso de los adhesivos, las características del material se determinan realizando los ensayos *Bulk* y TAST (*Thick Adherend Shear Test*) y posteriormente es necesario caracterizar la fractura del material con otros ensayos para definir la energía de fractura del modo I y del modo II (más adelante se comentan los aspectos de estos ensayos). Los adhesivos presentan la ventaja de permitir adherir diferentes tipos de materiales, como puede ser metal-metal, composite-metal, composite-composite, etc. su utilización dependerá de las necesidades y exigencias requeridas por la unión.

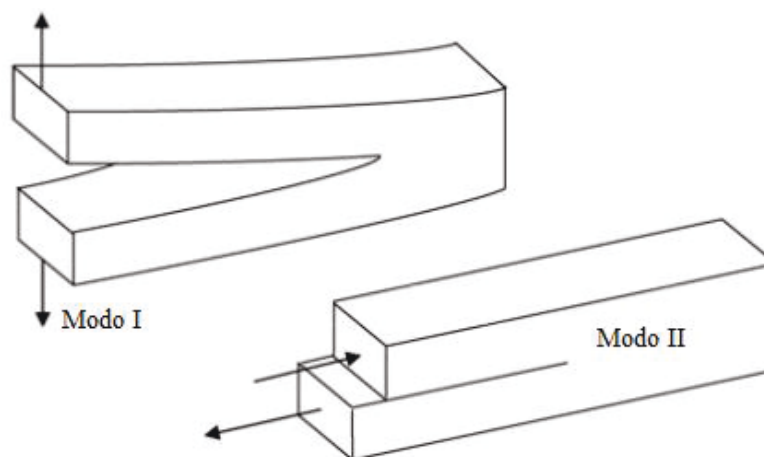


Figura 3. Ensayo del modo I y II.

Existen diferentes maneras de evaluar los adhesivos y caracterizar sus aplicaciones en los diversos sectores de la construcción. En ingeniería interesa caracterizar las propiedades técnicas y químicas con el fin de conocer las cargas que son capaces de soportar (tensiones, esfuerzo cortante, etc.), componentes químicos que pueda contener y que sean peligrosos para la salud de las personas y contaminantes al medio ambiente. Además, es importante conocer los efectos que puedan tener las cargas ambientales (lluvia, viento, nieve, etc.) sobre este tipo de uniones.



Este trabajo se centra en analizar las capacidades técnicas de las uniones adhesivas empleando diferentes métodos de evaluación (experimental y numérica). La primera consiste en realizar estudios experimentales del modo I y modo II (ver figura 3) empleando métodos de ensayo como el TDCB (*Tapered Double Cantilever Beam*) y ENF (*End Notched Flexure*) para evaluar el crecimiento de la grieta en los adhesivos y conociendo hasta que carga soportan. La segunda consiste en realizar un análisis numérico empleando el software ANSYS para simular la unión entre el adhesivo y sustrato.

La presencia de defectos en la superficie o relacionados con la geometría de la unión no cumplen los principios de la mecánica continua. Por este motivo, se emplea la teoría de la mecánica de la fractura. Esta teoría asume que la estructura no es continua, lo que permite tener en cuenta defectos de fabricación o cualquier otro daño ocasionado durante su vida útil. El efecto de desprendimiento, generación y evolución de grietas y otras imperfecciones pueden estar presentes dentro de los materiales y a menudo son puntos de concentración de tensión (punto *caliente*). Este método evalúa los defectos que se puedan tener en cuenta y los compara con un valor crítico de la fractura que conduce a una falla estructural. La mecánica de la fractura se basa en dos criterios básicos: el criterio del factor de intensidad de tensión y otro basado en conceptos energéticos. El factor de intensidad de tensión, representa un parámetro de escala que define los cambios en el estado de tensión en la aproximación de la punta de la grieta, originados por la tensión infinita en esas áreas. Los criterios energéticos se basan en la comparación entre la función de la tasa de liberación de energía de deformación (*Strain Energy Release Rate SERR*) de la carga aplicada y el valor de fractura crítica (G_c) que es una característica del material [6].

Las dos principales ventajas de emplear una aproximación energética antes que el método basado en la resistencia del material es:

- G tiene un significado físico importante relacionado con el proceso de absorción de energía de la fisura.
- Es muy difícil obtener los valores del factor de intensidad de la tensión, principalmente cuando la fisura crece cerca de la interfaz.

El método del dado mecánico es un proceso que evita los picos de tensión en zonas singulares. Generalmente, los modelos de CZM (*Cohesive Zone Model*) se basan en elementos de interfaz, planos de conexión o sólidos tridimensionales. Estos elementos se caracterizan por no tener espesor y favorecer la conexión entre dos elementos macizos. La capacidad de simular tanto el inicio como la propagación de la grieta representa una gran ventaja para los elementos cohesivos. No hay necesidad de una fisura previa y la propagación se produce sin la intervención del usuario. Sin embargo, el usuario debe conocer las áreas críticas que promueven el inicio del daño y ubicar los elementos cohesivos en consecuencia. La ciencia de los adhesivos ha utilizado

elementos ampliamente cohesivos para simular daños [6]. Además, los modelos de daño continuo son excelentes herramientas para evaluar el efecto del espesor en la fractura de las juntas adhesivas.

La figura 4 representa dos leyes de cohesión utilizadas en la simulación de uniones adhesivas. La ley de cohesión triangular (ilustrada inicialmente) es la más utilizada por su sencillez y puede considerarse como un caso particular del trapezoidal (ubicada a continuación de la triangular) donde se cumple $\delta_{1m,i} = \delta_{2m,i}$ y $\delta_{1,i} = \delta_{2,i}$. La ley triangular funciona bien para adhesivos más frágiles o moderadamente dúctiles, aunque el trapezoidal es preferible cuando los adhesivos revelan un comportamiento dúctil notable.

Los métodos más empleados para evaluar la fractura son: la mecánica de la fractura y los modelos de daño cohesivo. La energía de fractura crítica (G_c), es la propiedad más relevante a evaluar. La fractura varía con el modo de carga: modo I, II, III y combinaciones de estos que constituyen la mayoría de las condiciones de carga en el adhesivo [6].

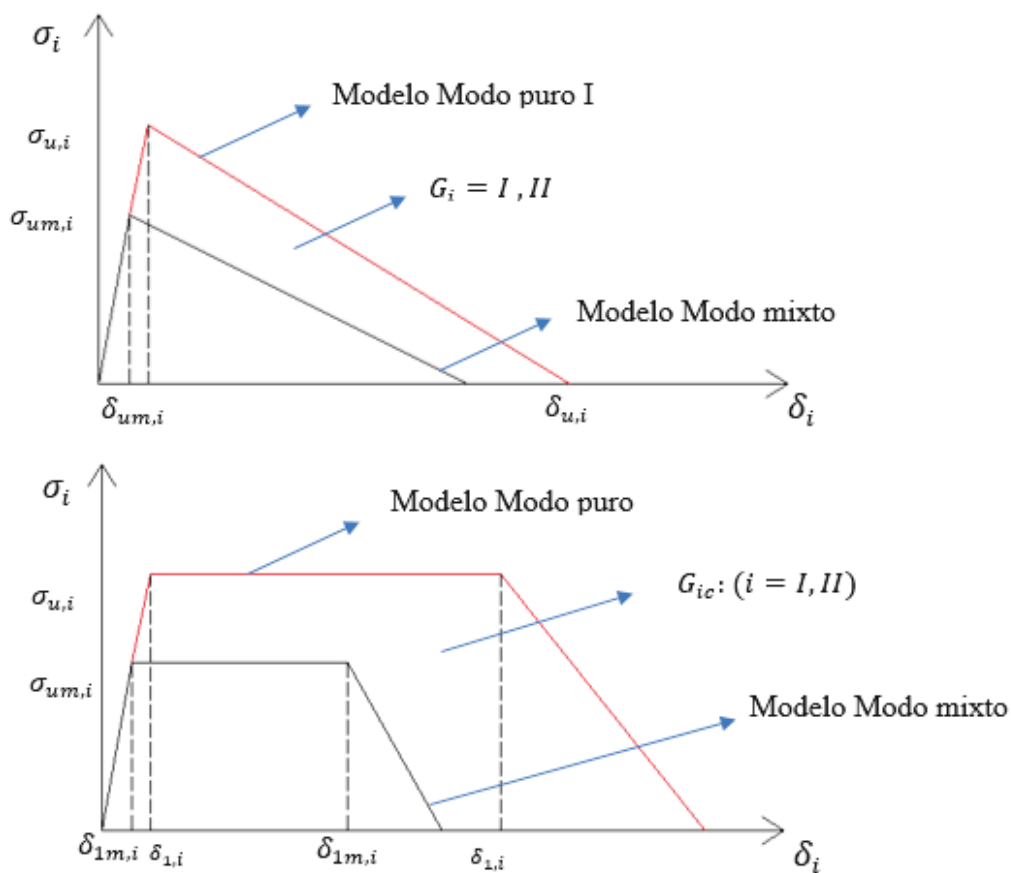


Figura 4. Ley cohesiva triangular y trapezoidal para los modos puros I y II y mixto.

La ley trapezoidal es empleada para reproducir el comportamiento de adhesivos dúctiles con una capa fina de aplicación en modo I y II siendo la más adecuada de emplear para el trabajo en estudio. La relación constitutiva antes del inicio de la aplicación del daño (fractura) se basa en la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \cdot \delta_t \quad (1)$$

Donde E es la matriz de rigidez diagonal del material según la carga a evaluar (modo I o II) definida como la ratio entre el módulo elástico en tensión normal o cortante y el espesor del adhesivo. Considerando los modelos de modo puro, después de $\delta_{1,i}$ (primer punto de inflexión) el material se ablanda progresivamente. Se puede escribir la relación de ablandamiento como:

$$\sigma = (I - D) \cdot E \cdot \delta_t \quad (2)$$

Donde I es la matriz de identidad y D es la matriz diagonal conteniendo (en función del modo I o II) los parámetros de daño. En líneas generales, las uniones pegadas están sometidas a cargas de modo mixto. Para caracterizar el comportamiento en este caso, se puede considerar una carga del modo puro II (como puede ser el ENF) que es un caso particular de una carga general de modo mixto. El daño inicial se puede predecir usando un criterio de tensión cuadrática como el que se ilustra a continuación:

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}}\right)^2 = 1 \quad Si \quad \sigma_I > 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{II} = \sigma_{u,II} \quad Si \quad \sigma_I \leq 0 \quad (4)$$

Donde σ_i ($i = I, II$) representa la tensión para el modo correspondiente. Se asume que la tensión de compresión normal no induce daño. Mencionado esto, se puede reescribir la ecuación anterior como una función de los desplazamientos relativos.

$$\left(\frac{\delta_{1m,I}}{\delta_{1,I}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{1m,II}}{\delta_{1,II}}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

Donde $\delta_{1m,i}$ ($i = I, II$) son los desplazamientos relativos en cada modo correspondiente al daño inicial. La tensión de ablandamiento inicial ($\delta_{2,i}$) es obtenido usando una aproximación cuadrática de las deformaciones relativas siguiendo un criterio similar al anterior:

$$\left(\frac{\delta_{2m,I}}{\delta_{2,I}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{2m,II}}{\delta_{2,II}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

Donde $\delta_{2m,i}$ ($i = I, II$) es el desplazamiento relativo de cada modo correspondiendo a la tensión de ablandamiento inicial. Además, llegados hasta aquí, se puede simular el crecimiento de la grieta con un criterio de fractura energética lineal:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (7)$$

Cuando estas ecuaciones se satisfacen, el crecimiento de la grieta se desarrolla y las tensiones son obtenidas con la excepción de la compresión normal. Empleando el criterio propuesto, es

posible definir el desplazamiento equivalente del modo mixto ($\delta_{1,m}$, $\delta_{2,m}$ y $\delta_{u,m}$) y establecer los parámetros de daño en la región pegada.

$$d_m = 1 - \frac{\delta_{1m}}{\delta_m} \quad (8)$$

También se puede conocer para la zona de tensión de ablandamiento de la ley cohesiva:

$$d_m = 1 - \frac{\delta_{1m} \cdot (\delta_{um} - \delta_m)}{\delta_m \cdot (\delta_{um} - \delta_{2m})} \quad (9)$$

Una descripción más detallada del modelo propuesto es presentada en el trabajo de Campillo et al. (2008) [7]. A continuación, se describen los ensayos que se emplean para caracterizar el material de un adhesivo.

2.1 Ensayo Bulk y TAST

Como ya se comentó anteriormente, para definir las características materiales del adhesivo, se deben de realizar una serie de ensayos como son el *Bulk* y el TAST. El primero consiste en someter una probeta de adhesivo a una máquina de tracción-compresión para obtener el módulo de elasticidad, Módulo de Young, Coeficiente de Poisson, tensión de rotura del adhesivo, etc. al igual que si fuera una probeta de acero. En el ensayo TAST se somete la probeta a otro ensayo para caracterizar el adhesivo aplicando una carga de cizalla. Como es de esperar, se realiza para obtener el módulo de cizalla del material.

A continuación, se representa un par de figuras de las dimensiones de la probeta para el ensayo *Bulk* y del ensayo TAST en la máquina de tracción-compresión.

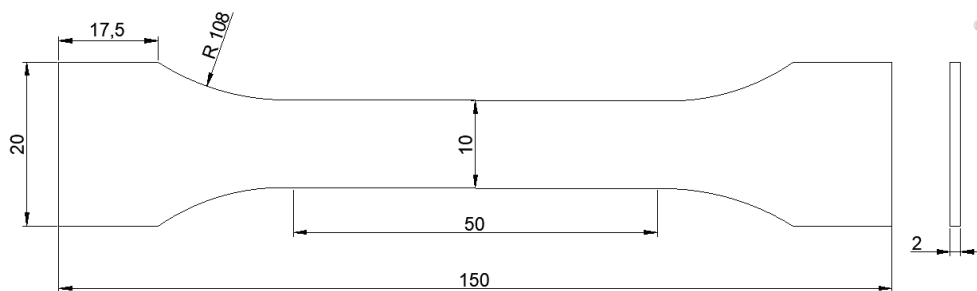


Figura 5. Probeta del ensayo *Bulk*.



Figura 6. Muestra del ensayo TAST [8].

El ensayo *Bulk* se realiza siguiendo la norma ISO:527: 1997 en donde se especifican las dimensiones y procedimientos para el ensayo. De igual modo, el segundo ensayo TAST se realiza siguiendo la norma ISO 11003-2: 1993.

2.2 Ensayos Modo I

Muchos autores han definido y evaluado la energía de fractura crítica empleando una unión pura del modo I. La ley del modelo cohesivo (CZM) ha sido utilizada para simular la fase inicial del daño y predecir el comportamiento de la fractura en la unión.

El análisis del modo I se emplea para definir los parámetros y características del adhesivo como material, siendo una prueba donde se analizan las tensiones normales del adhesivo (sentido axial). Consiste en un ensayo el cual se somete a tracción la probeta por la zona de no aplicación del adhesivo intentado de romper la unión. Se pueden emplear diferentes métodos o herramientas para analizar las características del adhesivo como son una máquina de tracción, cámara, regla o pie de rey, etc.

Los ensayos de doble viga en voladizo (*Double Cantilever Beam DCB*) o la viga en voladizo doble cónica (TDCB) para caracterizar uniones adhesivas son extensamente empleadas para determinar la resistencia de la fractura para el modo I. En la prueba se mide la energía de deformación crítica (G_{IC}) el cual sirve de referencia para caracterizar la resistencia del adhesivo. Además, en el ensayo se deben de cumplir las dimensiones entre el adhesivo y adherente siguiendo la normativa estándar ASTM. El objetivo de este método es estudiar la propagación de la grieta al aplicar una fuerza de tracción en el extremo libre [9]. En la figura 7 se puede observar un modelo de ensayo DCB y en la figura 9 un ensayo TDCB.

El proceso de realizar ambos ensayos es el mismo. Los estándares de la ASTM establecen que la prueba mecánica debe ser conforme a los requisitos de la norma mencionada y así, como los equipos empleados para la prueba deben de estar conforme a los requisitos que exige la norma. Además, los estándares de la ISO 25217 establecen que la máquina empleada debe de ser capaz de producir un desplazamiento constante con una ratio entre 0,1 y 0,5 mm/min teniendo además incorporado una célula de carga calibrada. Las cargas típicas a emplear están en el rango de 100 y 5000 N. Por último, es necesaria una cámara de alta resolución que sea capaz de grabar el crecimiento de la grieta con una precisión de al menos 0,5 mm. Ambas normas exigen que de cada ensayo se extraiga una gráfica donde se represente la fuerza-deformación (kN-mm). En la referencia [10] se pueden observar procedimientos de cálculo y guía de toma de datos para los ensayos experimentales.

2.2.1 Esquema DCB

Este ensayo consiste en emplear unos adherentes rectangulares unidos con el adhesivo en toda su extensión excepto en la zona de no aplicación de adhesivo (zona de aplicación de la carga). La fuerza se aplica en unos orificios y en ambos adherentes. Es la probeta más empleada para caracterizar el adhesivo mediante una unión pura del modo I en adhesivos con baja y media ductilidad.

La ASTM especifica las dimensiones de los adherentes y criterios de evaluación que deben de ser utilizados. En la figura 7 se puede observar las características de este ensayo.

- Longitud total: 356 mm.
- Ancho: 25,5 mm.
- Altura hasta el adhesivo: 12,7 mm.
- El ancho y la altura debe ser medida en dos posiciones de la longitud total (125 mm y 227 mm).
- La muestra se debe unir a la máquina de prueba a través de los orificios de carga de 6,4 mm de diámetro interior.
- La prueba se conduce a una velocidad destinada a dar un tiempo de fractura de 1 min.

Además de las recomendaciones de la normativa ASTM, se emplean de referencia los artículos [11-13] el cual han realizado ensayos experimentales y aplicación de las formulaciones correspondiente, sirviendo de guía para el trabajo en estudio.

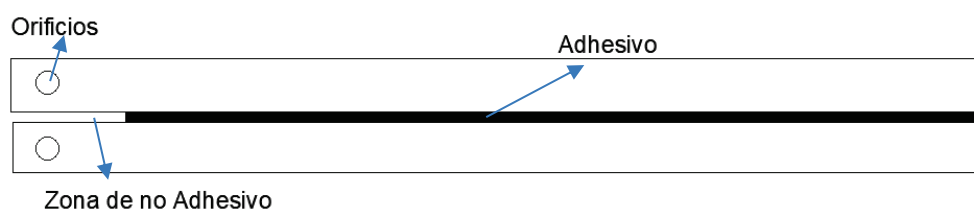


Figura 7. Probeta de un ensayo DCB.



La prueba ASTM sigue un proceso discontinuo debido a que la fuerza aplicada se detiene en cuanto el operador observa que la grieta ha comenzado a crecer. Posteriormente, la grieta debe ser observada durante el proceso de aplicación de la carga hasta que se alcance un valor aproximadamente constante. La carga debe de ser registrada cuando la grieta comienza a propagarse (P_{max}) y cuando finaliza el crecimiento de la grieta (P_{min}).

Para realizar el cálculo de la energía de fractura crítica (G_{IC}) se parte de la ecuación que se ilustra a continuación. Se puede observar que depende de una expresión de cumplimiento de la viga del sustrato (C) respecto a la evolución de la grieta.

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2 \cdot B} \frac{dC}{da} \quad (10)$$

Partiendo de la ecuación anterior, se estudia la relación entre dC/da para simplificar el análisis teórico y práctico. Una manera simplificada de obtener la energía de fractura crítica (G_{IC}) es mediante un ensayo DCB empleando la *Simple Beam Theory* (SBT). Según unas dimensiones estándares para la probeta del ensayo se puede llegar a una simplificación para la relación de cumplimiento con la longitud de la grieta.

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{E \cdot B} \left(\frac{3 \cdot a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (11)$$

Analizando la carga aplicar y la energía de la fractura respecto a la tensión axial, se puede llegar a la siguiente ecuación que permite calcular (G_{IC}):

$$G_I = \frac{4 \cdot P_{max}^2 \cdot (3 \cdot a^2 + h^2)}{E \cdot B^2 \cdot h^3} \quad (12)$$

Donde:

- P_{max} : carga máxima registrada (N).
- a : longitud de la grieta (mm).
- h : altura hasta el adhesivo (mm).
- E : módulo elástico del adhesivo (N/mm).
- B : ancho de las barras adherentes (mm).

También es posible obtener el valor de G_{IC} empleando la *Corrected Beam Theory* (CBT), en este caso se considera una longitud de la grieta ligeramente superior y se crean dos posibles aproximaciones. La primera consiste en seguir considerando que la expresión de cumplimiento (C) siga siendo $C^{1/3}$ al igual que en la SBT y, el segundo caso, consiste en considerar que la expresión del cumplimiento esta normalizada, en este caso, la expresión sería $(C/N)^{1/3}$. Siendo N la corrección de la carga de bloque.

La segunda consideración se debe de tener solo en cuenta cuando se aplica un esquema DCB o TDCB. Se puede obtener más información en la referencia [14].

$$G_{IC} = \frac{3 \cdot P \cdot \delta}{2 \cdot B \cdot (a + |\Delta|)} \cdot F \quad (13)$$

$$G_{IC} = \frac{3 \cdot P \cdot \delta}{2 \cdot B \cdot (a + |\Delta|)} \cdot \frac{F}{N} \quad (14)$$

Donde δ es la deformación obtenida del ensayo, Δ es la corrección de la longitud de la grieta, F es la corrección de la longitud de desplazamiento y N es la corrección de la carga de bloque.

Por último, se representa otro Método de Cumplimiento Experimental (ECM) para obtener el valor de G_{IC} . En este caso volvemos a tener la opción de aplicar un cumplimiento (C) y sigue siendo $C^{1/3}$ al igual que en la SBT o, como en el segundo caso, considerar la expresión del cumplimiento normalizada (C/N). El primer caso se emplea si la carga es aplicada a través de unas bisagras y el segundo caso si se han realizado agujeros para la aplicación de la carga.

$$G_{IC} = \frac{n \cdot P \cdot \delta}{2 \cdot B \cdot a} \cdot F \quad (15)$$

$$G_{IC} = \frac{n \cdot P \cdot \delta}{2 \cdot B \cdot a} \cdot \frac{F}{N} \quad (16)$$

En este caso n representa la pendiente de la traza calculada para G_{IC} . Se puede obtener más información de esta estrategia de cálculo en la referencia [14].

En la normativa ISO 25217 no se especifican la longitud ni el ancho de la probeta, pero si establece unos estándares para la altura y espesor de la capa del adhesivo. La altura (h) debe de ser medida antes de aplicar la unión en tres puntos de la probeta y además el espesor de la capa de adhesivo será medido después de haber aplicado el adhesivo siguiendo los requisitos de la norma. Todas las mediciones mencionadas se deben de realizar en tres puntos de la probeta: centro y ± 30 mm en cada sentido.

A continuación, se describen los procesos a seguir para una prueba DCB del modo I puro mediante la norma ISO. La primera fase del ensayo consiste en aplicar una carga de desplazamiento constante hasta que la grieta haya crecido entre unos 2 mm y 5 mm. Dicha carga debe de aplicarse entre una velocidad de 0,1 y 0,5 mm/min cuando se emplean sustratos metálicos. Al llegar a esta etapa se para la carga y se deja de aplicar, se conoce como la etapa previa al agrietamiento y se debe de tomar nota de la longitud de la grieta. Consecutivamente, entramos en la segunda fase en donde se vuelve aplicar una carga constante con una velocidad de aplicación igual que la primera fase hasta que la grieta del adhesivo haya llegado a 60 mm desde la punta de la fase anterior del modo I. Al culminar la segunda fase se vuelve a parar la carga y deja de aplicarse. Se recuerda que los valores de la carga aplicada y las deformaciones obtenidas deben

de ser registradas en ambas etapas mencionadas tomando los datos aproximadamente cada 1 mm (lo ideal) de evolución de la grieta (se recomienda que al menos sean más de 15). Además, la longitud de la grieta es monitorizada durante el proceso de aplicación de la carga con el objetivo de conseguir la fuerza a la que se inicia la grieta (definida como el punto VIS) y obteniendo a partir de aquí diferentes puntos mediante la evolución de la grieta. Por último, se deben de conocer los defectos que pueda tener la máquina de aplicación de carga con el objetivo de ser corregido debido a que se ha demostrado que interviene en los resultados (empeorándolo).

Se debe de marcar la posición de la punta de la grieta (tomando como referencia la distancia entre la línea de carga y la punta de la grieta en ambos extremos). Si la longitud de la grieta (a) en cada uno de los dos bordes de la muestra difieren en más de 2 mm, se debe de abandonar el ensayo.

El análisis de los datos obtenidos durante la prueba requiere cierto procesamiento posterior de los registros de carga y desplazamiento. Para la determinación del inicio de la grieta, tres puntos son identificados. El primero se corresponde con el VIS mencionado anteriormente. De manera consecutiva, se examinan los datos obtenidos de las etapas previa al agrietamiento y de prueba para identificar la pendiente de conformidad de carga inicial (C_0), a posteriori se obtiene el punto de desviación del resto de datos de la línea de C_0 (termino el punto no lineal NL), que es una línea construida con un cumplimiento del 5% mayor que el C_0 (denominado línea C_{0+5}), finalmente la intersección del registro de prueba con la línea C_{0+5} es denominado punto de compensación del 5% que coincide con el punto de carga máxima. En la figura 8 se ilustra una gráfica tipo de este ensayo.

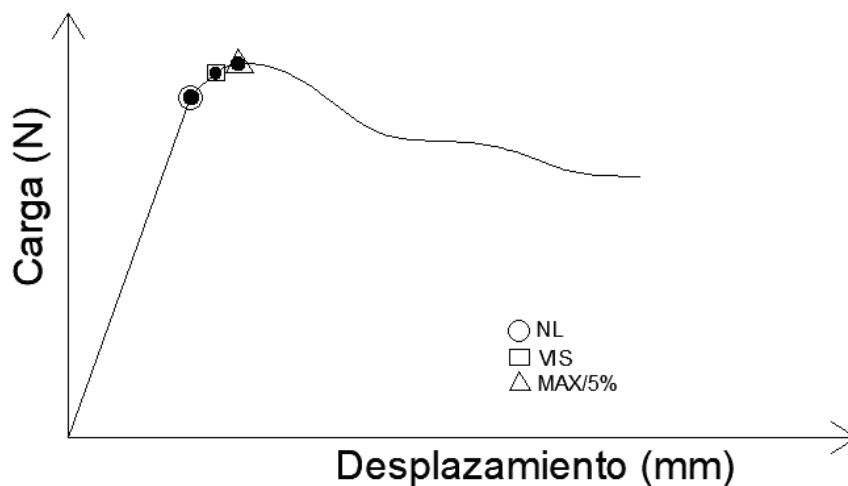


Figura 8. Carga-deformación de un adhesivo con ensayo DCB o TDCB.

Se procede explicar más en detalle los puntos NL, VIS y MAX/5 % para conocer que significan y como se obtienen [14]:

- NL: Este punto es para determinar el punto de desviación de la linealidad. Se obtiene trazando una línea recta desde el origen (ignorando cualquier desviación inicial debida a la adopción del juego en el sistema de carga). Llegados a este punto, se debe realizar un ajuste lineal en la curva de carga-desplazamiento, comenzando en 5% de la carga máxima, usando un criterio consistente para la desviación de la linealidad (por ejemplo, la mitad del espesor de la traza del trazador).
- VIS: Se debe de determinar el punto el cual se observa una evolución de la grieta partiendo desde la primera fase (estado de pre-grieta). El punto VIS corresponde a este valor.
- MAX/5 %: Se debe determinar el valor de incremento (5%) como el punto de la curva de carga-desplazamiento en el que la conformidad haya aumentado en un 5% de su valor inicial (C_0) de la siguiente manera. Ya dibujada la línea del punto NL con un cumplimiento inicial (C_0) se dibuja una nueva línea con un cumplimiento igual a $C_{0+5\%}$. Posteriormente se marca la intersección de esta nueva línea con la traza de desplazamiento de carga. Se debe de emplear el punto que ocurra primero, es decir, la carga máxima o la carga con un aumento del 5% en el cumplimiento inicial.

En la referencia [15] se realiza la caracterización del adhesivo para el ensayo DCB empleando un CZM triangular y ecuaciones matriciales. Existen diferentes métodos para resolver el problema planteado.

2.2.2 Esquema TDCB

El ensayo TDCB consiste en unos adherentes con forma cónica el cual contiene una variación del espesor a lo largo de su longitud. Al igual que el ensayo DCB, se deja una zona de no aplicación del adhesivo (zona de aplicación de la fuerza).

El procedimiento a seguir según la norma ASTM es la misma que se describió en el método anterior (DCB), representando en la figura 9 un ejemplo de las formas de esta probeta. Además, se ilustra la ecuación de energía crítica de fractura obtenida al aplicar el método de análisis SBT para el ensayo TDCB, el cual emplea la misma teoría del ensayo anterior.

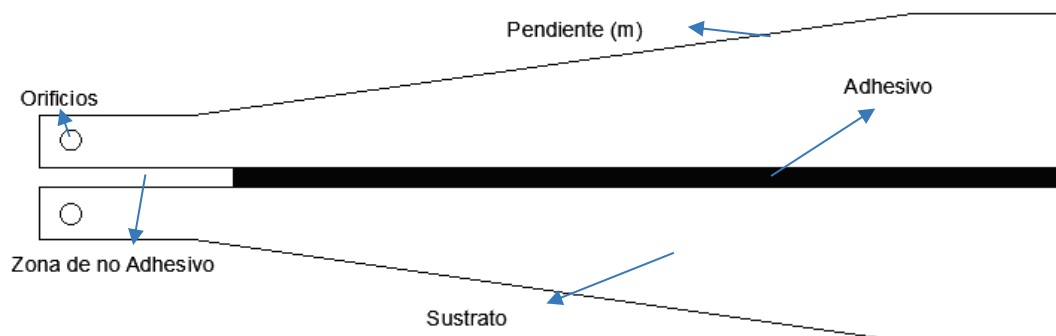


Figura 9. Características de un ensayo TDCB.



Para realizar el cálculo de la energía de fractura crítica (G_{IC}), partimos de la ecuación que se ilustra a continuación. Nuevamente se emplea la expresión de cumplimiento de la viga (C) respecto a la evolución de la grieta descrita en la ecuación 10.

Partiendo de esta ecuación, se estudia la relación entre dC/da para simplificar el análisis teórico y práctico. Una manera simplificada de obtener la energía de fractura crítica (G_{IC}) es mediante un ensayo TDCB empleando la *Simple Beam Theory* (SBT). Según las dimensiones estándares para la probeta, se puede llegar a una simplificación para la relación de cumplimiento con la longitud de la grieta.

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{E \cdot B} \left(\frac{3 \cdot a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \rightarrow m = \frac{3 \cdot a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \quad (17)$$

Al igual que en el ensayo DCB, m es una constante. Analizando la carga aplicada y la energía de la fractura respecto a la tensión axial, se puede llegar por diferentes esquemas a la ecuación que permite calcular G_{IC} .

El método SBT se basa en la expresión de cumplimiento (C), esta varía linealmente durante la propagación de la grieta. Como resultado, la relación dC/da es constante pudiéndose calcular el valor de G_{IC} de manera independiente de la longitud de la grieta (a):

$$G_{IC} = \frac{4 \cdot P_{max}^2}{E B^2} \cdot m \quad (18)$$

Se puede observar que aplicando la teoría SBT se obtienen las mismas ecuaciones para ambos esquemas (DCB y TDCB). Además, los parámetros ilustrados anteriormente son los mismos descritos en el cálculo de G_{IC} para el esquema DCB, pero m se corresponde con el factor de forma de la probeta.

Aplicando el modelo CBT para el esquema TDCB se obtienen diferencias de cálculo del G_{IC} . El análisis anterior considera las deflexiones de las vigas del sustrato debido al efecto de flexión y el cortante, pero no permite la deflexión y rotación de la viga para el cumplimiento de (dC/da) de la teoría. Por este motivo, se define el factor de forma (m) sin relación al término cortante.

$$m = \frac{3 \cdot a^2}{h^3} \quad (19)$$

Esta simplificación permite que las ecuaciones de flexión se integren fácilmente y permite proponer un esquema simple para tener en cuenta la rotación de la viga.

Siguiendo la referencia [16] se procede a explicar cómo se corrige la ecuación G_{IC} para la teoría CBT. El esquema TDCB permite probar fácilmente el modo I puro, la sección inicial de la viga no está perfilada, lo que permite perforar agujeros a través de los sustratos metálicos. Las vigas se fabrican de manera que el factor de geometría m , sea una constante. En la figura 10 se

muestra una viga con su notación. Debido a la discontinuidad del perfil de la viga en $x = x_0$, la teoría de la viga se ha aplicado a las dos secciones de la viga por separado. En primer lugar, la sección recta de la viga donde $0 < x < x_0$ y, en segundo lugar, la sección perfilada donde $x > x_0$. Si el desplazamiento vertical a lo largo de la viga está dado por $V(x)$, entonces:

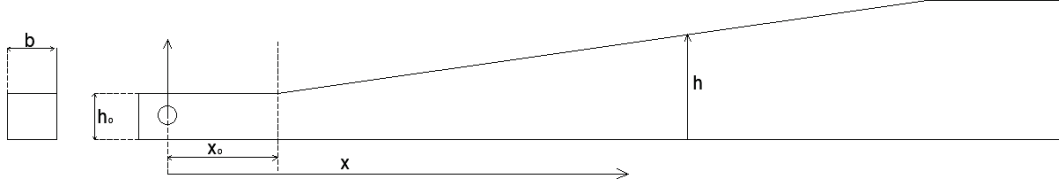


Figura 10. Referencia de Dimensiones para un Brazo de la Viga TDCB.

$$0 < x < x_0 \rightarrow \frac{dV}{dx} = \frac{4 \cdot m}{E \cdot B \cdot x_0^2} \left(\frac{P \cdot x^2}{2} + A_1 \right) \quad (20)$$

$$V = \frac{4 \cdot m}{E \cdot B \cdot x_0^2} \left(\frac{P \cdot x^3}{6} + A_1 \cdot x + C_1 \right) \quad (21)$$

$$x > x_0 \rightarrow \frac{dV}{dx} = \frac{4 \cdot m}{E \cdot B} (P \cdot \ln x + A_2) \quad (22)$$

$$V = \frac{4 \cdot m}{E \cdot B} (P \cdot (\ln(x) - 1) + A_2 \cdot x + C_2) \quad (23)$$

De las ecuaciones ilustradas anteriormente, los términos A_1 , C_1 , A_2 y C_2 son las constantes de integración para cada ecuación. Para el primer tramo ($0 < x < x_0$), se establecen unas condiciones de contorno de $x = 0$ y $V = u_0/2$ donde u_0 es el desplazamiento total para ambos brazos de la probeta TDCB. En el segundo tramo ($x > x_0$), se aplicaron como condiciones de contorno $x = a$ y $V = dV/dx = 0$, donde a es la longitud de la grieta.

Las constantes A_2 y C_2 se pueden definir de la siguiente manera:

$$A_2 = -P \cdot \ln a \quad (24)$$

$$C_2 = P \cdot a \quad (25)$$

Igualando las ecuaciones de V y dV/dx para $x = x_0$ permiten determinar las constantes A_1 y A_2 obteniendo una ecuación de V para el segundo tramo de:

$$V = \frac{u_0}{2} = \frac{4 \cdot m}{E \cdot B} \cdot P \left(a - \frac{2}{3} x_0 \right) \quad (26)$$

Como la ecuación del cumplimiento (C) fue definida como u_0/P , se puede escribir de la siguiente manera:

$$C = \frac{8 \cdot m}{E \cdot B} \cdot P \left(a - \frac{2}{3} x_0 \right) \quad (27)$$

Con la relación anterior se obtiene que entre el cumplimiento y la longitud de la grieta existe una relación lineal para $x > x_0$, pero no pasa por el origen. De esta manera tenemos dos comportamientos para la zona de la probeta antes de x_0 y después. En la figura que se ilustra a continuación, se puede apreciar como es el comportamiento del cumplimiento (C) para ambas zonas de la probeta TDCB.

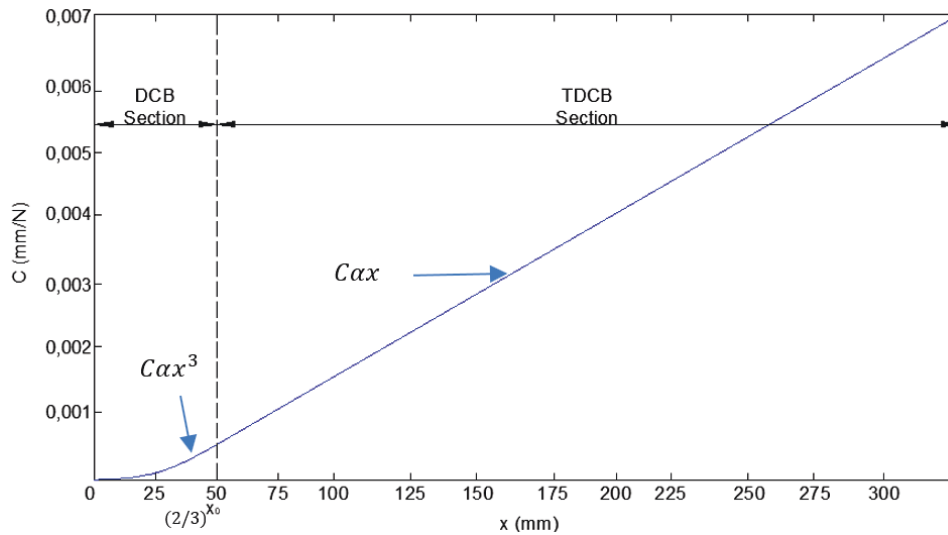


Figura 11. Comportamiento de C para esquema TDCB.

Analizado lo mencionado anteriormente, se debe de aplicar la corrección de la viga por la rotación. El tener en cuenta este efecto supone considerar un incremento de la longitud de la grieta conocido como Δ .

$$\Delta^4 = \frac{E \cdot B \cdot h^3}{3 \cdot k} \quad (28)$$

El termino de rigidez (k) se obtiene del material de la viga. En la referencia [16], expresa que el termino añadido de crecimiento de la viga se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 + \frac{h_a}{2 \cdot h} \cdot \frac{E}{E_a} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (29)$$

En este caso h_a y E_a son la altura y módulo de Young del adhesivo respectivamente y h y E son la altura y el módulo de Young del sustrato. El autor para simplificar el análisis reescribe la ecuación anterior añadiendo los siguientes parámetros adimensionales.

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 + \frac{R}{\lambda} \right)^{\frac{1}{4}} \rightarrow \lambda = 2h/h_a \quad R = E/E_a \quad (30)$$

Finalmente, estableciendo una relación entre la longitud de la grieta (a) y el termino de crecimiento añadido por el efecto de rotación (Δ) permite reescribir la ecuación del cumplimiento de manera que queda definida como:



$$C = \frac{8 \cdot m}{E \cdot B} \left(a + 0,64 \left(\frac{3}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot a^{\frac{2}{3}} - \frac{2}{3} \cdot x_0 \right) \quad (31)$$

Finalmente, si sustituimos en la ecuación anterior en la ecuación inicial de G_{IC} se obtiene la siguiente expresión:

$$G_{IC} = \frac{4 \cdot P^2}{E \cdot B^2} \cdot \left[1 + 0,43 \cdot \left(\frac{3}{m \cdot a} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (32)$$

Para este modelo, la normativa ISO 25217 no establece ninguna restricción de las dimensiones de la probeta, pero sí de la constante del factor de forma. Este factor debe de ser constante en el rango de longitudes de las probetas en las que se producirá la propagación de la grieta. Se recomienda un límite de variación del $\pm 3\%$ en metro.

Este método presenta la ventaja de conocer la energía de fractura por dos alternativas. La primera es conociendo la longitud de la grieta en el adhesivo y empleando las ecuaciones correspondientes, pero también es posible de obtener el valor de la energía de fractura directamente de las curvas $P-\delta$ cuando se emplean adhesivos con una elevada ductilidad.

Según la referencia [9], la norma ASTM es recomendada para usuarios inexpertos debido a que define los pasos a seguir y dimensiones de la probeta. Los usuarios con experiencias suelen emplear otras dimensiones para DCB y TDCB que también son adecuadas y en algunas ocasiones preferible para combinación de adhesivos y adherentes. Además, la norma ISO aporta información extra sobre los procesos de análisis en los ensayos.

Se puede mencionar que ambos métodos cumplen las condiciones de deformación plana pero el DCB requiere de la monitorización de la grieta. En ocasiones, cuando se analizan adhesivos muy dúctiles, dicha monitorización puede ser compleja y requiere emplear otros métodos (como es el caso del TDCB). En la referencia [17] se evalúan las diferencias entre estos dos métodos y llega a la conclusión que emplear el esquema TDCB no es adecuado cuando se evalúan adhesivos con el esquema *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) que se explica en el apartado 2.6 (Aplicación de la Integra J) más en detalle. Por lo contrario, es adecuada cuando se emplean adhesivos dúctiles el cual no es posible obtener una evolución de la grieta. De esta manera, se puede aplicar el modelo CBBM para determinar la energía de rotura en tracción en la que se produce el fallo de unión.

La referencia [18] emplea un modelo CZM para la caracterización del adhesivo del modo I puro empleando en la simulación numérica muelles para representar el proceso de delaminación. Trabajando con sistemas matriciales y asignando diferentes coeficientes de rigidez (más rígidos



en la aproximación de la punta de la grieta) es posible representar el ensayo, pero tiene como desventaja que la definición de la rigidez de los muelles no es sencilla.

2.3 Ensayo Modo II

El ensayo del modo II puro consiste en crear una carga longitudinal en ambas direcciones de manera que se active principalmente el esfuerzo cortante. Es un método que permite definir las características técnicas del material de los adhesivos. En este modelo, se pretende evaluar la energía cortante crítica (G_{IIC}).

La caracterización de uniones adhesivas empleando el ensayo del modo I ha sido comúnmente empleado. Sin embargo, el modo II todavía está en proceso de definición. Los modelos más comunes que podemos encontrarnos para el análisis del modo II son: el *End Notched Flexure* (ENF), el *End Loaded Split* (ELS) y el *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF). En este caso solo evaluaremos el modelo ENF.

Normativa respecto a pruebas del modo puro II en donde se evalúa la cizalla de la fractura (G_{IIC}), está disponible para el uso de materiales compuestos mediante la normativa japonesa (JIS 7086) y la europea (AECMA) las cuales han sido aplicadas de manera exitosa para uniones adhesivas. También se ha empleado de apoyo los artículos que han realizado un ensayo ENF para más información las referencias [11 y 19].

El ensayo ENF consiste en aplicar una carga en el centro de una viga superior, siendo el método más empleado para la caracterización de G_{IIC} . El problema es que presenta ciertos inconvenientes relacionados con la monitorización de la grieta debido a la inestabilidad. De hecho, en la caracterización de la fractura en modo II, la grieta tiende a cerrarse debido a la ubicación de la carga aplicada, el cual dificulta la visualización de la misma. Además, se obtiene una extensiva *Fracture Process Zone* (FPZ) delante de la punta de la grieta cuando se evalúan materiales dúctiles afectando la medición de la energía de la fractura. La FPZ es una región cerca de la punta de la grieta donde ocurren procesos inelásticos, como micro fisuración, micro deformación plástica, etc.

La carga se aplica con un peso cilíndrico el cual puede rotar libremente entre los extremos de la viga. Por tanto, la propagación de la grieta ocurre bajo las condiciones carga-deformación constante el cual asegura un crecimiento de la grieta estable. En la figura 12 se puede observar la probeta ENF.

De esta manera se está evaluando la integridad estructural de una unión entre dos superficies con el uso de adhesivo.

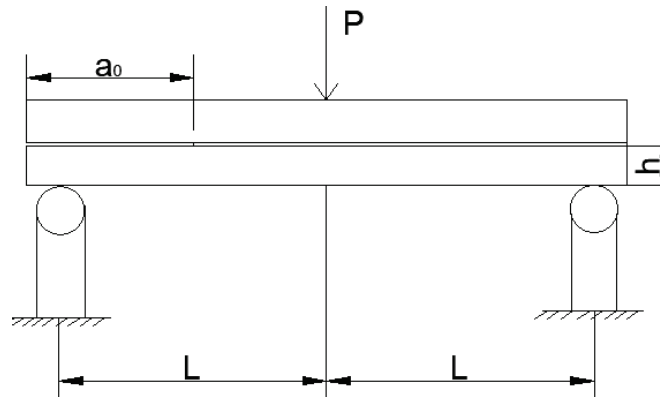


Figura 12. Características de un ensayo ENF.

Se puede obtener una expresión que permita determinar la energía de fractura del modo II empleando el modelo SBT. Esta se corresponde con la ecuación de Irwin-Keyes:

$$G_{II} = \frac{9 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot E \cdot h^3} \quad (33)$$

El inconveniente de emplear la ecuación anterior está en no contemplar el efecto cortante para el análisis. Las ecuaciones que permiten calcular G_{IIC} para este esquema se basan en el método CZM con la ecuación de Wang y Williams donde emplea el modelo CBT. Partiendo de la ecuación 10 donde B es el ancho de la probeta y $C = \delta/P$ es la expresión del cumplimiento. A partir de esta ecuación se van aplicando simplificaciones que permitan obtener una expresión que represente resultados aproximados y válidos de los ensayos. El modelo CBT propuesto por Wang y Williams fue el siguiente:

$$G_{IIC} = \frac{9 \cdot (a + 0,42 \cdot \Delta_l)^2 \cdot P^2}{16 \cdot B^2 \cdot h^3 \cdot E_1} \quad (34)$$

Donde E_1 es el módulo de Young axial del adhesivo, h es la altura hasta la mitad de la probeta (aplicación de adhesivo) y Δ_l es la corrección de la longitud de la grieta debido a la deformación cortante y se puede obtener con la siguiente expresión:

$$\Delta_l = h \cdot \sqrt{\frac{E_1}{11 \cdot G_{13}} \left[3 - 2 \cdot \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad (35)$$

Donde E_3 y G_{13} son el módulo transversal y cortante del adhesivo respectivamente. Γ se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\Gamma = 1,18 \cdot \frac{\sqrt{E_1 \cdot E_3}}{G_{13}} \quad (36)$$

Como se ha mencionado anteriormente, cuando se analizan uniones con adhesivos dúctiles, la monitorización de la grieta es más complicada y suele proporcionar errores en la caracterización de la energía de la fractura. Para ello, se suele emplear el esquema denominado *Compliance Based*



Beam Method (CBBM) el cual tiene como principio analizar la grieta equivalente. En el apartado 2.4 del documento se define este modelo de análisis.

Como se ha explicado en los apartados anteriores, emplear el modo I o II tiene el mismo objetivo (analizar las características mecánicas del material del adhesivo). A pesar de esto, las principales diferencias que se destacan son las tensiones analizadas. Para el caso del modo I se analiza la energía de la fractura observando la tensión en el sentido axial de la probeta y en el modo II es respecto a los esfuerzos cortantes. A pesar de esto, es posible emplear el esquema CBBM para ambos ensayos simplificando el análisis para los adhesivos dúctiles. Ambos ensayos son necesarios para definir las características del adhesivo.

Además de lo mencionado anteriormente, el ensayo del modo II suele implicar mayores errores (ej. efecto de los puentes de fibra) que en el modo I y se debe de tener en consideración para la toma de datos. A pesar de esto, el modo II puede ser un ensayo muy eficiente para el análisis de uniones entre materiales compuestos (es de los más empleados para este tipo de unión) en el cual se reducen los errores pudiéndose obtener mejores resultados comparado con un ensayo del modo I. En la referencia [20] se puede observar una comparación entre un ensayo del modo I y II para diferentes tipos de adhesivos.

2.4 Modelo CBBM

El *Compliance Based Beam Method* (CBBM) consiste en evaluar la energía de fractura para el modo I y II utilizando el concepto de grieta equivalente (a_e). Además, este método tiene en cuenta la energía disipada por FPZ y no requiere la monitorización de la grieta durante la monitorización de la prueba, siendo de apoyo para el análisis de adhesivos dúctiles.

El análisis del modo I y II con este esquema parten de la misma base, pero se calculan con diferentes expresiones debido a como ya se mencionó, el modo I se relaciona con las tensiones en el sentido axial (normal) y el modo II con el esfuerzo cortante.

Para calcular el *Strain Energy Release Rate* (SERR) en modo I se considera la viga teórica de Timonshenko y un adhesivo isotrópico para un esquema DCB. Teniendo en cuenta lo mencionado, se representan las ecuaciones necesarias para obtener G_{IC} .

$$G_{IC} = \frac{6 \cdot P_T^2}{B^2 \cdot h} \cdot \left(\frac{2 \cdot a_{eq}^2}{h^2 \cdot E_{eq}} + \frac{1}{5 \cdot G} \right) \quad (37)$$

Donde P_T , a_{eq} , E_{eq} , G , B , h son la carga aplicada del modo I (tracción), longitud de la grieta equivalente, modulo elástico equivalente y módulo cortante del adhesivo, ancho y altura respectivamente. Para obtener alguno de estos parámetros se debe de emplear las siguientes ecuaciones:



$$\alpha \cdot a_{eq}^3 + \beta \cdot a_{eq} + \gamma = 0 \quad (38)$$

Con la ecuación anterior se calcula la longitud de la grieta equivalente. Pero los valores de α , β y γ se obtienen con las tres expresiones siguientes:

$$\alpha = \left(\frac{8}{B \cdot h^3 \cdot E_{eq}} \right) \quad (39)$$

$$\beta = \frac{12}{5 \cdot G \cdot B \cdot h} \quad (40)$$

$$\gamma = -C_0 \quad (41)$$

$$a_{eq} = \frac{1}{6\alpha} \cdot A - \frac{2\beta}{A} \quad (42)$$

C_0 representa el cumplimiento inicial obtenido de la división entre la deformación inicial y carga inicial ($C_0 = \delta_{ti}/P_{ti}$). Este punto se corresponde con el VIS de la gráfica fuerza-deformación. Por último, falta definir el módulo elástico equivalente.

$$E_{eq} = \left(C_0 - \frac{12 \cdot (a_0 + |\Delta|)}{5 \cdot G \cdot B \cdot h} \right)^{-1} \cdot \frac{8 \cdot (a_0 + |\Delta|)^3}{B \cdot h^3} \quad (43)$$

De la ecuación anterior, $|\Delta|$ es el coeficiente de corrección de la longitud de la grieta. Se puede obtener con las ecuaciones 35 y 36 descritas anteriormente.

Llegados a este punto, se puede conocer las características del adhesivo para el modo I y obtener G_{IC} empleando el concepto de la grieta equivalente. Como se puede comprobar, consiste en una metodología muy simple y eficaz. Es utilizado por muchos investigadores y comparando los resultados experimentales con las formulaciones de este esquema, aportan resultados muy similares.

En este apartado se explica cómo obtener el *Strain Energy Release Rate* (SERR) para el modo puro II y definir el G_{IIC} . En este análisis se toma de referencia el esquema ENF. A continuación, se describe el proceso de cálculo.

$$G_{IIC} = \frac{9 \cdot P_C^2 \cdot a_{eq}^2}{16 \cdot B^2 \cdot E_f \cdot h^3} \quad (44)$$

Donde P_C , a_{eq} , E_f , G , B , h son la carga aplicada del modo II (compresión), longitud de la grieta equivalente, modulo elástico flexural y módulo cortante del adhesivo, ancho y altura respectivamente. Para obtener alguno de estos parámetros se debe de emplear las siguientes ecuaciones:

$$E_f = \frac{3 \cdot a_0^2 + 2 \cdot L^3}{8 \cdot B \cdot h^3} \cdot \left(C_0 - \frac{3 \cdot L}{10 \cdot G \cdot B \cdot h} \right)^{-1} \quad (45)$$

En esta ecuación, el $2L$ hace referencia a la toda la longitud de la viga de la probeta ENF. En este caso, la longitud de la grieta equivalente se calcula de la siguiente manera:

$$a_{eq} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} \cdot a_0^3 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) \cdot L^3 \right]^{1/3} \quad (46)$$

En la ecuación anterior, los términos C_{corr} y C_{0corr} hacen referencia a la corrección que debe de ser aplicada al cumplimiento del esquema C y el cumplimiento inicial del esquema (C_0). Estos términos se calculan de la siguiente manera:

$$C_{corr} = C - \frac{3 \cdot L}{10 \cdot G \cdot B \cdot h} \quad (47)$$

$$C = \frac{\delta_c}{P_c} \quad (48)$$

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3 \cdot L}{10 \cdot G \cdot B \cdot h} \quad (49)$$

De las ecuaciones anteriores, δ_c hace referencia a la deformación de compresión obtenida del ensayo del modo puro II. De esta manera, ya somos capaces de calcular el SERR normal y cortante correspondiente a cada modo puro (I y II).

Se recomienda visitar la referencia [21] en donde se explica en mayor detalle en qué consisten los ensayos CBBM, tipos de ensayos, para que se emplean y el objetivo de su uso.

2.5 Modo Mixto (I-II)

En muchas situaciones la carga aplicada origina una combinación de esfuerzos y tensiones de separación y efecto de cizalla. Esto significa que se produce una combinación de modos (I y II) simultáneamente en la punta de la grieta, lo que requiere un criterio de modo mixto para hacer frente a la propagación del daño. Varios autores han aplicado conceptos de mecánica de fracturas para pronosticar la fortaleza de las juntas adhesivas. La mayoría de estos trabajos se basaron en el concepto SERR (visto anteriormente). Sin embargo, cuando una grieta se propaga dentro de una junta adhesiva, los adherentes limitarán el crecimiento de la grieta en el modo I puro, lo que obligará a la grieta a propagarse en el modo mixto (I+II). Se necesitan criterios energéticos adecuados para hacer frente a esta propagación de grietas en modo mixto (I+II) [8]. Para establecer el modo mixto se realizaron una serie de pruebas con modelos puros I y II con el objetivo de relacionar las leyes cohesivas [22]. Las ecuaciones que se emplean se ilustran a continuación:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^\beta = 1 \quad (50)$$



Los coeficientes asignados con el subíndice “c” hacen referencia al valor crítico de la energía para ambos modos. Los exponentes α y β pueden tomar el valor de 1 o 2 en función de si el criterio a tomar es lineal o cuadrado respectivamente.

Existen varios ensayos propuestos en la literatura para caracterizar el comportamiento de las juntas adhesivas en modo mixto, sin embargo, la mayoría de ellos no están estandarizados. La prueba de *Single Leg Bending* (SLB) se basa en la prueba ENF, pero la viga inferior tiene una longitud menor, lo que da como resultado una extremidad sin apoyo que conducirá a un modo de apertura (modo I) y un modo de corte (modo II) simultáneamente. Otra prueba es el *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam* (ATDCB). Variando el espesor de los adherendos o la rigidez relativa, utilizando diferentes materiales, también es posible obtener un ensayo de modo mixto conocido como *Asymmetric Double Cantilever Beam* (ADCB). Otra prueba relativamente reciente es la *Crack lap shear* (CLS). Esta muestra tiene un grado de relación de modos cercano a 49° , que varía con la rigidez relativa de los adherentes.

Los métodos más empleados para evaluar los adhesivos usando un método mixto se explican a continuación de manera breve.

- *Mixed-Mode Bending* (MMB)

Este método es usualmente empleado para evaluar uniones adhesivas con materiales compuestos empleando la norma citada en la referencia [23] el cual permite determinar la rigidez a la fractura (G) siendo la única normativa disponible para evaluar la fortaleza de la unión del modo mixto. Este modelo consiste en combinar las pruebas del modo I y II puro.

- *Asymmetric Double Cantilever Beam* (ADCB)

En este modelo se siguen los mismos pasos que en el caso del modo I puro con DCB, pero ahora aplicando vigas asimétricas (diferente espesor o material entre los sustratos), permitiendo así, activar los dos modos.

- *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam* (ATDCB)

En este modelo se emplea la misma teoría y normativa que para el caso del TDCB, pero ahora el modelo es híbrido, consiste en aplicar una viga uniforme (como en el modelo DCB) y otra viga con espesor variante (como en el modelo TDCB). Es un modelo aparentemente reciente, se obtiene el valor de G aplicando la teoría viga de Euler-Bernoulli para formular la ecuación de cumplimiento (C) y G.



- *Single Leg Bending* (SLB)

Este modelo parte de la teoría empleada para el modo II puro con ENF con ciertas modificaciones. Requiere menos equipamiento y es más fácil de realizar el ensayo (comparado con el MMB).

Para obtener más información de cada uno de los esquemas vistos se recomienda visitar las referencias [6 y 9] en donde se detalla cada una de estas teorías con sus ecuaciones correspondientes para el cálculo de G_I o G_{II} y los procesos de análisis para estos casos.

2.6 Aplicación de la Integral J

El método *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) es aplicable cuando la zona de desarrollo de la fractura (FPZ) es muy pequeña en comparación con las dimensiones de la probeta (incluyendo la longitud de la grieta). En este caso, el FPZ es incorporado con una grieta universal y una tensión (también conocido como la zona dominante-K). El uso de esta estrategia para analizar una unión adhesiva se basa en conocer y evaluar directamente las leyes cohesiva del adhesivo el cual ha sido poco implementado en los análisis de investigación de referencia para el desarrollo de este trabajo. Se puede obtener más información en las referencias [22 y 24].

La integral J evalúa la longitud de la probeta para obtener conocimientos de las deformaciones y tensiones que se generan al tener en cuenta la combinación del modo mixto. A continuación, se representa la integral:

$$J = \int \phi dx_2 + \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds \quad (51)$$

Donde ϕ es la densidad de la energía elástica, σ_{ij} representa el tensor de tensión, u_i es el vector de desplazamiento, n_j es el vector normal del vector para la integral alrededor de Γ . En el trabajo no se empleará este método. Para obtener más información, visitar las referencias [22 y 24].

Este método puede ser implementado en los modos puros I y II en los esquemas ya vistos para obtener un análisis más específico de las leyes cohesivas para un modo específico. En la referencia [25] se emplea para analizar el modo II con un esquema ENF para obtener una mejor aproximación de la zona de evolución de la grieta y fenómenos de tensión en la probeta. Además, en la referencia [26] también se ha empleado el mismo método para analizar el modo puro I con un esquema DCB en donde define todos los parámetros del adhesivo con este esquema (LEFM).



2.7 Análisis con Elementos Finitos

El análisis de los elementos finitos (FEA) consiste en una técnica matemática que permite obtener soluciones aproximadas a problemas complejos de cuyas ecuaciones diferenciales de comportamiento no pueden obtenerse soluciones analíticas. Es una herramienta que pertenece al área de conocimiento de la mecánica de medios continuos para el estudio principal del comportamiento de estructuras [27]. Esto se consigue discretizando el problema en un número finito de pares “elementos” cuyo comportamiento queda especificado mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos (nodos). Dichos puntos permiten la unión de cada elemento con los contiguos. Además, deben de cumplir lo siguiente:

- La solución del sistema complejo sigue las reglas del problema discreto. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser expresiones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento del elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

Emplear este método permite simplificar notablemente los cálculos de comportamiento (deformaciones, tensiones, etc.) que se pueden obtener de elementos estructurales, por ello, es una técnica que lleva muchos años de investigación y existen diferente software como pueden ser: Simulia Abaqus, ANSYS, ABS, MAESTRO, etc. En el sector naval, la más empleada por experiencia es el software ANSYS debido a su gran capacidad de generar modelos y tipos de análisis. A pesar de esto, el software MAESTRO es específico del sector naval y permite realizar otros análisis como son: el buque viga (estático, dinámico), condiciones de varada, botadura, etc.

2.2.1 Pasos a Seguir para el FEA

Para realizar un análisis de elementos finitos y pasar de un medio continuo a un medio discreto con el fin de obtener una aproximación del comportamiento de la estructura se deben de seguir los siguientes pasos en el orden establecido [27]:

1. Comprensión del problema físico subyacente. Requiere de conocimiento previo por parte del usuario sobre la estructura o pieza que se va analizar. De esta manera, el usuario será capaz de entender el problema y resolver los pasos siguientes de manera lógica.
2. Determinación del modelo matemático. En este apartado el usuario tiene poca capacidad (o ninguna) de modificar la metodología implícita del modelo, pero si debe de conocer los factores de la estructura que intervienen en el cálculo (geometría, tipo material, etc.).



3. Discretización del medio continuo. En este apartado se realiza la discretización del medio continuo mediante un mallado (elementos y nodos). Es importante que el usuario conozca el nivel de mallado necesario para definir correctamente la estructura sin excederse a una malla muy fina donde el coste computacional se eleva.
4. Selección de la metodología computacional de resolución. Se define el análisis a efectuar de la estructura. Para ello, es necesario que el usuario conozca las excitaciones a las que estará sometida la estructura.
5. Resolución (cálculo numérico). Este apartado dependerá del software empleado y de que permita al usuario seleccionar el modo de resolución. Se basa en aquellas técnicas numéricas encaminadas a la resolución de las ecuaciones de equilibrio de la malla (Gauss-Seidel, Newmark, Newton-Raphson, etc.).
6. Análisis de Resultados. Es el paso más importante desde el punto de vista para el usuario, deberá de evaluar los resultados obtenidos y tomar la decisión sobre la validez de los resultados. Para esto, es necesario que el usuario conozca la naturaleza de la estructura y las reacciones que se aplican sobre esta.

Según lo mencionado hasta ahora, el objetivo de un FEA es transformar un problema de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, consiguiendo así la discretización del modelo. Para conocer lo que sucede en el interior del modelo discretizado, se emplean las funciones de forma que son valores conocidos de los elementos (con sus nodos). Se obtiene una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos, y depende del usuario conocer si son válidos o no los resultados obtenidos.

2.2.2 Aplicación para el Análisis de Uniones Adhesivas

La investigación sobre las propiedades y comportamiento de las uniones con adhesivos se lleva a cabo realizando ensayos de tracción y compresión para obtener las propiedades del adhesivo y a posteriori se realizan los modelos en software de análisis de elementos finitos (FEA) incluyendo las propiedades del adhesivo y se comparan los resultados. de esta manera se consigue la caracterización del adhesivo mediante un modelo específico (como puede ser el CZM).

Todos los artículos de referencia emplean el software Abaqus, pero en este caso emplearemos el software ANSYS Workbench siendo más utilizado en el sector naval y el cual incluye la información necesaria en su programación para la caracterización del adhesivo y su modelado. Una vez conseguido este objetivo, se puede modelar cualquier geometría del buque en el que se desee realizar una unión adhesiva.

Muchos investigadores dedicados al estudio de las uniones adhesivas emplean la mecánica de medios continuos para conocer la resistencia de dicha unión. Con la mecánica de medios



continuos se puede conocer las tensiones, deformación, la máxima carga que es capaz de soportar, características de fatiga, etc. de cualquier zona de la probeta y del adhesivo.

En todas las referencias consultadas, emplean un modelo mixto para el análisis de los adhesivos de manera numérica. Como ya se comentó anteriormente, para adhesivos que presentan una ductilidad elevada es aconsejable aplicar este método debido a que evalúa ambos componentes que aparecen en los ensayos y deben de ser considerados para caracterizar una unión adhesiva. Además, se emplea el modelo CZM trapezoidal para definir correctamente aquellos adhesivos que son aplicados con una superficie muy pequeña (inferiores a 0,5 mm) y presentan una ductilidad elevada.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se realiza un estudio experimental de una unión adhesiva aplicando dos ensayos para caracterizar el material (*Bulk* y TAST) y analizar las propiedades cohesivas del modo I (TDCB) y mixto (SLB) con el objetivo de conocer las características técnicas del adhesivo como son: módulo elástico, gráfica de relación carga-deformación, módulo cortante del adhesivo (G), etc. y junto con los valores iniciales de la probeta se calculará la energía crítica de fractura (G_I y G_{II}).

Para evaluar el modo I (de tensión), se emplea el esquema TDCB siendo el más apropiado para evaluar la energía de rotura en adhesivos dúctiles. Para el modo II (de cortante), el esquema inicial a emplear es el ENF, de modo que permite obtener la energía de rotura en cizalla. Como el adhesivo en estudio es muy dúctil, será necesario emplear otro método para evaluar la energía de rotura del modo II, siendo el esquema mixto SLB el más apropiado en estos casos.

3.1 Selección del Adhesivo

Para unir dos sustratos metálicos se ha empleado un tipo de adhesivo dúctil bicomponente de la marca SIKA. Concretamente SikaFast-5211 NT (*New Component*). Para su implementación en el sector naval se deben de realizar una serie de pruebas con el fin de asegurar las cargas que debe de soportar, las condiciones atmosféricas, su durabilidad a lo largo del tiempo (ciclo de vida del buque), la fatiga a la que estará sometido, etc.

En la tabla 2 se muestran las propiedades del adhesivo suministradas por el fabricante.

Propiedades del Adhesivo	
Propiedades	Bicomponente de rápido curado
Base Química	Acrilato
Relación de la mezcla (por volumen)	10:1
Densidad de Mezcla	1,19 kg/l
Módulo de Young (E)	250 N/mm ²
Resistencia al Corte	10 N/mm ²
Temperatura de Servicio	$-40^{\circ}C \leq T \leq 80^{\circ}C$
Tiempo de Fijación	9 min

Tabla 2. Propiedades del adhesivo SikaFast 5211 NT.

3.2 Aplicación del Adhesivo Sobre los Sustratos

En este apartado se explica el proceso de aplicación del adhesivo en estudio sobre los sustratos con el fin de realizar la unión que se pretende caracterizar. Para ello, se visitaron las instalaciones (laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol) para disponer de los equipos adecuados y efectuar una correcta adhesión. En la aplicación del adhesivo estaba presente la tutora Dr. Ana Álvarez (tutora), una ingeniería química y mi persona. A continuación, se describe el proceso de aplicación del adhesivo.

Las 5 probetas generadas cumplen con las dimensiones estándares según las normas ASTM D3433 y la ISO 25217 para cada tipo de ensayo (TDCB y SLB). El proceso de aplicación del adhesivo es el mismo para todas las probetas independientemente del tipo de ensayo, por este motivo, se representarán figuras de las probetas con esquema SLB.

El primero paso consiste en limpiar las probetas por las caras de aplicación del adhesivo y en el lado opuesto. Para ello, se emplea acetona y papel multiuso estableciendo como criterio el limpiar cada superficie hasta que no se aprecie ninguna suciedad en el papel. Este paso es importante debido a que, en caso de suciedad, el adhesivo no se adhiere correctamente a la superficie de los sustratos, atrapando la suciedad y obteniendo menor capacidad de adhesión conllevando a peores resultados en el ensayo. En la siguiente figura se puede observar una fotografía de las probetas una vez limpiadas.

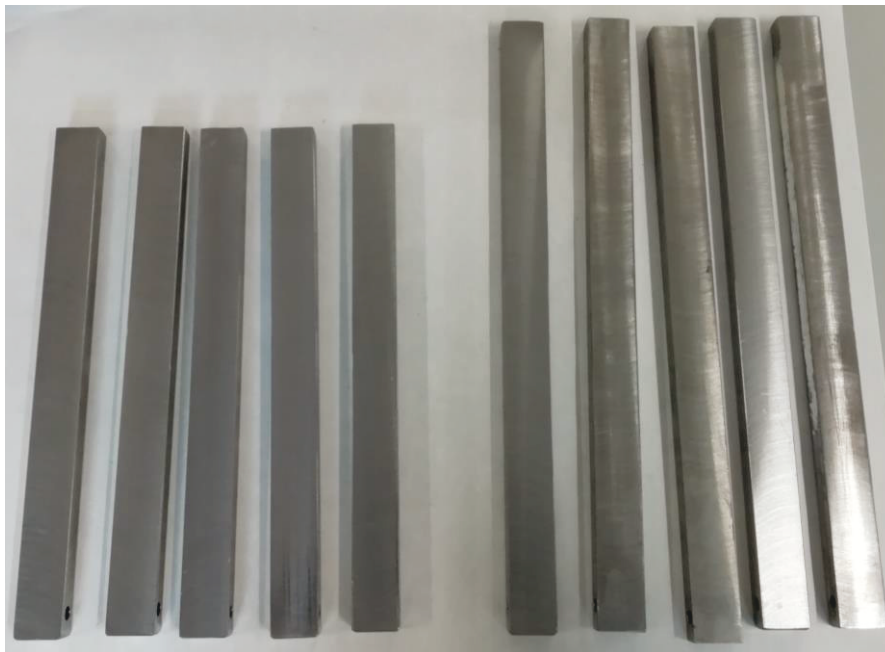


Figura 13. Limpieza de los sustratos.

El siguiente paso consiste en realizar dos marcas a cada probeta (con un marcador permanente) en los laterales (donde no se aplica adhesivo) de manera que se identifiquen las zonas en donde no se aplica adhesivo y, además, indicando la posición a la que se debe de aplicar los

rodillos de apoyo (para el ensayo SLB). Para tomar las medidas se emplearon un metro y una regla métrica. La zona de no aplicación del adhesivo en la probeta de menor longitud tiene una distancia de 25 mm y en la probeta de mayor longitud se realiza una marca desde el extremo con una distancia de 101 mm. Se ilustra una figura de lo mencionado:



Figura 14. Marcas en los sustratos.

Dichas marcas permiten identificar la zona de aplicación de la cuchilla para generar la pre-grieta inicial. Dichas cuchillas requieren de ser cubiertas con una capa fina de cinta adhesiva de foam y dejar una superficie muy pequeña de la cubierta de la cuchilla al descubierto para generar la pre-grieta.

Como ya se mencionó anteriormente, el adhesivo aplicado es el SikaFast-5211 NT bicomponente con una relación entre componente del 10:1 por volumen. También se emplea un activador que permita mejorar la adherencia entre el sustrato y adhesivo (el activador es el Sika Aktivator-205). Además, se emplea una pistola hidráulica que permite realizar una rápida aplicación del adhesivo sobre el sustrato. A continuación, se representan las figuras en donde se puede observar la botella del activador, la pistola y el cartucho del adhesivo.



Figura 15. Activador y cartucho del adhesivo.



Figura 16. Pistola.

Primero se aplicó el activador sobre las superficies en donde se pretende aplicar el adhesivo para mejorar la adherencia. Su aplicación se ha realizado con papel multiuso. Una vez aplicado, se debe esperar 15 minutos para el secado. Posteriormente, se aplica el adhesivo con la pistola sobre la superficie de las probetas y estableciendo la unión entre ambas vigas metálicas, de manera que no se mueva la cuchilla. En la siguiente figura se puede observar las probetas después de realizar la unión.



Figura 17. Adhesivo aplicado.

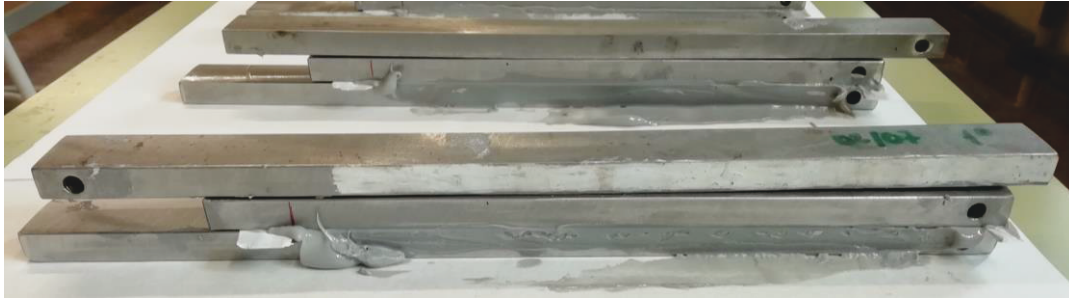


Figura 18. Secado del adhesivo.

Finalmente se limpia el adhesivo sobrante que ha escurrido antes del secado. Llegados a este punto, se culmina el proceso de aplicación. Antes de realizar los ensayos, se requiere 1 semana de secado, para asegurar una correcta unión entre los sustratos. En la figura anterior se puede observar que se ha empleado otra viga para ejercer presión en la unión durante el secado.

3.2.1 *Despegado*

En este paso del ensayo se pretende representar el estado del adhesivo una vez despegados los sustratos después de los ensayos. Esto permite conocer si la aplicación del adhesivo fue correcta y con el fin de identificar si hubo una rotura cohesiva o adhesiva. Una rotura adhesiva se obtiene cuando al separar los sustratos observamos que en sus paredes obtenemos partes del adhesivo pegado, aproximadamente uniforme en ambos sustratos, de modo que, indica que la aplicación del adhesivo fue correcta. Por lo contrario, una rotura cohesiva es aquella en la cual, al separar los sustratos, el adhesivo se encuentra adherido a una única pared, de modo que indica que la aplicación del adhesivo fue incorrecta y los resultados podrían no ser válidos.

Como se puede comprobar en la figura 20, para los ensayos del SLB se obtuvo en su mayoría una rotura adhesiva (3 ensayos de 5). A pesar de esto, se emplearon los valores obtenidos de todos los ensayos para el cálculo de las energías de fractura del modelo mixto. En todos los ensayos del TDCB se obtuvo una rotura adhesiva, de modo que las gráficas obtenidas de los 5 ensayos son más similares y permitirá obtener una mayor similitud y aproximación en los cálculos.



Figura 19. Estado de la superficie del ensayo del TDCB.

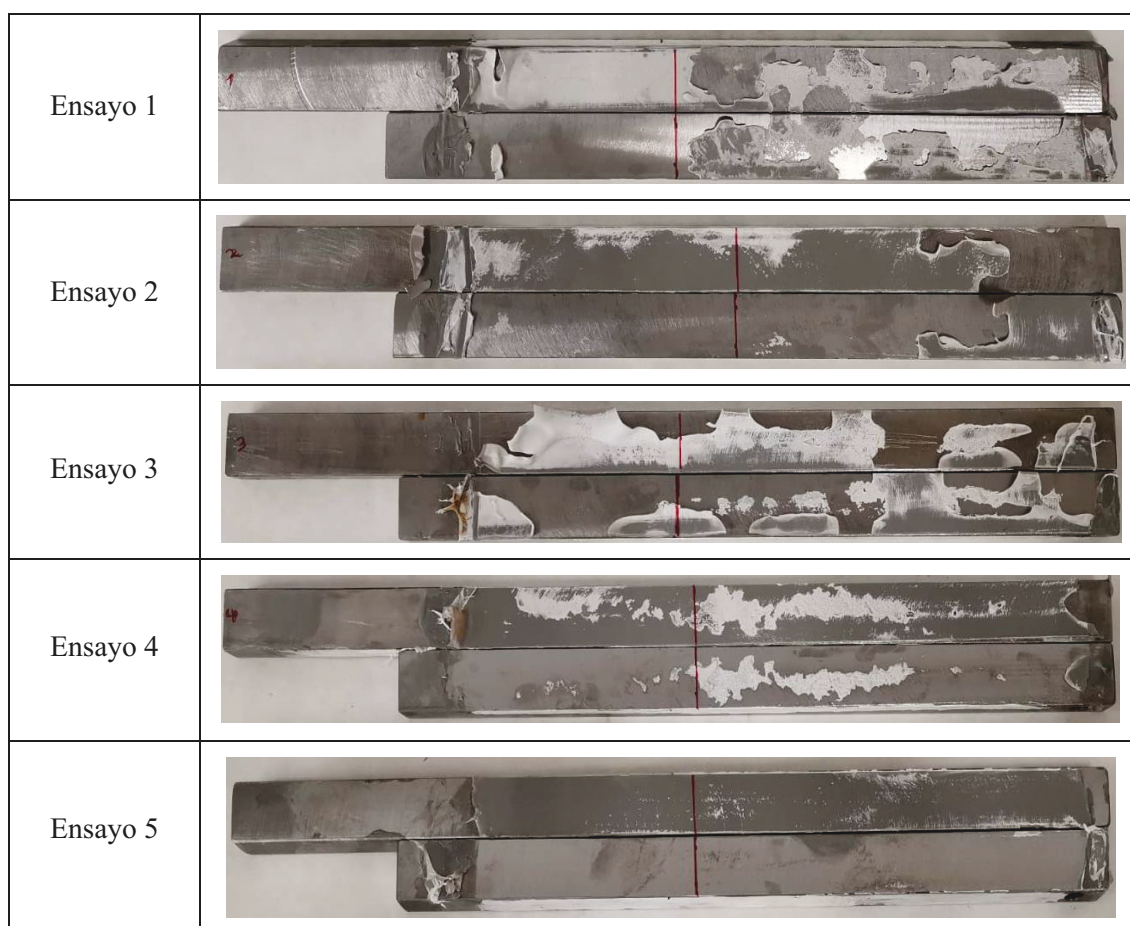


Figura 20. Estado de la superficie del ensayo SLB.

3.3 Pruebas Realizadas

Como ya se ha comentado anteriormente, las características del material del adhesivo se obtienen partiendo de los ensayos *Bulk* y TAST. Esta información fue proporcionada por la empresa SIKA y los parámetros más relevantes se ilustran en la siguiente tabla:

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	1200	kg/m ³
Material de Elasticidad Isotrópico		
Módulo de Young	250	MPa
Coefficiente de Poisson	0,43	
Otros Parámetros		
Tensión de contacto normal Máximo	12	MPa
Resistencia a la Tracción	5,06	MPa
Resistencia Máxima a la Tracción	7,22	MPa
Resistencia Cizalla	10	MPa

Tabla 3. Resultados proporcionados por el fabricante.



3.3.1 Ensayos G_I y G_{II}

Conociendo los parámetros iniciales para caracterizar el material del adhesivo, se procede al cálculo de las energías críticas de fractura para el modo I y II. Estos valores se obtendrán mediante los ensayos TDCB (modo I puro) y del SLB (modo mixto I-II).

En este apartado se pretende describir los pasos seguidos y las peculiaridades obtenidas de los ensayos. Se utilizaron las normas ISO 25217 y la ASTM D3433. Estas normas especifican las dimensiones de la probeta, la manera de aplicar la carga para cada ensayo y como interpretar los valores de la gráfica $P-\delta$.

De los ensayos experimentales (TDCB y SLB) se obtiene la energía de fractura crítica para el modo I y el modo II (G_I y G_{II}) del adhesivo. A los resultados obtenidos con estos ensayos se les aplican tres modelos (SBT, CBT y CBBM) explicados anteriormente los cuales consisten en emplear una ecuación evolutiva para obtener el valor de la energía. Con esta información, el adhesivo estaría completamente definido en cuanto a sus propiedades y características del material.

Las normativas mencionadas permiten definir el procedimiento del ensayo experimental a realizar y los equipos apropiados. A continuación, se mencionan los equipos que deben de emplear:

- Máquina de tracción/compresión. Debe de ser capaz de ejercer una deformación constante entre una ratio de 0,1 mm/min y 5 mm/min. Además, debe de tener la capacidad de aplicar la carga en los bloques directamente o a través de los orificios.
- Microscopio móvil o cámara de vídeo. Debe de ser capaz de grabar y medir la longitud de la grieta y su propagación con un error máximo de $\pm 0,5$ mm.
- Micrómetro o pie de rey. Este instrumento se emplea para medir el espesor de las probetas con una precisión adecuada (máximo error de $\pm 0,5$ mm).
- Por último, se debe de disponer de un espray de pintura blanca.

En resumen, para determinar la energía crítica (de rotura) del adhesivo es necesario realizar un ensayo de tracción con el DCB y/o el TDCB y además un ensayo de cizalla con el esquema ENF y/o SLB. En este trabajo, se realizó el ensayo del ENF, pero no se obtuvieron resultados adecuados debido a la ductilidad del adhesivo. Por este motivo, se decide aplicar el esquema SLB (mixto) permitiendo obtener el G_I (energía de rotura en tracción) y G_{II} (en cizalla).

En los ensayos SLB se obtendrán ambas energías de rotura (de tracción y cizalla) y presentan una variación en magnitud respecto a las energías que se obtendrían del modo puro generado por un ángulo de desfase.

3.3.2 Ensayo TDCB

Como ya ha mencionado anteriormente, se ha decidido emplear el ensayo TDCB debido a la ductilidad del adhesivo en estudio y la dificultad de observar el crecimiento de la grieta. Además, se trabaja directamente con los resultados obtenidos de la gráfica de fuerza-deformación para obtener los valores de las energías de fractura crítica.

Las dimensiones empleadas para la probeta TDCB se representan en la siguiente figura:

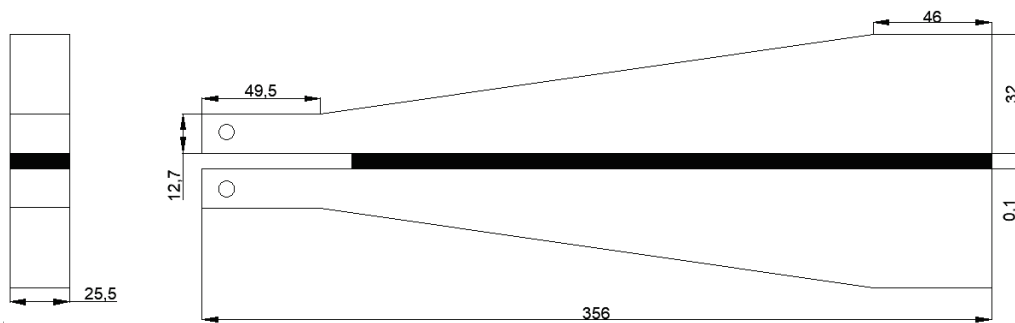


Figura 21. Dimensiones de la probeta TDCB

En el apartado 2.2 se han descrito las características sobre este ensayo y las ecuaciones que se deben aplicar. A continuación, se muestran fotografías y se realizan comentarios de los ensayos realizados. Las condiciones de contorno en el ensayo son: empotrado en la viga inferior por uno de los orificios y en el orificio opuesto se aplica la carga de tracción. De esta manera se consigue el despegado y desarrollo de la grieta. Para la aplicación de la carga, las probetas poseen dos orificios en donde será el lugar de aplicación. En las figuras 22 y 23 se puede observar la probeta TDCB en la máquina de tracción.



Figura 22. Ensayo TDCB antes de aplicar la carga.



Figura 23. Ensayo TDCB después de aplicar la carga.

Como el adhesivo empleado es muy dúctil, no se pudo ver la evolución de la grieta a pesar de emplear una cámara de alta resolución. Esto significa que no es posible determinar la energía de rotura con las ecuaciones básicas. A pesar de este inconveniente, se puede conocer la energía de rotura de la grieta con los resultados de las gráficas obtenidas de $P-\delta$ empleando la a_e (a equivalente). Finalmente, indicar que se emplean los tres modelos descritos anteriormente (SBT, CBT y CBBM) para obtener el valor de la energía de fractura crítica.

Durante el ensayo no se tomaron medidas de la propagación de la grieta porque no fue posible, debido a la ductilidad del adhesivo. Esto dificulta la obtención de la longitud equivalente a_e . Por otra parte, indicar los tres modelos se calculan utilizando la longitud equivalente y las ecuaciones empleadas para el cálculo de las energías se corresponden con la 18, 32 y 37 descritas anteriormente.

La diferencia al emplear los tres esquemas anteriores radica en las simplificaciones que se efectúan al realizar el análisis del adhesivo. El método SBT no tiene en cuenta los esfuerzos cortantes que se producen en el proceso de delaminación ni los efectos de la concentración de tensión que se produce en la punta de la grieta, por lo contrario, el método CBT sí que tiene en cuenta los esfuerzos cortantes y suele presentar una mayor precisión en los resultados. En cualquier caso, los dos métodos anteriores requieren de la supervisión del desarrollo de la grieta en los ensayos experimentales, situación que no se ha podido cumplir debido a la ductilidad del adhesivo se ha empleado la longitud de grieta equivalente en su lugar calculada por formulación.

Existen otros métodos que permiten obtener una aproximación del valor de la energía de fractura como puede ser el CCM. Este método se ha decidido no utilizar en este modelo debido a que es el más básico y no tiene en cuenta ninguno de los efectos mencionados anteriormente siendo además el que presenta mayores errores de aproximación en todos los artículos tomados de referencia [11-13].

Finalmente, el modelo CBBM presenta la ventaja de utilizar el concepto de la grieta equivalente el cual no requiere de supervisión continua de la grieta. Es un método que solo depende de las características y medidas que se tomen para realizar el ensayo y que tiene en cuenta los esfuerzos cortantes y la concentración de tensión generada en la punta de la grieta.

En la fase experimental se realizaron 5 ensayos para el modelo TDCB cuyas curvas de fuerza-deformación se pueden ver en la figura 24. Además, en la misma figura se puede ver que la reproductibilidad de los resultados es buena.

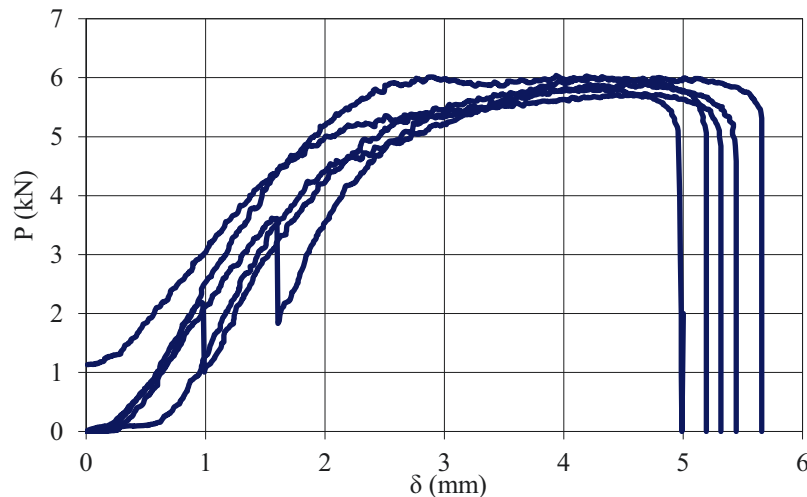


Figura 24. Ensayos TDCB

Con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales TDCB ilustrados en la figura 24, se calcula la grieta equivalente (a_e). Para ello, se empleará la formulación correspondiente al modo I (TDCB) obtenida de las referencias [13 y 28]. Una vez obtenida la gráfica P- δ , se aplican los modelos SBT, CBT y CBBM de modo que se calculan los valores de la energía de rotura (G_I) del modo I para cada uno. Las ecuaciones de cada modelo (SBT, CBT y CBBM) fueron descritas en el apartado anterior.

El cálculo se inicia determinando el factor de forma de la probeta (h) empleando la siguiente ecuación:

$$h = h_0 + d \quad (52)$$

Donde:

h_0 : altura de una de las barras de la probeta en el tramo de menor altura.

d : se obtiene con la ecuación: $d = (h_c - h_0)/e$

h_c : altura de una de las barras de la probeta en el tramo de mayor altura.

e : distancia horizontal desde el inicio de la barra de menor altura hasta el final de la pendiente en la barra.

Obtenido la a_c y empleando las formulaciones de los modelos SBT, CBT y CBBM se procede a calcular las R-curves.

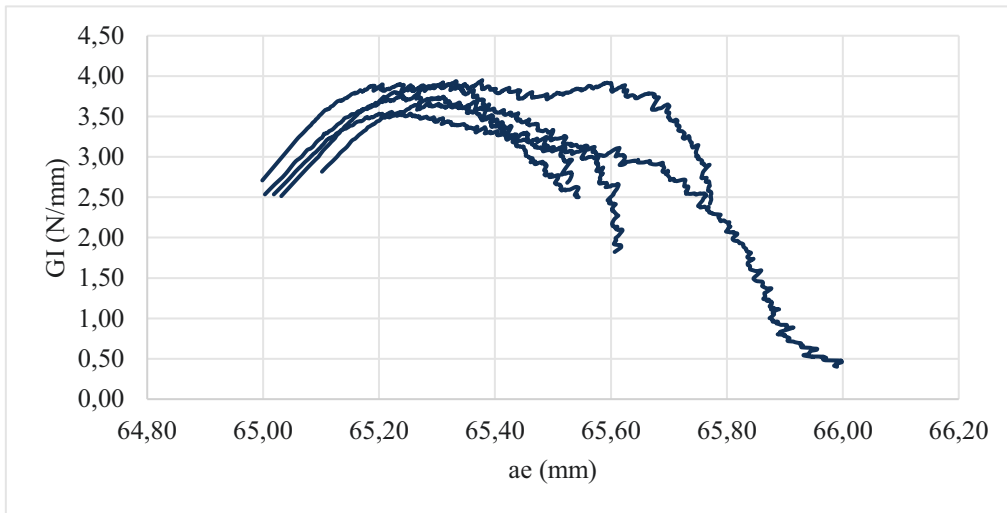


Figura 25. R-Curves empleando el método CBT.

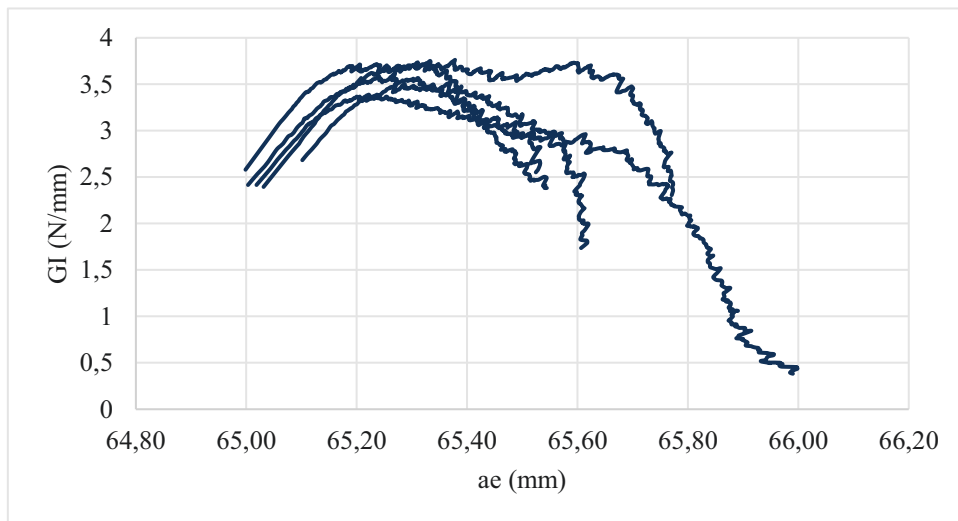


Figura 26. R-Curves empleando el método SBT.

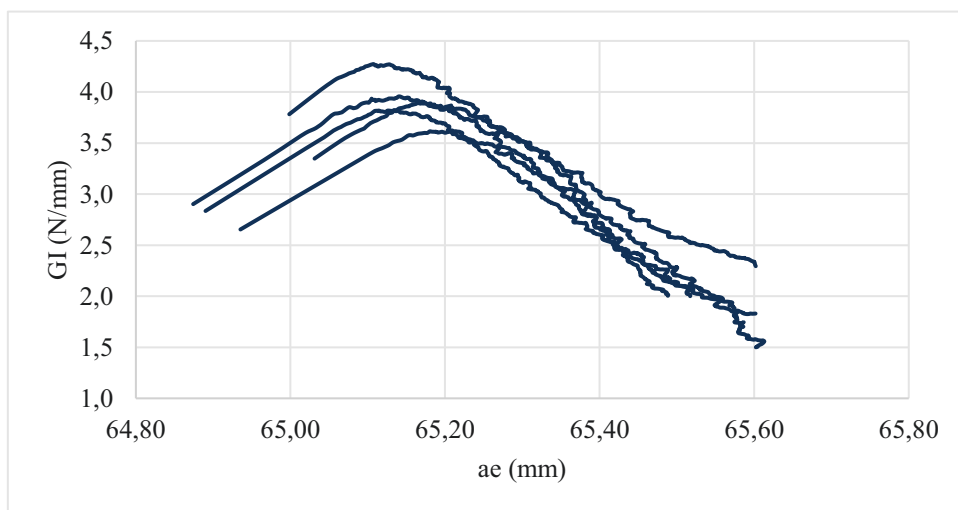


Figura 27. R-Curves empleando el método CBBM.

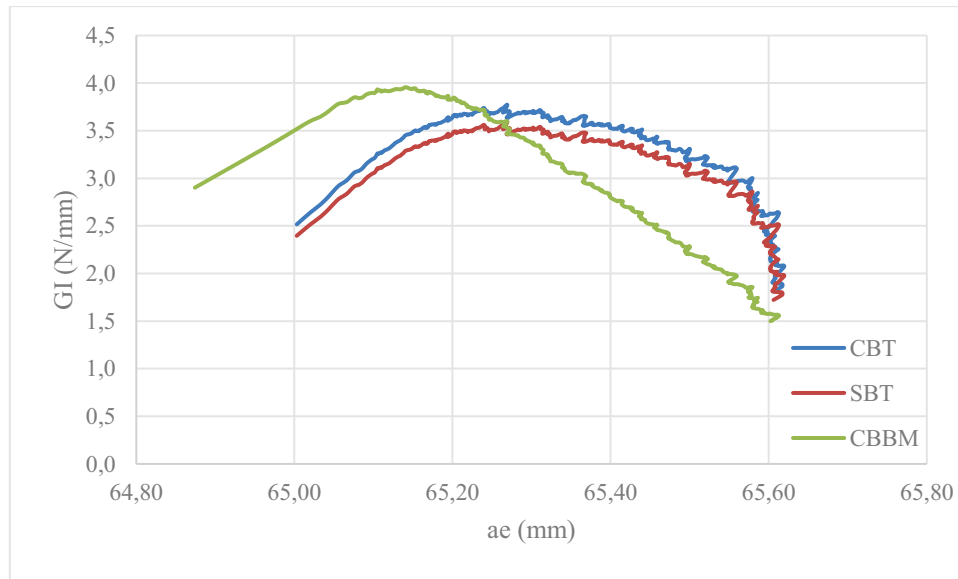


Figura 28. Resumen R-Curves.

De las gráficas anteriores (figura 25, 26 y 27) se puede observar el valor de energía crítica de cada método empleado para cada ensayo. Partiendo de los resultados obtenidos, en la figura 28 se observan que los valores de energía han sido similares en los tres métodos para un intervalo de grieta equivalente similar.

En la tabla 4 se pueden observar los resultados de energía crítica del modo I obtenidos para cada ensayo, ilustrando también el valor medio de los 5 ensayos y la desviación obtenida.

Ensayo	CBT (N/mm)	SBT (N/mm)	CBBM (N/mm)
1	3.41	3.25	3.57
2	3.65	3.47	3.79
3	3.76	3.63	3.73
4	3.77	3.59	3.99
5	3.54	3.37	3.50
Media	3.63	3.46	3.72
Desviación	0.15	0.16	0.19

Tabla 4. Valor de G_I .

El valor de energía crítica de rotura para el modo I (G_I) que se va a manejar en el modelo CZM es de 3,58 N/mm. Para la simulación se va a utilizar el software comercial ANSYS y el modelo CZM.

3.3.3 Ensayo ENF

Las características del ensayo fueron mencionadas en el apartado 2.3 con el fin de describir las singularidades obtenidas. En este ensayo se considera la probeta apoyada sobre dos rodillos y próximos a los extremos, aplicando la carga en el centro de la probeta. Las condiciones de contorno son apoyos superficiales entre los rodillos y sustrato inferior (observar figura 29).



Figura 29. Ensayo ENF antes de aplicar la carga.

Como ya se ha comentado, el ensayo ENF se descarta porque no proporciona datos debido a que el adhesivo es muy dúctil. Por tanto, se tuvo que buscar otro ensayo que permitiese caracterizar la grieta del adhesivo y por eso se realizó el SLB.

3.3.4 *Ensayo SLB*

El ensayo fue descrito brevemente en el apartado 2.5. Este ensayo fue propuesto por Yoon Hong, partiendo del ENF y presenta la ventaja de requerir menos equipos y aplicar procedimientos experimentales más sencillos para la realización del ensayo. El esquema a seguir para el ensayo SLB se ilustra en la figura 30 donde se observa la similitud respecto al ensayo ENF. Las dimensiones empleadas para la probeta SLB se representan en la siguiente figura:

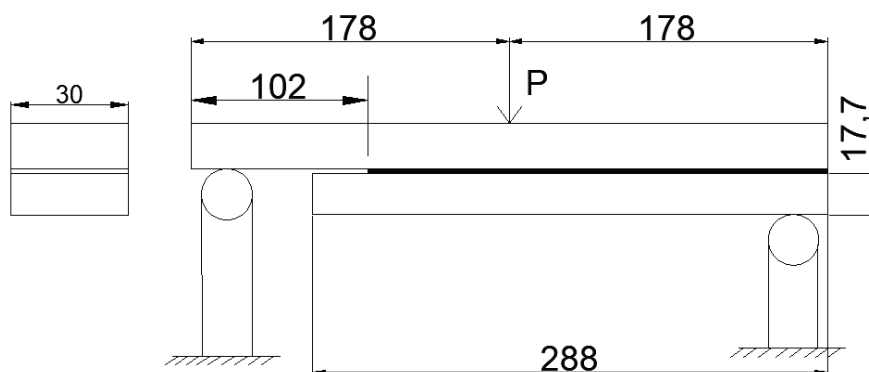


Figura 30. Ensayo SLB.

Durante el ensayo, se obtiene una distribución de tensión en los dos planos del eje (X e Y) generado por la ubicación de los apoyos que no están aplicados en la misma viga. Esto permite que el ensayo sea en modo mixto. A continuación, se muestra una imagen del ensayo SLB en el laboratorio de mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

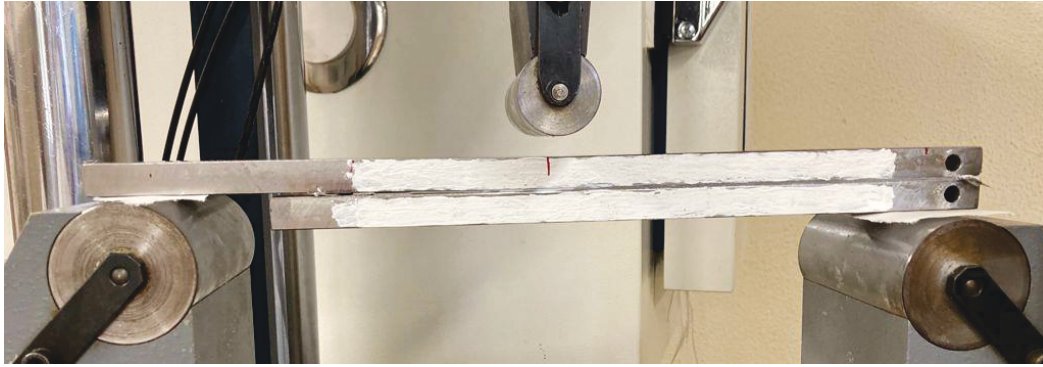


Figura 31. Ensayo SLB en Laboratorio.

La formulación a emplear tiene en cuenta el efecto de Saint Venant, efecto cortante, viga elástica, y deformación cortante en el extremo de la grieta. De modo que la energía de fractura se calcula de la siguiente manera [29]:

$$G_I = \frac{12 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{a} \right) + 0,31 \left(\frac{h}{a} \right)^2 + 0,32 \left(\frac{h}{a} \right) \cdot \left(\frac{E}{G} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^2 \cdot \left(\frac{E}{G} \right) \right] \quad (53)$$

$$G_{II} = \frac{12 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} \cdot \left[1 + 0,218 \left(\frac{h}{a} \right) \cdot \left(\frac{E}{G} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^2 \cdot \left(\frac{E}{G} \right) \right] \quad (54)$$

La energía total se obtiene con la siguiente ecuación que es equivalente a sumar las dos anteriores:

$$G_T = \frac{21 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} + \frac{P^2}{16 \cdot b^2 \cdot h \cdot k \cdot G} + \frac{P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} \cdot \left[5,42 \left(\frac{h}{a} \right) + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (55)$$

Los mismos autores propusieron otra estrategia de cálculo basándose en la teoría de viga que solo tiene en cuenta el efecto cortante y la elasticidad de la viga. De esta manera se obtendría con las siguientes ecuaciones.

$$G_I = \frac{12 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} + \frac{P^2}{16 \cdot b^2 \cdot h \cdot k \cdot G} + \frac{P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} \cdot \left[5,42 \left(\frac{h}{a} \right) + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (56)$$

$$G_T = \frac{9 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E} \quad (57)$$

$$\left(\frac{G_I}{G_T} \right) = \frac{4}{3} + \frac{1}{9} \cdot \left[\frac{1}{k} \cdot \frac{E}{G} \left(\frac{h}{a} \right)^2 + 5,42 \left(\frac{h}{a} \right) + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (58)$$

Donde $k = 5/6$ (factor cortante de corrección).

Para este ensayo se empleará únicamente la formulación de Saint Venant el cual tiene en cuenta mayores factores que intervienen en el ensayo correspondiendo al modelo CBT.

Además, se debe considerar que los resultados que se obtengan del modo I no se pueden comparar directamente debido a que es necesario aplicar un ángulo de desfase con relación al modo puro. La ecuación empleada para obtener el ángulo de desfase es el siguiente:

$$\alpha = \operatorname{atn}\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (59)$$

Posteriormente se calcula la energía total empleando la siguiente ecuación que tiene en cuenta dicho desfase.

$$GBK = G_I + (G_{II} - G_I) \cdot \frac{\alpha}{90} \quad (60)$$

En esta investigación no trabajamos con la energía total del modelo mixto, dotando de mayor importancia las energías obtenidas del modo I y II individualmente que permiten caracterizar el modelo CZM del adhesivo.

Se han realizado nuevamente 5 ensayos del *Single Leg Bending* (SLB) con representación gráfica de la fuerza-deformación. Nuevamente se realiza el proceso de cálculo de la grieta equivalente y la energía de fractura crítica para el modo I y II.

El modelo SLB representa el G_{IC} (eje y) del modo I y G_{IIC} (eje x) del modo II empleando un modelo mixto con un ángulo α (40° - 30° aproximadamente) respecto a la energía de rotura. Los modelos mixtos presentan valores de energía crítica de rotura para el modo I y II más bajos comparados con los modos puros respectivamente. Al activar simultáneamente dos modos de rotura, la capacidad de resistencia del adhesivo disminuye como es de esperar, por tanto, para comparar los resultados obtenidos se debe de realizar una transformación.

A continuación, se representa la gráfica de tensión-deformación de los 5 ensayos SLB realizados en el laboratorio de mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

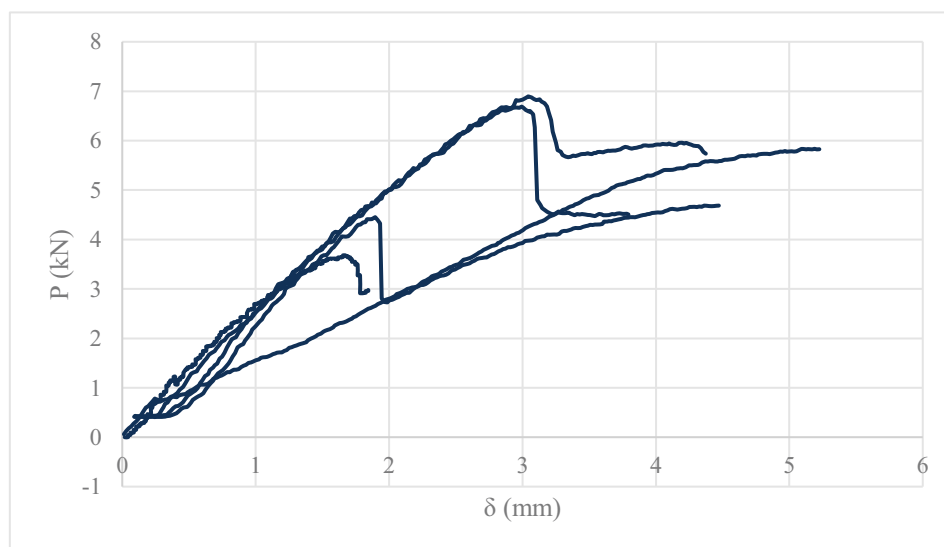


Figura 32. Tensión-deformación del ensayo SLB.

Obtenida la representación gráfica, se procede a generar las R-curvas. Estas curvas consisten en representar gráficamente el G_{IC} y G_{IIC} frente a la evolución de la grieta equivalente (a_e).

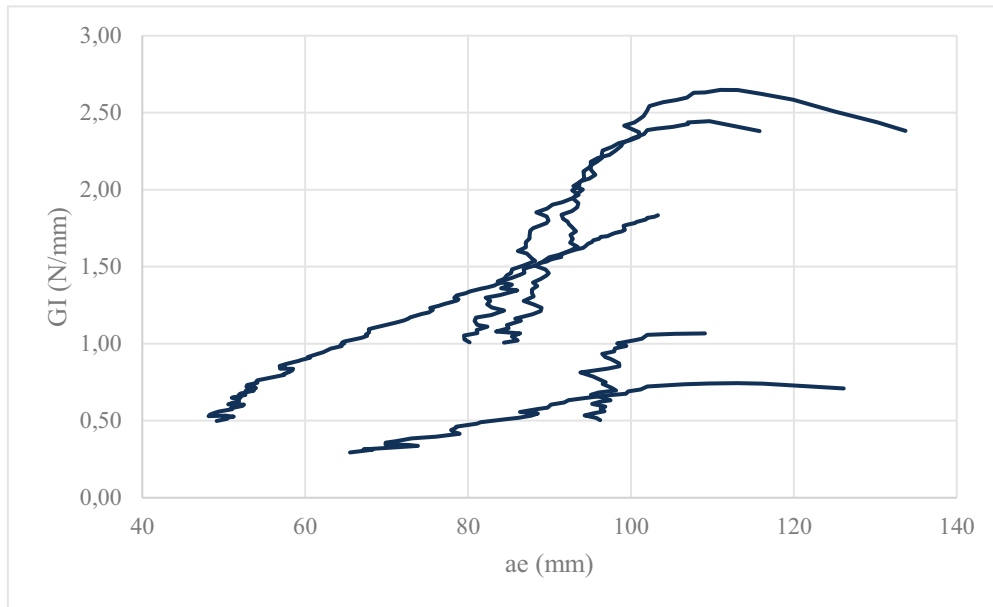


Figura 33. R-Curves para el modelo SLB-G_I.

Como se puede comprobar de la figura 33, los resultados obtenidos son menores respecto al ensayo en modo puro TDCB. Partiendo del análisis de resultados del modo I, se consideran válidos los resultados obtenidos.

En la figura 34 se representan las R-curvas para el modo II del ensayo SLB.

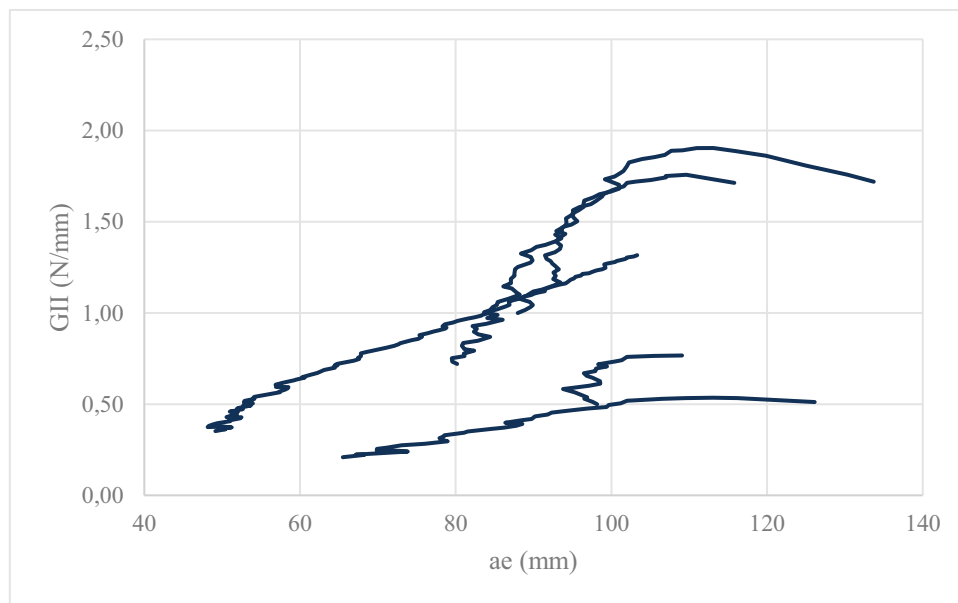


Figura 34. R-Curves para el modelo SLB-G_{II}.

Los resultados obtenidos del modo II son menores respecto a los que se obtendrían de un ensayo puro del mismo modo. Se utilizan estos datos para determinar el valor de la energía de fractura de rotura en cizalla (G_{II}) para un modelo mixto.

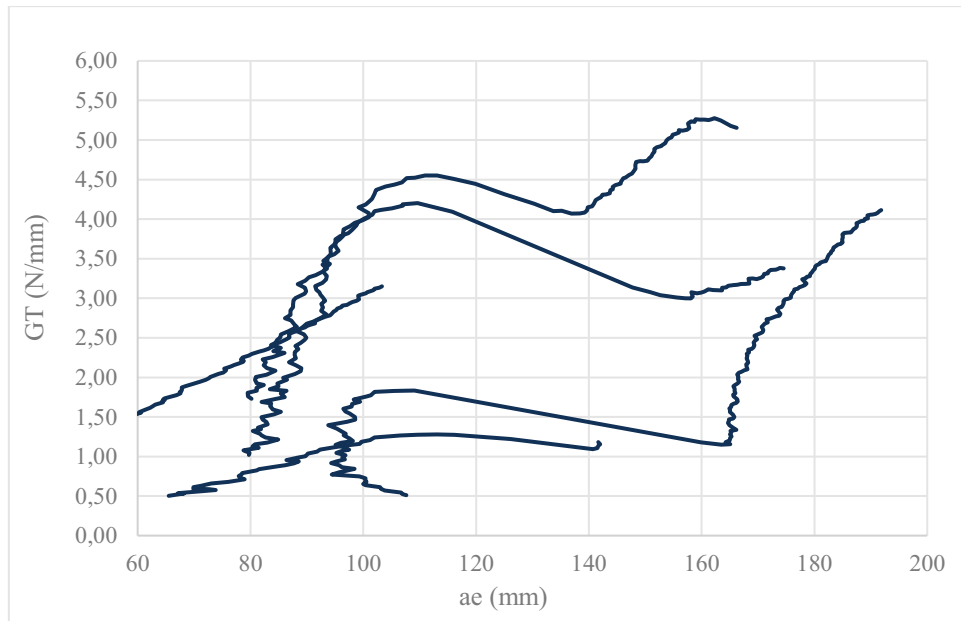


Figura 35. R-Curves para el modelo SLB-G_T.

Una vez obtenidas las energías del modelo mixto, se calculan las desviaciones y se determina el valor final de la energía para el modo I y II. Se ha empleado la referencia [30] para el proceso de cálculo de las energías críticas de fractura del modo mixto. Estos valores se muestran en la tabla 5 y son los que se utilizarán en el modelo cohesivo CZM.

Ensayo	G _I (N/mm)	G _{II} (N/mm)
1	2,50	1,91
2	1,08	0,78
3	2,82	1,75
4	0,73	0,50
5	1,41	1,00
Media	1,71	1,19
Desviación	0,91	0,61

Tabla 5. Valor para G_I y G_{II} del Modo Mixto.

El valor de la energía de rotura en cizalla corresponde a 1,19 N/mm y el valor de la energía de rotura normal corresponde a 1,71 N/mm, como se puede comprobar de la tabla 5. Los resultados obtenidos coinciden con los datos encontrados en la literatura de referencia permitiendo definir el modelo cohesivo mixto en el software de ANSYS para la simulación numérica.

Para obtener la desviación típica que se han representado en las tablas 4 y 5, se emplearon las siguientes ecuaciones:



$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (61)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right) / (n - 1)} \quad (62)$$

Donde \bar{x} es el valor medio obtenido de los ensayos realizados, S_{n-1} es la desviación estándar, n es el número de ensayos realizados y x_i es el valor obtenido de cada ensayo realizado. Además, si se desea conocer el porcentaje de la desviación obtenida se emplea la siguiente ecuación:

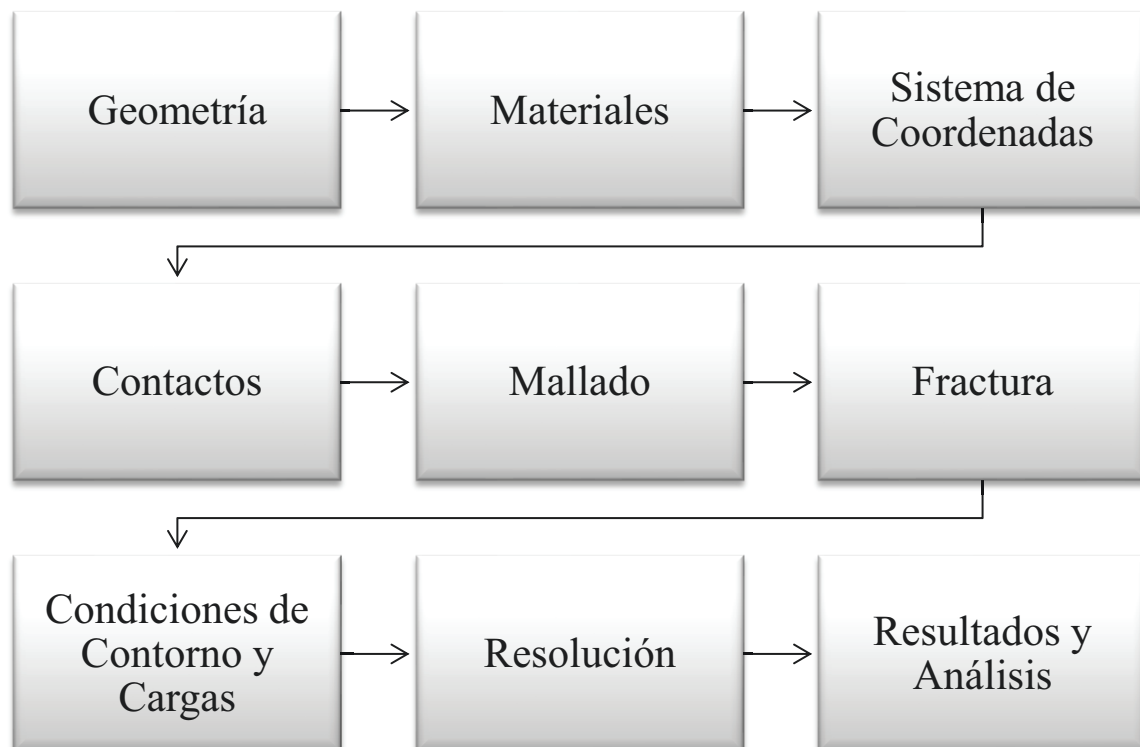
$$CV = 100 \cdot S_{n-1} \sqrt{\bar{x}} \quad (63)$$

4. ESTUDIO NUMÉRICO

En este apartado se pretende analizar numéricamente la unión del adhesivo empleando el software ANSYS (Workbench) del 2021 edición R1. Para ello, se seguirá de referencia artículos, manual del ANSYS y recomendaciones de profesionales para el correcto modelado y evaluación del adhesivo. Es importante realizar un modelado correcto con el fin de contrastar los resultados numéricos y con los experimentales para para comprobar la fiabilidad del modelo y extraer conclusiones.

Con el análisis a desarrollar, se pretende evaluar el material del adhesivo empleando una aproximación numérica con la definición de dos modelos cohesivos trapezoidales (modo puro y mixto) con la información obtenida de los ensayos experimentales. A partir de los resultados que se obtengan, el objetivo es evaluar la relación y diferencia entre los ensayos experimentales y la aproximación numérica conseguida. Una vez modelado el comportamiento del adhesivo y comprobado que los resultados corresponden con los experimentales, se pueden crear otras simulaciones aplicadas en el sector naval y evaluar el ciclo de vida, la capacidad de análisis numérica para la aplicación del adhesivo en diferentes áreas de trabajo, etc.

El siguiente esquema ilustra todos los pasos que se seguirán en el software para llevar a cabo la simulación. Dichos pasos fueron mencionados anteriormente con mayor grado de detalle.



Esquema 1. Pasos a Seguir para el Modelo FEA.

4.2 Ensayo del TDCB

La probeta a modelar posee las mismas dimensiones empleadas en el ensayo experimental. Dichas dimensiones se obtienen de la norma ASTM D3433 o de la ISO 252107. Se crean dos modelos, uno en 2D y otro en 3D, con el propósito de comparar los resultados y extraer conclusiones en cuanto a eficacia, precisión y simplicidad de cálculo (ver figuras 36, 37 y 38).

Una vez generada la geometría, se definen los materiales del sustrato acero y del adherente el adhesivo SikaFast 5211-NT. Las propiedades del acero y del adhesivo se muestran en las tablas 6, 7 y 8.

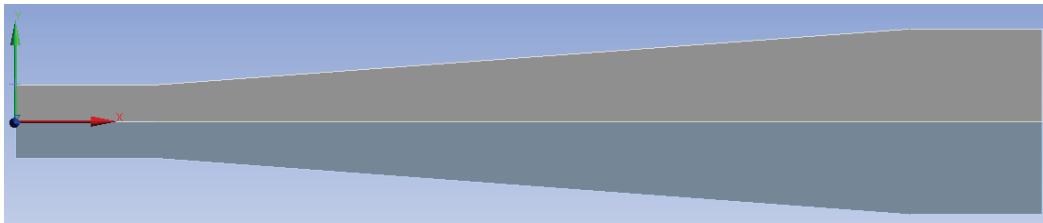


Figura 36. Modelo de la probeta TDCB (2D).

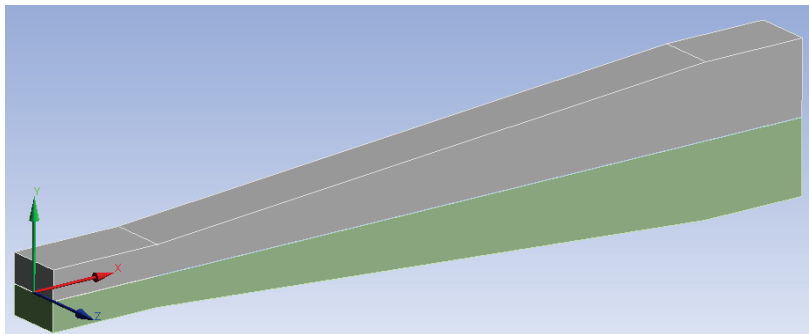


Figura 37. Modelo de la probeta TDCB I (3D).

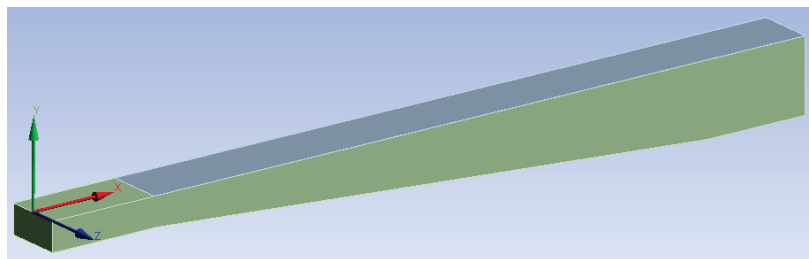


Figura 38. Modelo de la probeta TDCB II (3D).



Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	7850	kg/m ³
Material de Elasticidad Isotrópico		
Módulo de Young	2x10 ¹¹	Pa
Ratio de Poisson	0,3	
Módulo Bulk	1,67x10 ¹¹	Pa
Módulo de Cizalla	7,69x10 ¹⁰	Pa
Parámetros de la Vida Útil		
Coefficiente de Resistencia	9,2x10 ⁸	Pa
Exponente de Resistencia	-0,106	
Coefficiente de Ductilidad	0,213	
Exponente de Ductilidad	-0,47	
Coefficiente de Resistencia Cíclica	1x10 ⁹	Pa
Exponente de Endurecimiento por Deformación Cíclica	0,2	
Otros Parámetros		
Resistencia a la Tracción	2,5x10 ⁸	Pa
Resistencia a la Compresión	2,5x10 ⁸	Pa
Resistencia Máxima a la Tracción	4,6x10 ⁸	Pa
Resistencia Máxima a la Compresión	0	Pa

Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero.

En las tablas 7 y 8 se definen las propiedades del adhesivo. Estos son los valores para definir la ley cohesiva trapezoidal (CZM), empleamos el modelo de energía de fractura.

Propiedades	Valor	Unidades
Modo de Interface de Desvinculación	Modo I	
Energía Crítica de Fractura por Separación Normal	3,58	N/mm

Tabla 7. Propiedades mecánicas del adhesivo para el ensayo TDCB.

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	1200	kg/m ³
Material de Elasticidad Isotrópico		
Módulo de Young	250	MPa
Ratio de Poisson	0,43	
Módulo Bulk	595,24	MPa
Módulo de Cizalla	87,41	MPa
Otros Parámetros		
Resistencia a la Tracción	5,06	MPa
Resistencia Máxima a la Tracción	7,22	MPa

Tabla 8. Propiedades mecánicas del adhesivo SikaFast 5211-NT.

El adhesivo ha sido modelado con 6 nodos empleando un modelo 2D y 3D y el modelo cohesivo (COH2D6), considerando además la hipótesis de tensión plana para el análisis 2D.

Una vez que ya se ha definido la geometría y los materiales, se establece el contacto más adecuado para evaluar la unión y el despegado en función de la fuerza que se ejerza. Es importante que las propiedades del adhesivo estén bien definidas para una mejor aproximación de los resultados.

Antes de generar el mallado, se debe definir el método de fractura para el análisis. Para ello, se emplea el método de separación *debonding* en el CZM y se aplica entre adhesivos y sustrato.

Con la geometría y los materiales definidos se procede al mallado. El tamaño de la malla para los modelos 3D es de 5,0 mm con una malla rectangular y aproximación lineal. El tipo de elemento utilizado es el PLANE183. El mallado de los modelos 2D posee una dimensión de 2,0 mm empleando el mismo tipo de malla rectangular y lineal con el mismo tipo de elemento.

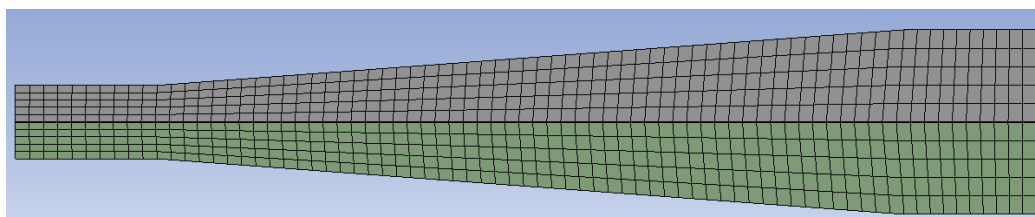


Figura 39. Mallado del ensayo TDCB.

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo deben de representar con la mayor aproximación posible las condiciones impuestas en el ensayo experimental. Dichas condiciones son: empotramiento en la base de la viga inferior (zona de menor espesor) restringiendo todos los grados de libertad de esa superficie (ver figura 40). Además, la carga aplicada ha sido del tipo

desplazamiento (para el análisis estático) introduciendo la máxima registrada en el ensayo experimental. En el análisis dinámico se ha aplicado una velocidad de 0,006 mm/s.

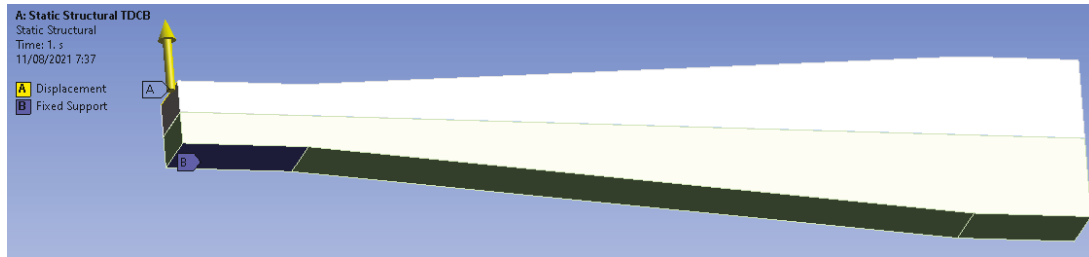


Figura 40. Condición de contorno y carga aplicada (TDCB).

Finalmente se deben de definir las características del Solver. En este ensayo se han empleado dos modelos (2D y 3D) y además con dos métodos de análisis diferentes (estático y dinámico).

En los análisis dinámicos, independientemente del modelo 2D y 3D, fue necesario activar los parámetros de no linealidad, de deflexión larga, los criterios de fractura y los añadir como controles de salida las fuerzas nodales y los datos de contacto. Además, el criterio dinámico empleado fue del tipo cuasi-estático. En el análisis estático se manejan las mismas consideraciones que en el análisis dinámico con excepción del método de resolución. Para el análisis estático bidimensional no fue necesario de activar ninguno de los parámetros mencionados del análisis dinámico (no linealidad, etc.)

Los diferentes métodos de resolución permitirán comparar los resultados obtenidos e identificar que método es el más óptimo para simular el comportamiento del adhesivo.

Definidos los pasos del modelo, se debe comprobar que los resultados sean coherentes respecto a las condiciones de contorno y cargas aplicadas. Además, teniendo de respaldo los resultados de los ensayos experimentales y artículos de referencia que emplean adhesivos similares [13], se pueden validar los métodos de evaluación y los resultados obtenidos.

Para ello, se seleccionará el método que proporcione una respuesta más próxima a los obtenidos experimentalmente y que presenten simplicidad en el análisis, menor coste computacional.

4.2.1 *Análisis Estático*

Los análisis estáticos se caracterizan por evaluar el estado de una estructura en un instante dado, permitiendo emplear ecuaciones que simplifiquen el cálculo y tiempos de resolución. En todos los artículos de referencia observados [11-13], solo se ha empleado el análisis estático presentando buenos resultados. A pesar de obtener el resultado para un instante de tiempo, los softwares de análisis numéricos emplean un periodo de tiempo ficticio y número de pasos para calcular los resultados en el instante deseado, de modo que, permite obtener valores intermedios

que permitirán conocer la evolución del ensayo con una gráfica similar a la obtenida del ensayo de tracción.

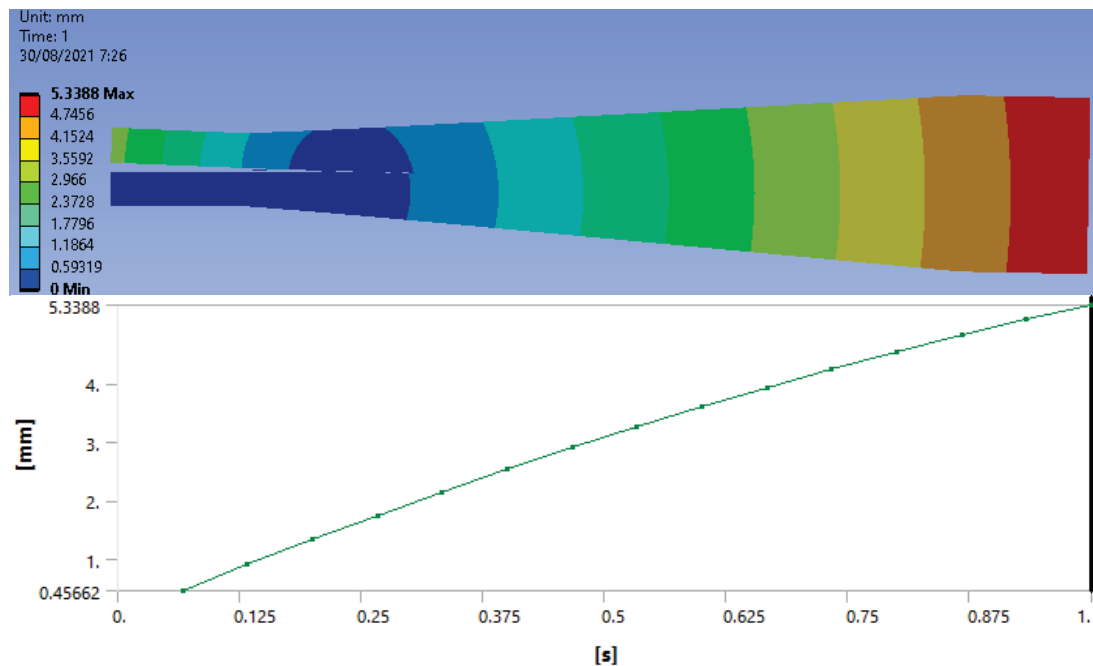
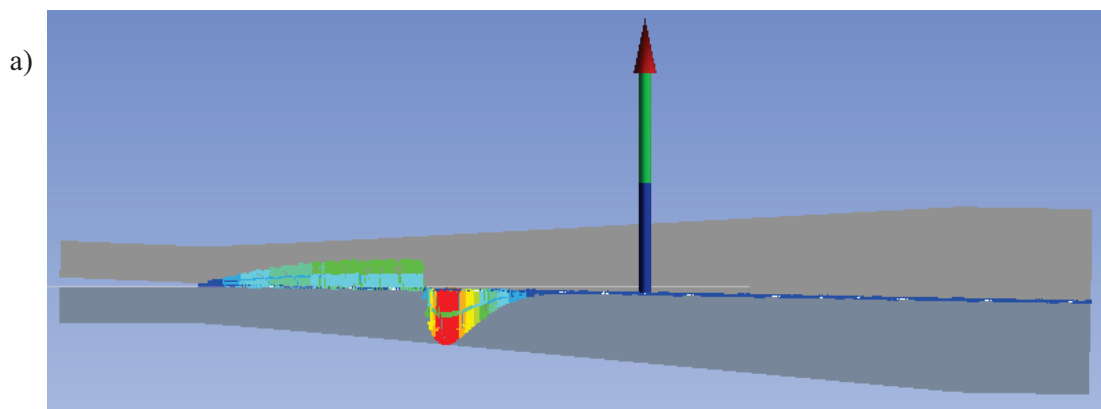


Figura 41. Deformación obtenida del ensayo TDCB.

En la figura 41 se pueden observar las deformaciones obtenidas para el ensayo TDCB y su representación gráfica. Un aspecto importante a destacar es que, al alcanzar un determinado valor, la unión entre el adhesivo y los sustratos deja de converger y se detiene la simulación.

A continuación, se representa en la figura 42 los valores de fuerza obtenidas del ensayo estático frente al desplazamiento. La parte b de la figura 42 representa de manera numérica los resultados obtenidos del ensayo TDCB estático en 2D con la distribución de fuerza a lo largo del adhesivo. Esta fuerza presenta un comportamiento esperado con una magnitud mayor en la punta de la grieta en dirección opuesta al desplazamiento definido. El mismo comportamiento y distribución de tensión (parte a de la figura 42) fue obtenida del modelo 3D con pequeñas variaciones de tensión que se pueden observar en la figura 43.



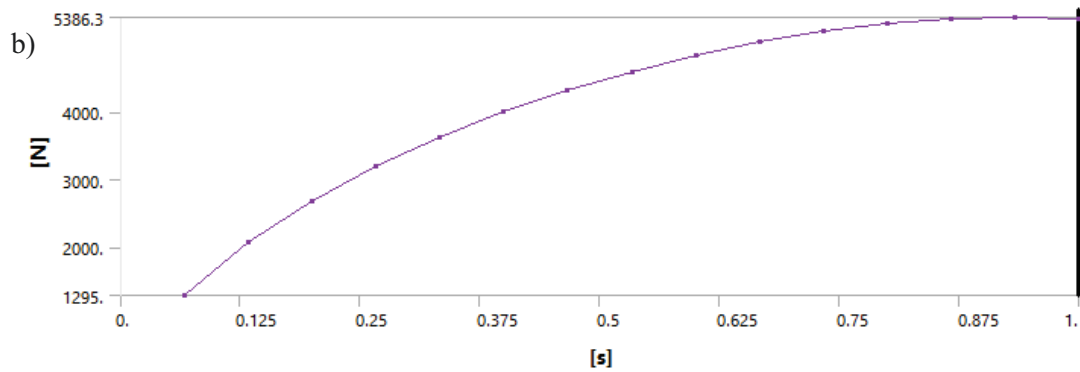


Figura 42. Distribución de las reacciones generadas en el adhesivo.

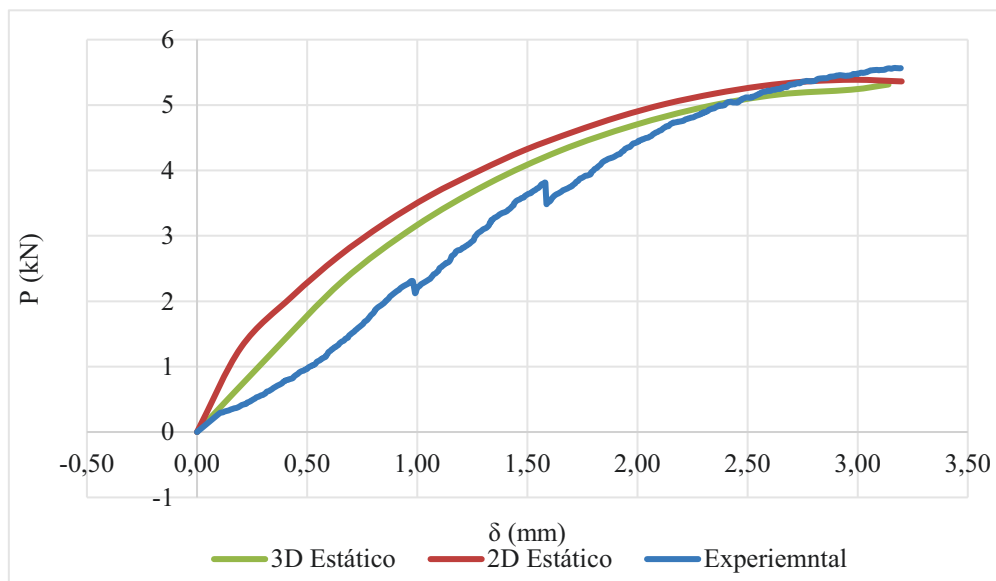


Figura 43. Ensayo numérico del esquema TDCB estático-I.

Se observa que los resultados obtenidos por ambos ensayos estáticos son muy similares con ciertas desviaciones. Comparado con el análisis experimental, el ensayo estático de bidimensional ha aportado unos datos más próximos a los experimentales. No obstante, se considera que ambos modelos son correctos para representar el comportamiento del adhesivo.

De la figura 43 se observa una variación de las fuerzas obtenidas numéricamente de 500 N respecto a las fuerzas obtenidas del ensayo experimental. En la evolución del ensayo, la variación de la fuerza disminuye consiguiendo una buena representación de la gráfica P- δ . Además, si comparamos los resultados expuestos en el artículo de R.M. Lopes, R.D.S.G. Campilhon, F.J.G. da Silva, T.M.S. [13] que también utiliza un adhesivo dúctil, los resultados son similares y esto también permiten validar los valores obtenidos.

Por todo ello se puede establecer que es más conveniente realizar un análisis estático en 2D el cual aporta resultados más próximos a los obtenidos con el ensayo experimental y, además, con mayor simplicidad de cálculo, coste numérico y tiempo de trabajo. En cualquier caso, el análisis tridimensional es interesante.

4.2.2 *Análisis Dinámico*

El procedimiento de cálculo será el mismo que el utilizado en el análisis estático incluyendo las características del *solver* dinámico. Los análisis Dinámicos permiten evaluar el comportamiento de las estructuras que están sometidas a una carga que varía con el tiempo. A pesar de eso, el análisis está acotado en un tiempo muy reducido y con una velocidad muy lenta, por tanto, se puede resolver empleando un análisis cuasi estático. Teniendo esto en cuenta, se muestran en la figura 12 los resultados obtenidos.

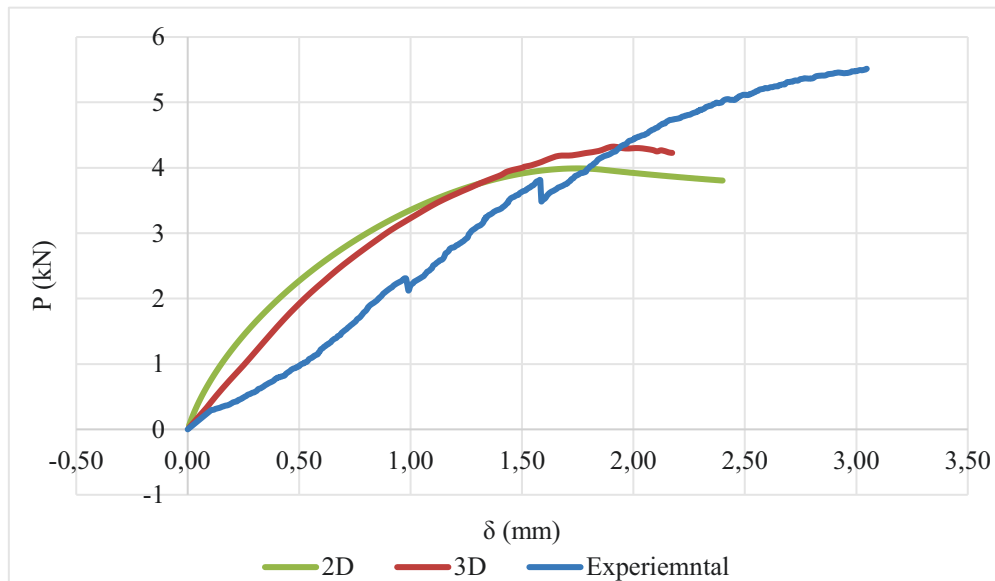


Figura 44. Ensayo numérico del esquema TDCB (P- δ) dinámico.

Como se puede ver en la figura 44 los resultados obtenidos con esta simulación presentan un comportamiento similar al de la simulación estático y a los resultados experimentales. A pesar de ello, el valor de la fuerza obtenida se encuentra más de 1000 N por debajo de los valores esperados, de modo que, se concluye que el análisis dinámico no representa una respuesta adecuada del comportamiento del adhesivo.

4.2.3 *Discusión de los Resultados*

Se pueden encontrar algunas diferencias entre el análisis dinámico y estático, esto se debe a que el análisis estático obtiene los valores en un instante dado, en cambio, el análisis dinámico permite simular el procedimiento completo del ensayo aportando resultados a medida que se avanza en el tiempo. A pesar de esto, el análisis dinámico no representa una buena aproximación de los valores de la fuerza que el adhesivo es capaz de soportar. Por tanto, se determina que el análisis estático es el más adecuado para la simulación del comportamiento del adhesivo.

Dicho lo anterior, en la tabla 10 se presenta el error obtenido con los tres modelos SBT, CBT y CBBM. Esto permite conocer que método aporta una mayor aproximación de los resultados.

Ensayo	Num. I	SBT	Error (%)	CBT	Error (%)	CBBM	Error (%)
1	3,70	3,25	-12,19	3,41	-7,81	3,57	-3,31
2	4,02	3,47	-13,64	3,65	-9,34	3,79	-5,77
3	4,12	3,63	-11,77	3,76	-8,66	3,73	-9,36
4	3,82	3,59	-5,94	3,77	-1,26	3,99	4,64
5	3,50	3,37	-3,66	3,54	1,15	3,50	-0,06
Prom. Error		3,46		3,63		3,72	

Tabla 9. Comparativa de resultados entre los métodos empleados (N/mm).

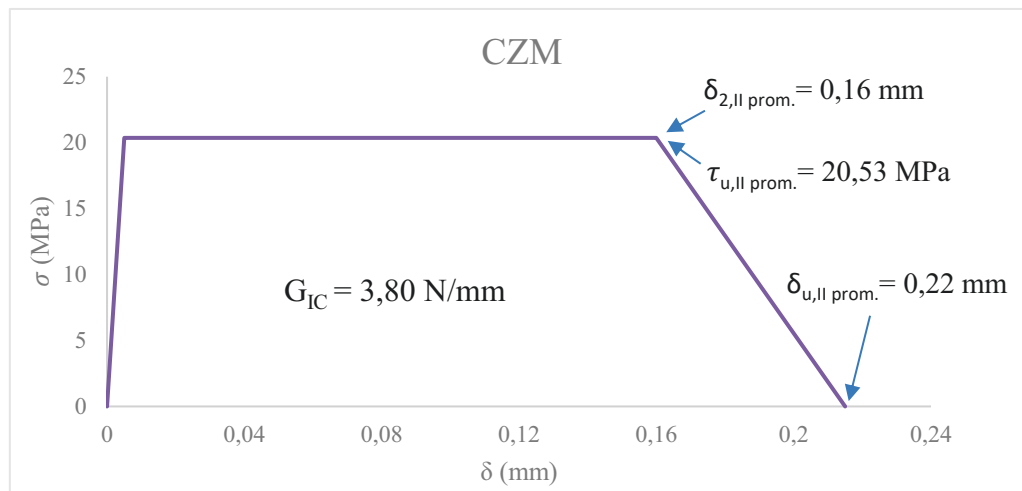


Figura 45. CZM trapezoidal de los 5 ensayos TDCB.

Con los resultados obtenidos en la tabla 9 se puede indicar que el método que aporta un menor margen de error es el CBBM. Esto era predecible debido a que el método utiliza el concepto de longitud de grieta equivalente y para adhesivos dúctiles de los cuales es complicado la supervisión del desarrollo de la grieta en el ensayo experimental, incluso empleando una cámara de alta resolución es el más adecuado. Aun así, los resultados obtenidos presentan un porcentaje de error relativamente alto y esto puede deberse a una mala aplicación del adhesivo en los sustratos, el uso de métodos inadecuados (SBT y CBT) para caracterizar el modelo CZM trapezoidal, errores en la colocación de la probeta en la máquina de tracción, etc. A pesar de esto, no se obtuvieron grandes márgenes de error y se consideran válidos los resultados obtenidos. Para mejorar dichos resultados, la mejor solución sería realizar nuevamente aquellos ensayos experimentales que no presentaron una respuesta adecuada y emplear algún método más para caracterizar la ley CZM trapezoidal del modelo I puro. A pesar de ser el método CBBM el que mejor respuesta aporta, los otros métodos no han mostrado grandes desviaciones por lo que se consideran válidos.

Como se puede observar de los resultados obtenidos, el cálculo estático aporta mejores resultados comparado con los ensayos experimentales. Por todo ello, se ha conseguido caracterizar el adhesivo para el modo I puro y su energía de fractura asociada, de modo que, se podría emplear otra geometría cualquier para simular la unión adhesiva mediante un ensayo de tracción puro.

4.3 Ensayo SLB

En la primera fase del análisis se crea la geometría de la probeta con las mismas dimensiones que las empleadas en el ensayo experimental. Para ello, se diseñan dos modelos uno bidimensional y otro tridimensional con el fin de comparar los resultados y extraer conclusiones respecto a eficacia, precisión y simplicidad de cálculo, del mismo modo en que se realizó el ensayo TDCB. En la segunda, se definen los materiales.

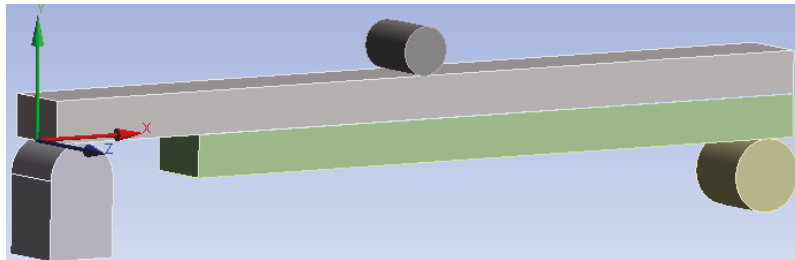


Figura 46. Modelo de la probeta SLB I (3D).

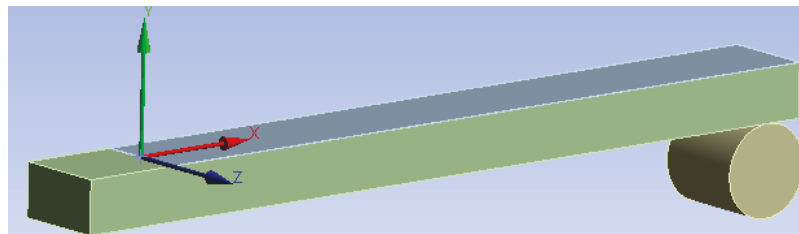


Figura 47. Modelo de la probeta SLB II (3D).

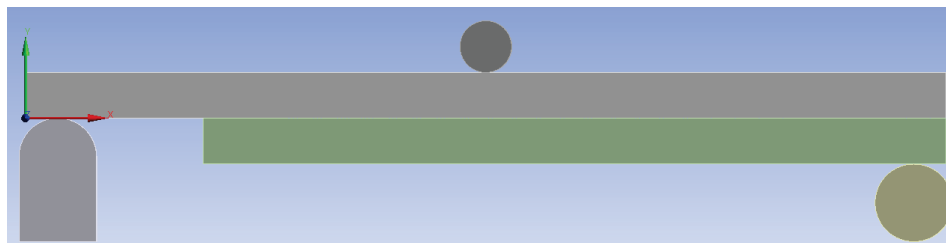


Figura 48. Modelo de la probeta SLB (2D).

Para definir la ley cohesiva (CZM), empleamos se usa el modelo de energía de fractura basada en el despegado. En la tabla 10 se indican las propiedades del modelo mixto.

Propiedades	Valor	Unidades
Modo de Interface de Desvinculación	Modo Mixto	
Energía Crítica de Fractura por Separación Normal	1,71	N/mm
Energía de Fractura Crítica por Deslizamiento Tangencial	1,19	N/mm

Tabla 10. Propiedades mecánicas del adhesivo para el ensayo SLB.

A continuación, se define el tipo de contacto denominado *debonded* con un controlador. También se deben establecer unos contactos adecuados en los apoyos de los sustratos. Para ello,

se define una unión entre superficies que permite que no se adhiera la probeta a los apoyos proporcionando una mayor aproximación a lo realizado en el ensayo experimental.

Antes de generar el mallado, debemos de definir el método de fractura para el análisis. Para ello, se emplea el método *debonding* con el esquema CZM que se ha definido anteriormente para conocer la energía de rotura.

Definida la geometría, los materiales y el tipo de fractura, se debe efectuar un mallado adecuado dependiendo atendiendo a la capacidad de cálculo del ordenador y de las dimensiones de la probeta. En nuestro caso, las dimensiones de la geometría ya las conocemos y el ordenador empleado tiene una capacidad RAM de 24 GB con un procesador de 3,5 Hz. En la figura 39 se muestra el mallado del modelo SLB.

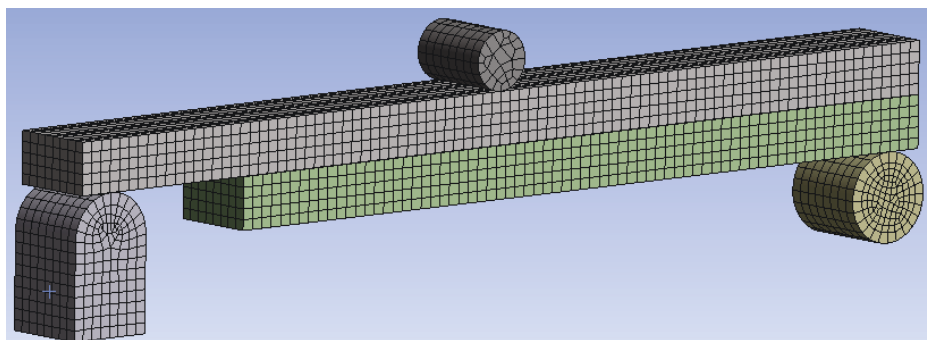


Figura 49. Mallado del ensayo SLB.

El tamaño de la malla empleado para los modelos tridimensionales será de 4,0 mm del tipo rectangular y con aproximación lineal. El tipo de elemento utilizado es el PLANE183. El mallado de los modelos bidimensionales posee un tamaño de 2,0 mm con una malla rectangular y lineal para el mismo tipo de elemento y la opción de tensión plana.

Las condiciones de contorno establecidas para el ensayo SLB son muy distintas a las del ensayo TDCB. Para este ensayo se debe recrear las mismas condiciones de apoyo entre las vigas y los cilindros los cuales tienen un contacto definido entre superficies del tipo simplemente apoyado y en los cilindros se establece la condición de empotramiento. Se ha empleado la referencia [31 y 32] de guía respecto a las condiciones de contorno en el modelo. Además, se establecen dos condiciones de desplazamiento. La primera, consiste en restringir el modelo para obtener solamente una deformación vertical evitando el resto de posibles deformaciones y la segunda condición de desplazamiento consiste en establecer la deformación vertical obtenida en el experimento para comparar resultados, restringiendo nuevamente las otras deformaciones. En el análisis dinámico se establece como carga la velocidad del cilindro actuador registrada en el ensayo experimental.

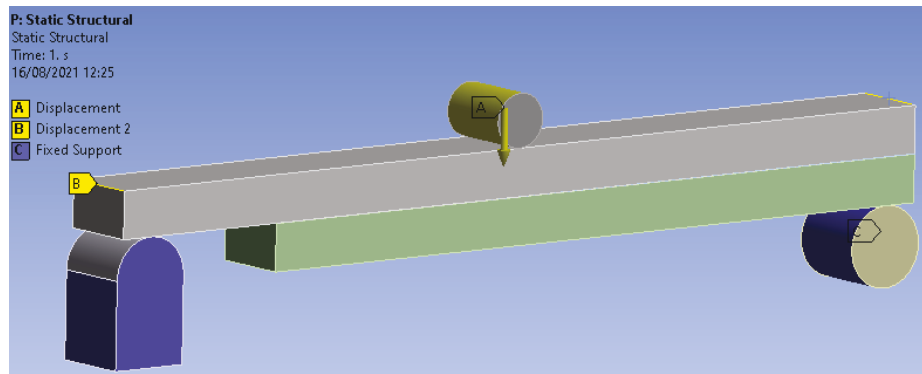


Figura 50. Condición de contorno y desplazamientos impuestos (SLB).

Finalmente se determinan las características del Solver. En este ensayo se han usado dos modelos, bidimensional y otro tridimensional. En ambos análisis se activaron los parámetros de no linealidad, larga deflexión, los criterios de fractura y como controles de salida las fuerzas nodales y los datos de contacto.

Estas dos formas de resolver el problema posibilitan que se efectúe una comparativa de los resultados e identificar que método de resolución es el más eficiente para simular el comportamiento del adhesivo mediante un modelo mixto.

Una vez definidos los pasos para el FEA, debemos de ver que los resultados son coherentes respecto a las condiciones de contorno y a las cargas definidas. Además, haciendo la comparativa con los datos experimentales se pueden validar los modelos considerados.

4.3.1 *Análisis Estático*

Los análisis estáticos se caracterizan por evaluar el estado de una estructura en un instante dado, permitiendo emplear ecuaciones que simplifiquen el cálculo y tiempos de resolución. En todos los artículos de referencia estudiados, solo se ha realizado un análisis estático.

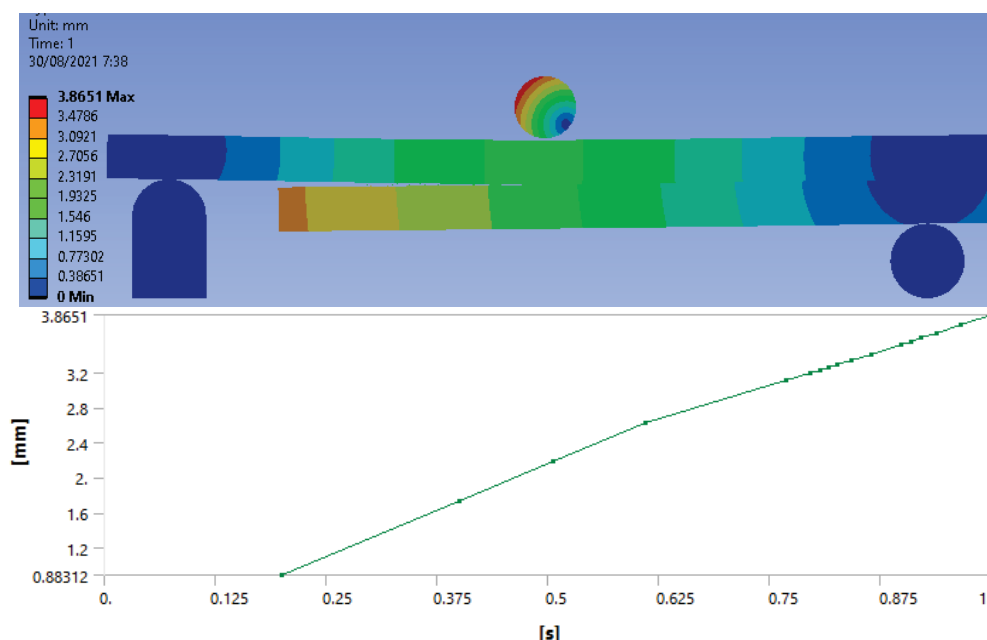


Figura 51. Deformación obtenida del ensayo SLB.

En la figura 51 se pueden ver las deformaciones obtenidas para el ensayo SLB. Un aspecto a destacar es que, al alcanzar un determinado valor, la unión entre el adhesivo y los sustratos, deja de converger y se detiene la simulación. Es importante que las deformaciones que se obtienen con el ensayo experimental y numérico sean suficientemente pequeñas con el objeto de evaluar las tensiones que se generan en el adhesivo y no las del sustrato. Esto ocurre si el ensayo se prolonga un tiempo excesivo y se comienzan a registrar valores de tensión elevadas que no corresponden con las características del adhesivo.

A continuación, en la figura 14 se muestran los valores de fuerza-deformación obtenidos con la simulación en 2D y 3D.

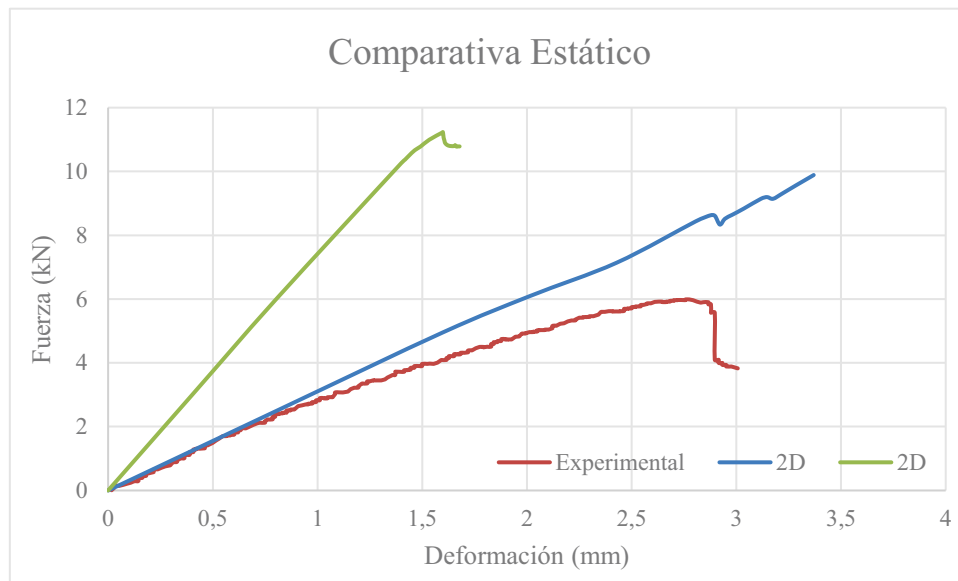


Figura 52. Ensayo numérico del esquema SLB estático.

De la figura anterior podemos observar que el ensayo con mejor aproximación numérica respecto al experimental fue obtenido del modelo 2D.

4.3.2 *Análisis Dinámico*

El procedimiento de cálculo es el mismo que en el caso estático, pero ahora emplearemos las características del solver dinámico. Los análisis dinámicos permiten evaluar el comportamiento de las estructuras que están sometidas a una carga que varía en el tiempo.

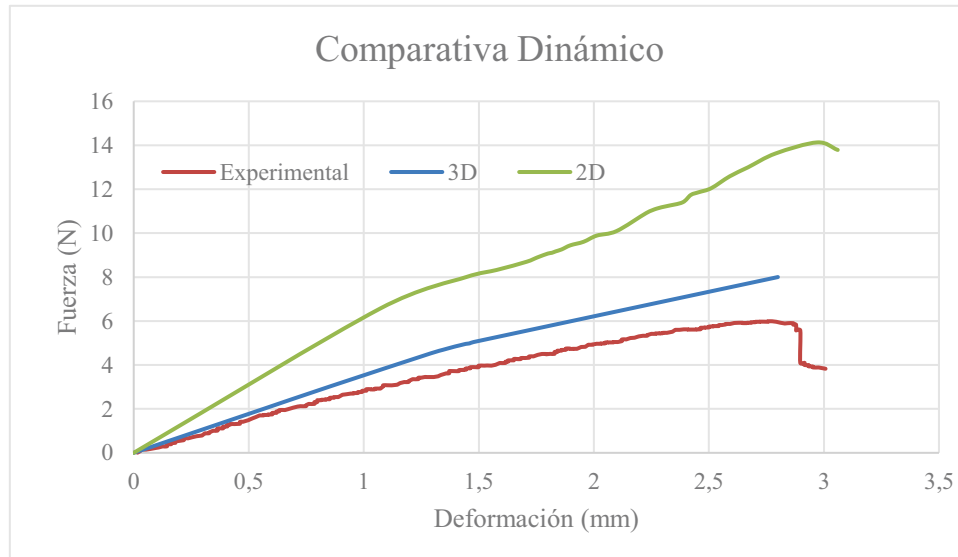


Figura 53. Ensayo numérico del esquema SLB dinámico.

En la figura 53 se presentan los datos de la simulación en 3D y 2D frente a los datos experimentales y se observa una similitud inicial en la tendencia de los resultados, sin embargo, con el paso del tiempo se hace mayor la diferencia entre los ensayos. El ensayo con mejor aproximación numérica respecto al experimental fue obtenido del modelo 3D.

Finalmente se valida concluye que el modelo bidimensional estático numéricamente representa mejor el ensayo SLB.

4.3.3 *Discusión de los Resultados*

Como se ha podido confirmar en el apartado anterior, los modelos de análisis estático son los que presentan una mejor aproximación a los ensayos experimentales, en concreto el modelo 2D. A continuación, se procede a evaluar los resultados obtenidos del modelado SLB (modelo mixto) para el modo I (tensión normal) y modo II (tensión de cizalla). Los modelos mixtos representan una ley trapezoidal similar a la del modo puro, pero con valores de tensión inferiores. En las figuras 54 y 55 se puede observar las gráficas CZM para el modo I y modo II.

La tabla 12 muestra el porcentaje de error de los resultados obtenidos con los modelos.

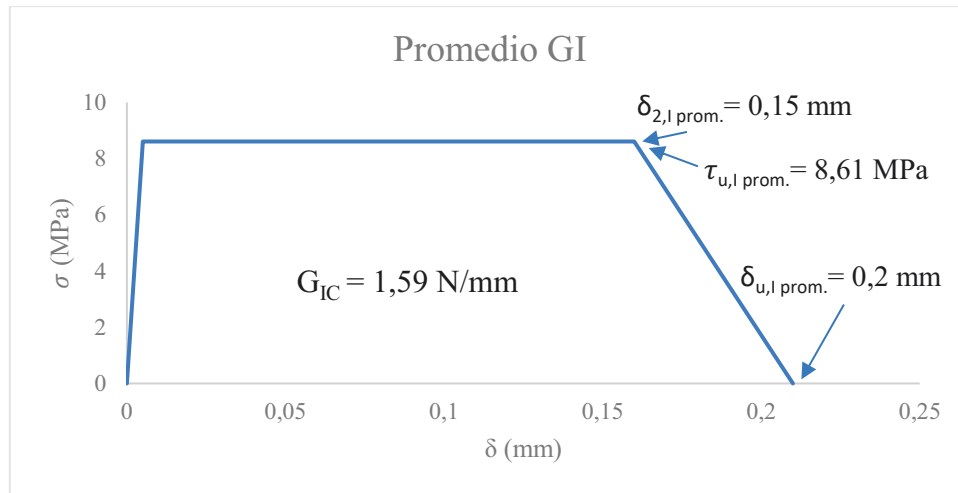


Figura 54. Ley CZM modelo mixto modo I.

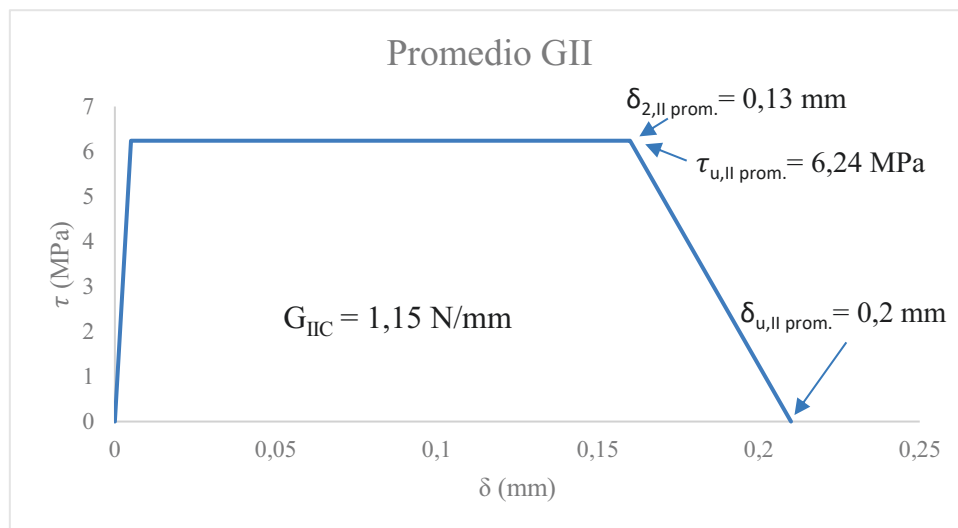


Figura 55. Ley CZM modelo mixto modo II.

Ensayo	Inp I	Inp II	CBT-I	Error (%)	CBT-II	Error (%)
1	1,70	2,33	2,50	32,14	1,91	-22,16
2	1,67	1,15	1,08	-54,51	0,78	-47,29
3	4,45	1,82	2,82	-57,69	1,75	-4,04
4	1,53	0,69	0,73	-109,00	0,50	-37,52
5	2,03	0,80	1,41	-43,78	1,00	20,43
Prom. Error			1,71		1,19	

Tabla 11. Porcentaje de error obtenido del modelo mixto (N/mm).

Se observa que los resultados obtenidos mediante la formulación son similares a los ensayos experimentales. Por otra parte, destacar que en algunos ensayos experimentales se obtuvo una unión cohesiva (ver tabla 3). Este motivo puede ser una de las consecuencias por las que se presentan ciertas variaciones en la tabla 11. También puede venir dado debido a que la probeta no estuviera bien alineada en la máquina de compresión, que el punto de carga no estuviera aplicado en el lugar preciso del sustrato superior, etc.



Se observa que la tendencia de los resultados numéricos es próxima a la de los ensayos experimentales mostrando un comportamiento similar.

Por todo ello con esta investigación se consigue caracterizar el adhesivo mediante un modelo mixto empleando la ley cohesiva trapezoidal (CZM) en donde se define la energía de fractura del modelo mixto I-II. A partir de estos resultados, se puede extrapolar el modelo a cualquier otra geometría en donde se desee una ~~la~~ unión adhesiva para simular su comportamiento.



5. CONCLUSIONES

La utilización de los adhesivos en el sector naval está en alza con el objetivo claro de sustituir a la soldadura. Este tipo de unión presenta numerosas ventajas, siendo una de las más importante la reducción de peso.

Con este trabajo se pone en evidencia la necesidad de desarrollar un modelo de simulación numérica que posibilite el estudio de la aplicación de los adhesivos como método de unión. Para simular el comportamiento de los adhesivos, el modelo más utilizado es el cohesivo (CZM), que se implementa en el software comercial ANSYS, a través una ley de tracción – separación. Para lo cual hay que caracterizar, de forma experimental, el comportamiento del adhesivo frente a la fractura, analizando los resultados mediante los mecanismos de fractura lineal elástica y determinando las energías críticas de fractura (G_C).

En la fase experimental se realizaron varios ensayos en modo I el *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) y modo II el *End Notched Flexure* (ENF). Sin embargo, debido a la ductilidad que presenta el adhesivo, no fue posible realizar una correcta caracterización en modo II puro. Por este motivo, se utilizó un ensayo mixto (I+ II) el *Single Leg Bending* (SLB) para poder cuantificar la energía disipada en la fractura. Indicar que el adhesivo utilizado es el modelo SikaFast 5211-NT (*New Component*) de elevada ductilidad. Se trata un adhesivo bicomponente de curado rápido, cuya mezcla está formada por un componente A (SikaFast-5211 NT) y un componente B (SikaFast-5200) con una relación de mezcla de 10:1 en volumen.

Además, para analizar los resultados obtenidos con los ensayos experimentales, las curvas fuerza-desplazamiento, se requieren modelos matemáticos para determinar las energías de fractura crítica del adhesivo, por ello, para el modo I se emplean los modelos de *Simple Beam Theory* (SBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) y *Compliance Based Beam Method* (CBBM). De los datos obtenidos con cada modelo se concluye que el método que aporta una menor desviación con relación al estudio experimental es el SBT puesto que los márgenes de error de cada ensayo son de 0,15%, 0,16% y 0,19%, respectivamente. En el modo mixto (I+II) se ha empleado el modelo propuesto por Yoon and Hong [29] del ENF modificado. En este caso, los datos obtenidos de la desviación son 0,91% y 0,61% para la energía crítica del modo I y modo II, respectivamente. No obstante, estos valores son más altos porque no trabaja en modo puro, sino que se produce un ángulo de desfase de 41°.

Como conclusión final de la parte experimental indicar que el método que mejor define la fractura lineal elástica es el CBBM, para este adhesivo. Aunque porcentualmente presenta una desviación mayor que los otros métodos, introduce el concepto de longitud de grieta equivalente que permite cuantificar la longitud de la grieta sin medirla físicamente. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la energía de fractura crítica del modo I (G_{IC}) obtenida del ensayo



TDCB es de 3,58 N/mm y las energías de fractura crítica del modo mixto (SLB) son de 1,71 N/mm y 1,19 N/mm para el modo I y modo II, respectivamente. Estos son los valores que se implementan en el modelo cohesivo trapezoidal.

Por otra parte, para el estudio de simulación se ha usado el software comercial ANSYS Workbench 2021 R1. Mediante el modelo CZM se han creado cuatro estudios numéricos diferentes, con el objeto de validar los ensayos experimentales. Se efectuaron modelos estáticos y dinámicos en dos y tres dimensiones para cada ensayo y se evaluaron las deformaciones, distribución de tensión, tensiones máximas y mínimas y las reacciones en los empotramientos. Con los resultados obtenidos de los ensayos numéricos, se ha determinado que el estudio estático bidimensional es el que aporta una mejor aproximación a los resultados experimentales tanto para el análisis del modo I puro (TDCB) como para el análisis en modo mixto (SLB). Dicho esto, se considera que para validar el modelo CZM, que caracteriza el comportamiento a la fractura del adhesivo SikaFast 5211-NT, el estudio más adecuado es el estático bidimensional.

Por último, se hace una comparativa entre los resultados obtenidos con el modelo numérico y los ensayos experimentales. De esta comparativa se concluye que, de nuevo, el análisis que mejor se aproxima es el CBBM consiguiendo un error de un 2%. Esto implica que el método numérico desarrollado es bueno atendiendo a la literatura existente. Además, se considera que dicho modelo es el más adecuado para la caracterización de uniones adhesivas dúctiles. Por todo ello, se concluye que se ha conseguido un buen modelo de simulación numérica que se puede utilizar en el diseño de la unión de cualquier elemento en el buque en el que se use el adhesivo SikaFast 5211-NT.



6. TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se pretende definir los posibles trabajos que se puedan seguir desarrollando por esta línea de investigación. En este trabajo se ha realizado la caracterización de un adhesivo dúctil manejando ensayos experimentales y numéricos con el fin de obtener un modelo de simulación que sirva para cualquier análisis futuro en donde se desee emplear este adhesivo. Siguiendo esta línea de trabajo, se pueden realizar estudios numéricos específicos de ciertos componentes del buque en donde se pueda implementar esta técnica de unión. Además, se pueden añadir análisis de vibraciones [33], cargas armónicas, etc. que permitan conocer el comportamiento del adhesivo ante dichas condiciones de carga.

El trabajo desarrollado sirve de apoyo para realizar análisis de cualquier unión que se pueda implementar en el buque y utilice el adhesivo caracterizado. También se puede utilizar este modelo para diseñar otros tipos de unión de este adhesivo con distintos metales o la combinación entre metal-*composite* [34].

Por otra parte, el análisis del efecto de envejecimiento térmico sobre el rendimiento mecánico de las juntas adhesivas permite evaluar cómo se degrada la unión del adhesivo para diferentes condiciones ambientales [35 y 36]. Realizando estudios experimentales del ciclo de vida de la unión adhesiva se podría tratar de obtener un modelo de simulación numérica que puede predecir el comportamiento del adhesivo frente al tiempo.

Otro camino de investigación es el estudio de cargas de impacto (de mucha intensidad en rango de frecuencia corta) en uniones adhesivas y analizar su comportamiento. En el artículo de Machado et al. [37] realizan un estudio numérico del comportamiento al impacto de juntas adhesivas para la industria del automóvil que podría servir de guía para hacer un estudio similar en un buque.

Por último, indicar que este trabajo abre la puerta a definir otros modelos numéricos que sirvan para diseñar uniones en el buque.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Andres. P, June M. Using adhesive bonding in shipbuilding [internet]. 2013 [consultado 13 mar del 2021]. Comisión Europea. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/84068-using-adhesive-bonding-in-shipbuilding>
- [2] Roberto Andrés. Adhesivos, pegamentos y selladores [internet]. 2015 [consultado 13 mar 2021]. Disponible en: <https://www.losadhesivos.com>
- [3] Canales Sectoriales. Tendencias en el mercado de los adhesivos selladores [revisado el 07 de abril del 2020; consultado el 13 marzo del 2021]. Disponible en la web: <https://www.interempresas.net/Ferreteria/Articulos/301217-Tendencias-en-el-mercado-de-los-adhesivos-selladores.html>
- [4] Carle P. Monica S. Desventajas e inconvenientes de los adhesivos [internet]. 2015 [consultado 13 mar 2021]. Disponible en: <https://www.losadhesivos.com/desventajas-adhesivos.html>
- [5] Fernando Sánchez Matrán. Uniones Adhesivas y sus Aplicaciones Navales [internet]. Cartagena. Universidad de Cartagena. 2010. [revisado 16 feb 2010; consultado 10 feb 2021]. Disponible: <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/1815/pfc3384.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Felipe J. P. Chaves, L. F. M. de Silva, M. F. S. F. de Moura, D. A. Dillard y V. H. C. Esteves. Fracture Mechanics Test in Adhesively Bonded Joints: A literature Review. ELSEVIER [internet]; 2014 [consultado 5 de abril del 2021]; 955-992. Disponible en web: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-energy>
- [7] J.P.A. Valente, R.D.S.G. Campilho, E.A.S. Marques, J.J.M. Machado, L.F.M. da Silva. Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling. ELSEVIER [internet]. 2019 [consultado 03 feb 2021]; 110894. Disponible en: www.elsevier.com/locate/compstruct
- [8] Universidad Politécnica de Valencia. Ensayo de Tracción [internet]. Fecha de publicación [consultado 08/09/2021]. Pag. web: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/ptrb2_2_1.html
- [9] Lucas F.M. da Silva, David A. Dillard, Bamber Blackman y Robert D. Adams. Testing Adhesive Joints. 5th Weinheim, Alemania. Wiley-VCH; 2012.
- [10] Lucas F. M. Silva, Andreas Öchsner y Robert D. Adams. Handbook of Adhesive Technology. Volumenn II; Oporto, Portugal; Springer Heidelberg; 2011.
- [11] M.R. Gheibi, M.H. Shojaeefard, H.Saeidi Googarching. Experimental and Numerical analysis on the cohesive behavior of an automotive adhesive improved by MWCNT subjected to mode I and II loadings. ELSEVIER [internet]. 2019 [consultado 03 feb 2021]; 271-286. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijmecsci



- [12] M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G. Campilho, J.P.M. Gongalves. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. ELSEVIER [internet]. 2008 [consultado 03 feb 2021]; 2224-2230. Disponible en: www.elsevier.com/locate/compscitech
- [13] R.M. Lopes, R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, T.M.S. Faneco. Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints. ELSEVIER [internet]; 2015 [consultado el 01 de julio del 2021]; volumen 67; 103-111. Disponible en la web: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.032>
- [14] Norma ISO 25217 (primera edición 2009-05-01) para adhesivos. Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens
- [15] Jiawen Xie, Anthony M. Waas y Mostafa Rassaian. Closed-form Solutions for Cohesive Zone Modeling of Delamination Toughness Test. ELSEVIER [internet]; 2016 [consultado 28 abril 2021]; volumen 88-89; 379-400. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.12.025>
- [16] B.R.K. Blackman, H. Hada Vinia, A.J. Kinloch y M. Paraschi. The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test. ELSEVIER [internet]; 2003 [consultado 17 mayo 2021]; volumen 70; 233-248. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00031-0)
- [17] J.M.D. Teixeira, R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, F.J.P. Moreira y D.F.O. Silva. Comparative Evaluation of Different Fracture Test for the Tensile Fracture Toughness of a Ductile Adhesive. ELSEVIER [internet]; 2019 [consultado 17 mayo 2021]; volumen 38; 1268-1275. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.221>
- [18] Xia Liu, Ravindra Duddu, Haim Waisman. Delamination analysis of composites using a finite element based discrete damage zone model. Columbia University [internet]. 2014 [consultado el 11 de agosto del 2021], 1-15; Disponible en la página web: <https://my.vanderbilt.edu/cpml/files/2014/12/DDZMDelaminationSAMPE.pdf>
- [19] M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G. Campilho, J.P.M. Gongalves. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. ELSEVIER [internet]. 2009 [consultado 03 feb 2021]; 1589-1595. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijsolstr
- [20] Sanchez S., Coronado P., Argüelles A. y A. Viña J. Analyses of Difference Adhesives on Pure Mode I and Mode II Delamination Growth of Composite Bonded Joint. Proceedings [internet]; 2018 [consultado 17 mayo 2021]; 1-4; Disponible en: [10.3390/proceedings2231419](https://doi.org/10.3390/proceedings2231419)



- [21] LOCTITE & TEROSON Europe. Laboratorios de pruebas de adhesivos LOCTITE [internet]; Youtube; 19 mayo del 2015 [consultado el 01 de mayo 2021]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=GlqZqOLupiE>
- [22] Bent F. Sorensen y Peter Kirkegaard. Determination of Mixed Mode Cohesive Laws. ELSEVIER [internet]; 2006 [consultado 10 abril 2021]; 73(17):2642-2661. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.04.006>
- [23] Designación D 6671/D 6671M – 06. Standard Test Method for Mixed Mode I and Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites [internet]; 2006 [consultado el 5 de abril del 2021]; Disponible en: <https://oss.jishulink.com/upload/201912/2b2840d20b364836b26cb8e87ba0f521.pdf>
- [24] Stergios Goutianos, Bent F. Sorensen. The Application of J Integral to Measure Cohesive Laws Under Large-scale Yielding. ELSEVIER [internet]; 2016 [consultado 20 abril 2021]; volumenn 155; 145-146; Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.01.004>
- [25] Zirui Huang, Dongsheng Huang, Ying-Hei Chui, Zhongfan Chen. A Bi-linear Cohesive Law-based model for Mode II Fracture Analysis: Application to ENF test for unidirectional fibrous composite. ELSEVIER [internet]; 2019 [consultado 20 abril 2021]; volumen 213; 131-141; disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794419301778>
- [26] Ainhoa Arrese, Ana Boyano, Juan de Gracia, Faustino Mujika. A Novel Procedure to Determine the Cohesive Law in DCB test. ELSEVIER [internet]; 2017 [consultado 01 de mayo 2021]; volumen 152; 76-84; Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.09.012>
- [27] Asignatura “Análisis Numérico de Estructura” del curso 2020/2021 de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol (UDC).
- [28] B.R.K. Blackman, H. Hadavinia, A.J. Kinloch, M. Paraschi, J.G. Williams. The calculation of adhesive fracture energies in mode I. revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test. ELSEVIER [internet]; 2003 [consultado 02 julio 2021]; volumen 70; 233-248. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00031-0)
- [29] Filipe José Palhares Chaves. Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints. Universidad de Porto [internet]; 2013 [consultado 17 mayo 2021]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/143413221.pdf>
- [30] Jorge M.Q. Oliveira¹, Marcelo F.S.F. de Moura, and José J.L. Morais. Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood [internet]; 2009 [consultado 10 agosto 2021]; volumen 63; 597-602. Disponible en: [https://paginas.fe.up.pt/~mfmoura/proj_repair/6-Holz\(2009\).pdf](https://paginas.fe.up.pt/~mfmoura/proj_repair/6-Holz(2009).pdf)



- [31] CAE Worldwide. ANSYS Nonlinear Analysis | 3 Point bending | Shell Elements | Plotting the result data | GRS | [internet]; Youtube; 05 julio 2015 [consultado 4 de Agosto 2021]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=svE0ZW6QrrY>
- [32] Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 5 King's College Road, Toronto, Canada. Mechanical performance of integrally bonded copper coatings for the long-term disposal of used nuclear fuel. ELSEVIER [internet]; 2015 [consultado 4 agosto 2021]; volumen 293; 403-412. Disponible en: www.elsevier.com/locate/nucengdes
- [33] Mustafa Yaman, Mehmet Fatih Sansveren. Numerical and experimental vibration analysis of different types of adhesively bonded joints. ELSEVIER [internet]; 2021 [consultado 22 agosto 2021], volumen 34; 368-380. Disponible en: www.elsevier.com/locate/structures
- [34] Theodoros Loutas, Panayiotis Tsokanas, Vassilis Kostopoulos, Peter Nijhuis, Wouter M. van den Brink. Mode I fracture toughness of asymmetric metal-composite adhesive joints. ELSEVIER [internet]; 2020 [consultado 9 septiembre 2021]; volumen 34; 250-259. Disponible en: www.elsevier.com/locate/matp
- [35] Francesco Marchione, Placido Munafo. Effect of thermal aging on the mechanical performance of timber-timber single-lap adhesive joints. ELSEVIER [internet]; 2021 [consultado 9 septiembre 2021]; volumen 108; 102883. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijadhadh
- [36] Guofeng Qina, Jingxin N, Wenlong Mu, Wei Tanb. Effect of thermal cycling on the degradation of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints for automóviles. ELSEVIER [internet]; 2019 [consultado el 9 de septiembre del 2021]; volumen 95; 102439. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijadhadh
- [37] J.J.M. Machado, E.A.S. Marques, M.R.G. Silva, Lucas F.M. da Silva. Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry. ELSEVIER [internet]; 2018 [consultado el 9 septiembre del 2021]; volumen 84; 92-100. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijadhadh