

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Estudio de la unión adhesiva fibra de carbono –
aluminio en secciones tubulares.

Autor: Javier Muñiz Anarte

Tutor: Luis Távora Mendoza

Jesús Justo Estebanz

**Dep. de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio de la unión adhesiva fibra de carbono – aluminio en secciones tubulares.

Autor:

Javier Muñiz Anarte

Tutor:

Luis Távara Mendoza

Profesor Contratado Doctor

Jesús Justo Estebaranz

Profesor Ayudante Doctor

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Estudio de la unión adhesiva fibra de carbono – aluminio en secciones tubulares.

Autor: Javier Muñoz Anarte

Tutor: Luis Távora Mendoza

Jesús Justo Estebaranz

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*A mi padre, mi ídolo desde que
tengo uso de razón y culpable de
cuanto soy.*

Agradecimientos

Dice el sabio refrán, que “es de bien nacido, ser agradecido”, y el presente proyecto no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda de muchísimas personas. Personalmente considero el Trabajo Fin de Grado como el culmen del grado que estudiamos, por lo que como toda gran obra no puede ser hecha por una persona. Por ello, me dispongo a expresarles mi más sincera gratitud a las siguientes personas:

A mi tutor, Luis Távora, no solamente por su interés, ayuda y sus sabios consejos para enfocar el proyecto, sino también por escucharme en todo momento y confiar en mi palabra.

A mi otro tutor, Jesús Justo, por la ayuda prestada y la confianza depositada en mí para los ensayos experimentales del proyecto.

Al ARUS Andalucía Racing Team, y en especial a mi jefe del departamento de suspensión Miguel Ángel Gilabert, por darme la oportunidad de iniciarme en el mundo de los materiales compuestos y confiar en mí para realizar este estudio para el equipo. Espero que en el futuro este estudio sea de aplicación y así poder seguir avanzando y cumpliendo metas.

A Alejandro Estefani, por la ayuda prestada en el modelado en Abaqus del problema, y por su implicación e interés en el proyecto.

A Enrique Romero, cofundador de Racormance, empresa que se ha prestado para hacer la fabricación de los tubos de fibra de carbono para los ensayos experimentales, por sus datos, interés y ayuda prestadas.

A Ángel Hernández, Director Técnico de Resilux Ibérica Packaging, por las facilidades dadas para hacer los ensayos del proyecto en mi periodo de prácticas en dicha empresa.

Por último, pero no menos importante, a mi familia y amigos, tanto de aquí como de allí, por haber sido el empujón que me obligaba a seguir hacia adelante en los momentos que uno no encuentra respuestas. Y son en esos momentos en los que ellos te hacen ver que la vida son más cosas.

A todos, gracias de verdad.

Javier Muñoz Anarte.

Estudiante del Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales.

Sevilla, 2016

El presente proyecto se centra en el estudio de la unión adhesiva entre el aluminio y la fibra de carbono presente en una suspensión de un monoplaza de Fórmula Student. En la actualidad, los brazos de la suspensión de los prototipos producidos por el ARUS Andalucía Racing Team están hechos en acero inoxidable, por lo que se busca poder comprobar si es viable utilizar la fibra de carbono para los brazos de la suspensión y las uniones de ellos hechas en aluminio, mediante el estudio de la unión adhesiva entre ambos materiales, y así seguir en la búsqueda de la disminución de peso del mismo.

Para dicho estudio, se ha utilizado un modelo de elementos finitos realizado en Abaqus. Primero, se buscó poder conseguir un modelo base o modelo M0, donde simplemente se utilizaban las geometrías reales con los datos de partida. Posteriormente, una vez el modelo funcionó correctamente, se hicieron pequeñas variantes (modelos M1 y M2) para asegurarnos que el modelo base era correcto y que los datos y propiedades utilizadas eran apropiadas.

Seguidamente, en el modelo M3, nos planteamos la posibilidad de si un moleteado en el inserto de aluminio podría mejorar las propiedades de la unión. Para ello, se hizo un nuevo modelo partiendo del modelo base, pero cambiando la geometría del aluminio y del adhesivo en el nuevo modelo.

También, para buscar que las propiedades utilizadas sean reales, se han hecho dos tandas de ensayos experimentales, una de la unión carbono-carbono, y otra de la unión aluminio-aluminio, donde se han extraído los datos que caracterizan la unión del adhesivo utilizado con dichos materiales.

Estos datos han sido utilizados para poder hacer una correlación numérico-experimental y así poder hacer un modelo M4 con las propiedades reales de los materiales utilizados en la fabricación del prototipo, y así saber el comportamiento real de la unión.

Por último, se han sacado unas conclusiones del trabajo realizado, y se han planteado una serie de tareas a seguir si se quisiera profundizar y continuar con el estudio y mejora de esta unión adhesiva.

Abstract

This project is focused on the study of the adhesive bond between aluminum and carbon fiber present in a suspension of a Formula Student car. At present, the suspension arms of the prototypes produced by ARUS Andalusia Racing Team are made of stainless steel, so it seeks to verify the feasibility of using carbon fiber for suspension arms and joints made of aluminum, by studying the adhesive bond between the two materials, and therefore continue in the search for weight reduction.

For this study, we used a finite element model made in Abaqus. First, it sought to get a base or M0 model, where just the actual geometries with baseline data were used. Subsequently, once the model worked correctly, small variations (M1 and M2 models) were made to ensure that the base model was correct and that the data and properties used were appropriate.

Then, in the M3 model, we considered the possibility of whether a knurled aluminum insert could improve the properties of the joint. To this end, it became a new model based on the base model, but changing the geometry of aluminum and adhesive on the new model.

Also, to find that the properties used were real, there have been two rounds of experimental trials, one of the carbon-carbon bond, and other aluminum-aluminum bond, where we have extracted the data characterizing the union the adhesive used with such materials.

These data have been used to make a numerical-experimental correlation and thus be able to do a M4 model with the actual properties of the materials used in the manufacture of the prototype, and know the actual behaviour of the union.

Finally, conclusions have been drawn from the work done, and have raised a number of tasks to follow to deepen and to continue the study and improvement of the adhesive bond.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1 <i>Fórmula SAE</i>	1
1.2 <i>Unión fibra de carbono – aluminio: ¿dónde se usa?</i>	3
2 Modelo de daño de interfases	5
2.1 <i>Mecánica de la Fractura, teoría del modelo cohesivo</i>	5
2.2 <i>Modelo cohesivo en Abaqus, ¿cómo se modela?</i>	6
3 Definición del problema.	7
3.1 <i>Aluminio 7075</i>	8
3.2 <i>Adhesivo Permabond ES5681</i>	8
3.3 <i>Fibra de carbono</i>	9
4 Modelo numérico.....	11
4.1 <i>Modelo numérico base: M0</i>	11
4.1.1 <i>Módulo Part</i>	11
4.1.2 <i>Módulo Property</i>	12
4.1.3 <i>Módulo Assembly</i>	15
4.1.4 <i>Módulo Step</i>	16
4.1.5 <i>Módulo Interaction</i>	16
4.1.6 <i>Módulo Load</i>	20
4.1.7 <i>Módulo Mesh</i>	20
4.1.8 <i>Módulo Job</i>	23
4.2 <i>Modelo M1</i>	23
4.3 <i>Modelo M2</i>	24
4.4 <i>Modelo M3</i>	25
5 Resultados de los modelos numéricos.	27
5.1 <i>Modelo M0</i>	27
5.1.1 <i>Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento</i>	27
5.1.2 <i>Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie</i>	28
5.1.3 <i>Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie</i>	28
5.1.4 <i>Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C</i>	29
5.1.5 <i>Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al</i>	29
5.2 <i>Modelo M1</i>	30
5.2.1 <i>Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento</i>	30
5.2.2 <i>Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie</i>	30
5.2.3 <i>Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie</i>	31
5.2.4 <i>Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C</i>	31

5.2.5	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.....	32
5.3	<i>Modelo M2</i>	33
5.3.1	Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.....	33
5.3.2	Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.....	33
5.3.3	Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.....	34
5.3.4	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.....	35
5.3.5	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.....	35
5.4	<i>Modelo M3</i>	36
5.4.1	Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.....	36
5.4.2	Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.....	36
5.4.3	Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.....	37
5.4.4	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.....	38
5.4.5	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.....	38
6	Ensayos experimentales.....	39
6.1	<i>Procedimiento</i>	39
6.1.1	Ensayo tubos de carbono.....	39
6.1.2	Probeta de aluminio.....	40
6.2	<i>Ensayos</i>	42
6.2.1	Unión carbono-carbono.....	42
6.2.2	Unión aluminio-aluminio.....	44
7	Correlación numérico-experimental.....	47
7.1	<i>Propiedades extraídas de la correlación</i>	47
7.2	<i>Resultados del Modelo M4</i>	48
7.2.1	Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.....	48
7.2.2	Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.....	48
7.2.3	Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.....	49
7.2.4	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.....	49
7.2.5	Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.....	50
8	Conclusiones y trabajo futuro.....	51
8.1	<i>Conclusiones</i>	51
8.2	<i>Trabajo futuro</i>	52
9	Bibliografía.....	53
10	Anexos.....	55
10.1	<i>Anexo I: hoja técnica del adhesivo Permabond ES568I</i>	55
10.2	<i>Anexo II: código de Matlab para la obtención de las propiedades de la fibra de carbono</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del aluminio.	12
Tabla 2. Propiedades del adhesivo.	12
Tabla 3. Características elásticas del cohesivo del aluminio.	13
Tabla 4. Características de máxima tensión para el cohesivo del aluminio.	13
Tabla 5. Características de evolución del daño del cohesivo del aluminio.	13
Tabla 6. Características elásticas del cohesivo de la fibra de carbono.	14
Tabla 7. Características de máxima tensión en el cohesivo de la fibra de carbono.	14
Tabla 8. Características de la evolución del daño en el cohesivo de la fibra de carbono.	14
Tabla 9. Configuración del paso de carga.	16
Tabla 10. Datos geométricos del ensayo de pegado sobre fibra de carbono.	43
Tabla 11. Datos geométricos del ensayo sobre probetas de aluminio.	46
Tabla 12. Propiedades corregidas del cohesivo del aluminio.	47
Tabla 13. Propiedades corregidas del cohesivo de la fibra de carbono.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. ARUS Andalucía Racing Team.	1
Figura 2. SAE International.	2
Figura 3. ART-15 en la Formula Student Spain.	2
Figura 4. Horquilla de Fibra de Carbono con pieza de Aluminio.	3
Figura 5. Caña de fibra de carbono y aluminio.	3
Figura 6. Palo de Golf.	4
Figura 7. Capó en fibra de carbono.	4
Figura 8. Comportamiento de la grieta basada en la energía de rotura.	5
Figura 9. Detalle del mallado del problema.	6
Figura 10. ART-16 en la Formula Student Germany.	7
Figura 11. Sección del problema.	7
Figura 12. Aluminio 7075.	8
Figura 13. Adhesivo Epoxi Permabond ES5681.	9
Figura 14. Tubos de fibra de carbono.	10
Figura 15. Esquema y medidas del modelo.	12
Figura 16. División de las capas de fibra de carbono dentro de Abaqus.	15
Figura 17. Ensamblado del conjunto modelado.	15
Figura 18. Vista detallada del ensamblaje.	16
Figura 19. Esquema de los contactos reales.	17
Figura 20. Esquema de los contactos propios.	18
Figura 21. Esquema del punto MPC.	19
Figura 22. Esquema de las restricciones de tipo tie utilizadas.	19
Figura 23. Configuración de las cargas en el modelo.	20
Figura 24. Ejemplo de mallado del insert de aluminio.	21
Figura 25. Mallado de los elementos cohesivos.	22
Figura 26. Mallado de la fibra de carbono.	22
Figura 27. Mallado del adhesivo.	23
Figura 28. Materiales presentes en el Modelo M1.	24
Figura 29. Materiales presentes en el Modelo M2.	24
Figura 30. Vista en perspectiva del inserto triangular.	25
Figura 31. Vista lateral del inserto triangular.	25
Figura 32. Situación de materiales y geométrica en el modelo M3.	26
Figura 33. Longitud de pegado de los tubos.	39
Figura 34. Tubos con el limpiador de Loctite SF 7063.	40

Figura 35. Tubos pegados con el adhesivo Permabond ES5681	40
Figura 36. Probetas de aluminio.	41
Figura 37. Las dos probetas a pegar con el limpiador Loctite SF 70993 y el adhesivo ES5681.	41
Figura 38. Maquina del departamento donde se hizo el ensayo.	42
Figura 39. Estado de unas de las parejas de tubos después del ensayo.	44
Figura 40. Ensayo de las probetas de aluminio en la máquina del departamento.	45

Notación

MPa	Megapascal
mm	Milímetro
km	Kilómetro
N	Newton.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las uniones adhesivas entre la fibra de carbono y el aluminio nace de la necesidad de buscar el empleo de los materiales más ligeros y resistentes posibles en la ingeniería. Como veremos más adelante, dicha unión está presente en muchos aspectos de la industria y del mundo de la ingeniería de competición, donde dicha búsqueda es aún más importante.

Desde el equipo ARUS Andalucía Racing Team de la Universidad de Sevilla (figura 1), perteneciente a la Formula SAE, se tiene como uno de los múltiples objetivos a desarrollar para el ART-16 y posteriores versiones, el reducir el peso del monoplaza, por lo que una opción para cumplir dicho objetivo es pasar de una suspensión de acero a una de fibra de carbono. Para ello, se propuso estudiar en el departamento de suspensión del equipo dos proyectos: por una parte, el desarrollo de una herramienta para el cálculo de los tubos de carbono (proyecto llevado aparte por compañeros del departamento de suspensión del equipo con el presente departamento) y por otra, el presente proyecto que trata la unión adhesiva entre dichos tubos y las piezas de aluminio que se colocarían al final de los mismos.



Figura 1. ARUS Andalucía Racing Team.

1.1 Fórmula SAE.

La Fórmula SAE [1] es una competición de diseño de monoplazas de competición de corte universitario, organizada por la SAE International¹ (figura 2). Dicha competición se basa en el concepto de que una factoría contrata a un equipo de diseño estudiantil para desarrollar un pequeño monoplaza de estilo Fórmula. Cada equipo debe de diseñar, construir y probar el prototipo basado en una serie de reglas cuyo doble propósito es certificar la seguridad del mismo en pista y promover soluciones inteligentes a los distintos problemas que se puedan plantear.

¹ Society of Automotive Engineers.



Figura 2. SAE International².

Los prototipos (figura 3) son juzgados en diferentes eventos, clasificados en estáticos y dinámicos. Sin embargo, no todos los coches pueden acceder a los elementos dinámicos, ya que antes el monoplaza debe de pasar la Inspección Técnica. En dicha inspección es donde se presentan la mayoría de problemas, ya que los jueces revisan exhaustivamente el monoplaza, para certificar que cumpla con la normativa vigente. Además, en esta inspección se pasan pruebas tales como la capacidad de frenado (el monoplaza debe de ser capaz de bloquear las 4 ruedas), el nivel de ruido provocado por el coche o la prueba anti-vuelco, donde se vuelca lateralmente el monoplaza a 60° y se revisa que no caiga ningún elemento líquido ni sólido del mismo.



Figura 3. ART-15 en la Formula Student Spain.

En los elementos estáticos podemos encontrar pruebas como el Cost Report, que consiste en un desglose del coste de todo el monoplaza entero hasta la última tuerca, o el Business Plan, donde se debe de mostrar un plan de negocio y una distribución en una planta industrial para la fabricación del mismo en serie. Estos elementos se producen con el coche parado, por lo que el mismo no entra en juego en esta categoría. Sin embargo, los elementos dinámicos son donde el monoplaza juega el papel principal. En esta categoría podemos encontrar 4 pruebas tales como el *skidpad* (una serie de “ochos” donde se evalúa el paso por curva del monoplaza), el *acceleration* (donde se mide la aceleración pura y la tracción del coche), el *autocross* (lo que se podría asemejar a la clasificación en un GP al uso) y la *endurance*, donde se evalúa la resistencia y fiabilidad del monoplaza al tener que recorrer una distancia de 22 km.

² <http://www.zds.com.co/wp-content/uploads/2015/01/Screen-Shot-2015-02-04-at-4.46.13-p.m.png>

1.2 Unión fibra de carbono – aluminio: ¿dónde se usa?

La unión entre la fibra de carbono (en sus múltiples formas, tanto laminada como en forma tubular) y el aluminio está presente en muchos aspectos de la ingeniería, desde la fabricación de bicicletas hasta palos de golf, y fundamentalmente en la aeronáutica. Por ello, vamos a pasar a enumerar varios casos en la ingeniería donde estos dos materiales son usados conjuntamente, aunque la explicación de dichos usos sean siempre los mismos: la ligereza y resistencia de la fibra de carbono, y la ligereza y la capacidad de mecanizado del aluminio.

- En ciclismo (figura 4), esta unión está presente entre la pieza que soporta el buje de las ruedas y los tubos de fibra de carbono que componen el cuadro de dicha bicicleta. Con ello se consiguen dos objetivos: utilizar la resistencia y la ligereza de la fibra de carbono en el cuadro de la bicicleta y así aligerar el conjunto sin perder resistencia estructural del mismo, y utilizar las propiedades mecánicas del aluminio como elemento de unión con el resto del eje.



Figura 4. Horquilla de Fibra de Carbono con pieza de Aluminio.³

- En la pesca (figura 5) también se utiliza este dúo de materiales. Al igual que en el cuadro de la bicicleta, la fibra de carbono aporta la resistencia y sobretodo la ligereza (se han llegado a fabricar cañas de apenas 100 gramos, pesando sólo los tubos) y el aluminio es el elemento con el que se unen el resto de componentes de la caña, escogido también por su ligereza.



Figura 5. Caña de fibra de carbono y aluminio⁴.

³ <http://cicloslauniversal.com/wp-content/uploads/2015/01/Horquilla-Columbus-Straight-Destacada.jpg>

⁴ <http://kechollazo.com/wp-content/uploads/2015/05/chollo-ca%C3%B1a-de-pescar-fibra-de-carbono-1.jpg>

- En el golf (figura 6) también se sigue la tónica de utilización de estos dos materiales. Los palos se hacen de fibra de carbono para aligerarlos al máximo (pero que no flechte en demasía), y la punta es de aluminio para intentar llevar el centro de gravedad del palo lo más abajo posible y que toda la inercia se concentre ahí. Además, también se utiliza una unión adhesiva.

Una aplicación muy similar a ésta es la del conformado de los mástiles de barcos de competición en fibra de carbono.



Figura 6. Palo de Golf.⁵

- Por último, también queremos destacar la presencia de estos dos materiales en el mundo automovilístico (figura 7). Una aplicación muy usual en el mundo de la competición es la de aligerar componentes a base de la utilización de la fibra de carbono. En este caso, los capós se laminan en fibra, y la unión con el resto del coche se hace mediante las bisagras de aluminio.



Figura 7. Capó en fibra de carbono⁶.

⁵ <http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB18S7IIXXXcAXFXXq6xXFXXZ/Env%C3%ADo-libre-del-ccsme-2015-el-m%C3%A1s-nuevo-PGM-VS-para-la-mujer-eje-de-fibra.jpg>

⁶ http://cdn.clasipar.com/pictures/photos/003/067/163/vga_di%20noc%20hood.jpg

2 MODELO DE DAÑO DE INTERFASES

En el presente proyecto se utiliza como fuente teórica principal la teoría del elemento cohesivo. Por ello, en los siguientes puntos se procederá a explicar de forma abreviada qué es el modelo cohesivo, y cómo se modela en Abaqus.

2.1 Mecánica de la Fractura, teoría del modelo cohesivo.

La teoría de la Mecánica de la Fractura, en concreto el modelo cohesivo, se aplica cuando el comportamiento del material viene dominado por una grieta. El modelo utiliza, para determinar cuando aparece la rotura y su orientación, una superficie plástica en un estado tensional tridimensional.

Numéricamente, la detección de la grieta se utiliza en el incremento en el que la grieta toma forma y posteriormente se utilizan los modelos de daño elástico del material una vez han sido detectadas la presencia de la grieta y su orientación. Como resultado de lo anteriormente explicado, hay al menos un incremento en el análisis del modelo en el que tenemos que calcular la detección plástica de la grieta.

La base del comportamiento una vez se tiene una grieta formada es el concepto de fractura frágil desarrollado por Hilleborg (1976). En él se asume que la energía de fractura requerida para la formación de una unidad de superficie de grieta, G_f , es una propiedad del material. Dicha energía puede ser calculada a partir de la medida de la tensión a tracción como una función del desplazamiento de apertura de la grieta (figura 8):

$$G_f = \int \sigma_t du$$

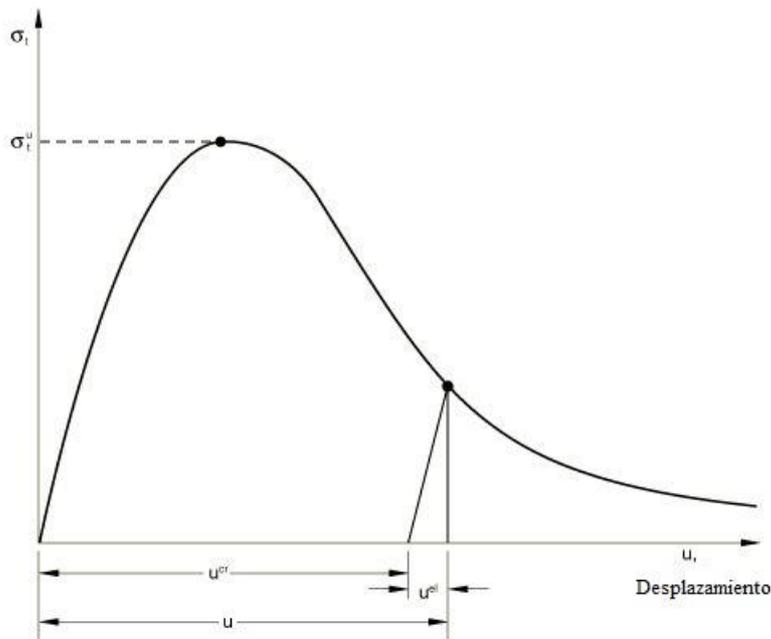


Figura 8. Comportamiento de la grieta basada en la energía de rotura.

La implicación de asumir que G_f es una propiedad del material es tal que, cuando asumimos que la parte elástica

del desplazamiento, u^{el} , es eliminada, la relación entre la tensión y la parte que queda del desplazamiento, $u^{cr} = u - u^{el}$, es fija independientemente del tamaño de la muestra.

2.2 Modelo cohesivo en Abaqus, ¿cómo se modela?

El modelado de un elemento cohesivo es un proceso sencillo, si bien hay que tener en cuenta ciertos aspectos. Para empezar, se crea el *part* como si de un elemento deformable se tratase. A la hora de asignarle una sección es donde debemos indicarle que sea una sección cohesiva, que se encuentra en el último apartado. También, cuando se le asignen las propiedades, se utilizan propiedades elásticas, pero del tipo tracción, donde deberemos dividir sus módulos de elasticidad y cortadura por el espesor.

Por último, en cuanto a propiedades se refiere, si se quiere poder ver el avance de la grieta según aumente el paso de carga, debemos de añadirle propiedades de rotura del material. En el caso del presente proyecto, se le ha añadido el criterio de máxima tensión, uno de los tantos que hay para material compuesto.

Uno de los pasos más importantes en la creación y uso de un elemento cohesivo es el mallado. Los elementos cohesivos⁷ deben de ser de un orden o dos de magnitud menores que los elementos presentes en los demás *parts* del modelo. En el caso del proyecto que nos ocupa, si tenemos un espesor total de 0,1 mm, los dos elementos cohesivos se han modelado de 0,01 mm de espesor. Dichos órdenes de magnitud se utilizan para hacer que el elemento cohesivo sólo tenga en su interior un elemento de cálculo en su dirección transversal. Por ello, cuanto más pequeños sean, menos error se puede cometer al utilizar sólo un elemento en dicha dirección.

En la figura 9, se puede ver cómo de izquierda a derecha tenemos la siguiente secuencia de *parts*: aluminio, cohesivo del aluminio, adhesivo, cohesivo de la fibra de carbono y la fibra de carbono (la primera capa). Como se puede observar, el espesor (y por tanto la distancia de cálculo del elemento) de los dos elementos cohesivos que aparecen en la imagen es mucho menor que los demás. También se puede observar que el elemento de color verde, aunque sea un adhesivo, es modelado como un sólido deformable y se le asignan propiedades tales como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson y por tanto es posible mallarlo con más elementos en su interior.

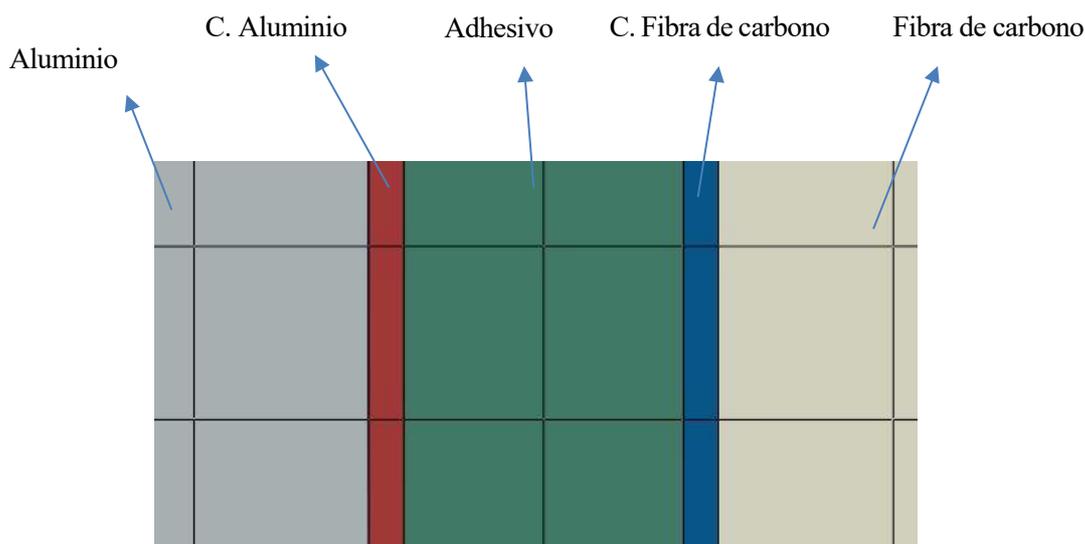


Figura 9. Detalle del mallado del problema.

⁷ Y por elementos cohesivos nos referimos a un *part* con propiedades cohesivas.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La búsqueda por parte de los equipos de competición (sea cuál sea la disciplina) de las mayores prestaciones con el menor material posible es algo intrínseco a la ingeniería. Por ello, en la construcción del monoplaza ART-16 (figura 10) se tuvo como objetivo pasar de una suspensión de barras tubulares de acero a una de tubos de fibra de carbono. De la necesidad de unir esos elementos en dicho cambio, surgió la idea del presente estudio.



Figura 10. ART-16 en la Formula Student Germany.

La mecánica del problema (figura 11) es muy sencilla: se tiene un *part* que es el inserto de aluminio, el cual suponemos que dentro de nuestro problema está empotrado totalmente (en la realidad tiene una rótula insertada en el interior, pero dentro del problema eso es un giro como sólido rígido, por lo que no es contemplado) y el tubo de fibra de carbono, el cual sólo puede hacer un movimiento de translación longitudinal en el sistema. El elemento que sirve de unión entre ambos es el adhesivo, y es el responsable de la transmisión de las cargas de un sólido al otro.

Según [3], el espesor de adhesivo elegido es de 0,1 mm, siendo este también el que se venía utilizando en los anteriores ensayos realizados por los miembros del equipo.



Figura 11. Sección del problema.

3.1 Aluminio 7075

El aluminio 7075 [2] (también conocido como Zircal) es uno de los materiales más utilizados en el mundo de la ingeniería, concretamente en la industria aeronáutica, aunque también es utilizado por sus propiedades en la industria naval y en la automoción. Principalmente es una aleación de aluminio con zinc, entorno al 5 o 6%, aunque también contiene magnesio y cobre en menor porcentaje y pequeñas cantidades de silicio, manganeso, cromo, titanio y otros. Se desarrolló por una compañía japonesa en 1936, y fue utilizado por la Armada Imperial Japonesa durante la Segunda Guerra Mundial para la construcción de los cazas Mitsubishi.

Este aluminio se caracteriza con una buena resistencia a la fatiga, baja soldabilidad y una menor resistencia a la corrosión que otras aleaciones. Sin embargo, es fácil de mecanizar y tiene un uso habitual en aplicaciones donde las características técnicas de las otras aleaciones del aluminio no son suficientes (también es debido a su coste contenido). Por los motivos anteriores, más la posibilidad de ser pulido y su dureza, es un material altamente utilizado en la fabricación de moldes.

Las gamas del aluminio 7075 (figura 12) se diferencian por su tratamiento térmico al que se somete a la aleación. Algunos ejemplos son el 7075-O, el 7075-T6 (quizás el más famoso por su aplicación aeronáutica) o el 7075-T651, que se comercializa en un estado relajado de tensiones.

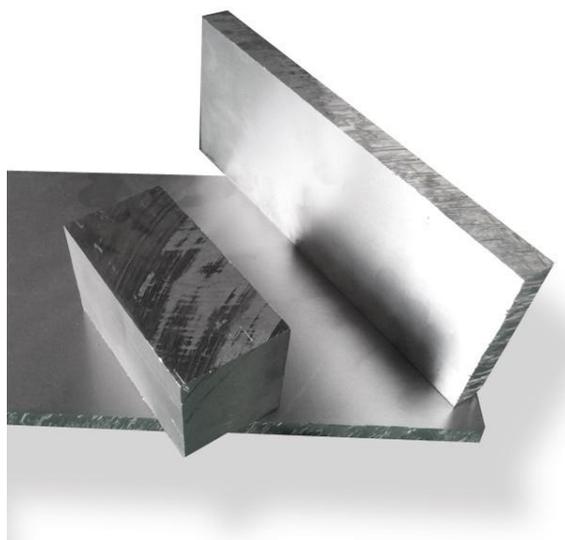


Figura 12. Aluminio 7075⁸.

3.2 Adhesivo Permabond ES5681

Según su hoja de características, el adhesivo epoxi Permabond ES5681 (figura 13) es un adhesivo epoxi monocomponente, curado con temperatura con una excelente adhesión a superficies metálicas, cerámicas y a materiales compuestos. Es un adhesivo resistente con múltiples usos, con una excelente resistencia a las vibraciones y al impacto.

Dicho adhesivo ha sido escogido por recomendación del fabricante, siendo su criterio y consejo suficiente para dicha elección. Para comprobar la fiabilidad de los datos recogidos en la hoja técnica, se han hecho unos ensayos

⁸ http://www.randrade.com/1508-thickbox_default/chapa-aluminio-7075-cortada.jpg

sobre fibra de carbono y aluminio detallados más adelante en el presente proyecto.



Figura 13. Adhesivo Epoxi Permabond ES5681⁹.

Según el artículo [3] se ha escogido un espesor de adhesivo de 0,1 mm, si bien se ha hecho un modelo numérico para ver la influencia del espesor que también está recogido en el presente proyecto.

3.3 Fibra de carbono

La fibra de carbono [4] es una fibra sintética compuesta por finos mazos de carbono. Dichos filamentos, de entre 5 y 10 μm de diámetro están compuestos por miles filamentos de carbono, que se fabrican, en muchos casos, a partir del poliacrilonitrilo. La gran característica de la fibra de carbono es que posee propiedades mecánicas similares al acero (con incluso mejor resistencia al impacto), pero sin embargo es tan ligera como la madera o el plástico.

El uso de la fibra de carbono es cada vez mayor, debido al avance de la tecnología en cuanto a su conformado y a su estudio. Por ello, hoy en día es común verla en vehículos de competición y de calle, industria aeronáutica y naviera (a cualquier nivel), equipamiento deportivo, instrumentos musicales, cañas de pescar, ...

En muchos casos, la fibra es utilizada junto a polímeros termoestables, siendo común la utilización de resinas epoxi. Debido al uso de estas resinas, en la fabricación con fibra de carbono (figura 14) suele haber un proceso de curado de la resina a una cierta temperatura, si bien es cierto que en la actualidad se están empezando a comercializar resinas capaces de curar a temperatura ambiente.

⁹ http://www.ulbrich-group.com/chemical-technical-products/PERMABOND_1K_ES5681_th8.jpg



Figura 14. Tubos de fibra de carbono¹⁰.

En nuestro caso, la fabricación de los tubos de carbono ensayados ha sido hecha por la empresa Racormance. La fibra utilizada ha sido la Tenax-J UMS45, caracterizada como fibra de carbono de alto módulo, con la resina de curado a temperatura ambiente Epolam 2017. Esta combinación tiene las siguientes propiedades:

- $E_{11} = 228,41$ GPa.
- $E_{22} = 6,283$ GPa.
- $\nu_{12} = 0,3$.
- $G_{12} = 5,6$ GPa.
- $G_{12} = G_{23} = 5,6$ GPa.
- Densidad del compuesto: $1,504$ g/cm³

Todos estos datos, tanto de la fibra de carbono, como del adhesivo y el aluminio ha sido utilizados en el modelo numérico, que se describe a continuación.

¹⁰ <http://cdn5.andro4all.com/wp-content/blogs.dir/28/files/2013/06/fibra-de-carbono.jpg>

4 MODELO NUMÉRICO.

Para el modelado numérico de este proyecto, se ha utilizado el programa comercial Abaqus, en su versión 12. Dicho programa se basa en los elementos finitos para el cálculo no sólo de elementos mecánicos, sino también para el cálculo de problemas con distribuciones de temperatura, de presiones, cálculos electromagnéticos, ...

En el planteamiento de este proyecto, se buscó el poder hacer un modelo base, llamado modelo M0. En él, se modela la situación real del conjunto. Los demás modelos (M1, M2 y M3), son ligeras variaciones de éste, teniendo en los dos primeros una variante en la asignación de los materiales, y teniendo en el tercero una pequeña variante en cuanto a geometría.

Por ello, procederemos a explicar detalladamente cómo se ha hecho el modelado del M0, y en los siguientes se indicarán los cambios realizados. Todas las medidas estarán en mm, y las tensiones y propiedades en MPa. También partimos de la hipótesis que dice que entre los cohesivos y los *parts* a los que están asignados hay una adhesión perfecta. La comprobación de esta hipótesis y la búsqueda de unos valores más precisos que caractericen las dos uniones que se producen en el modelo motivan los ensayos experimentales que se detallan en el presente proyecto.

4.1 Modelo numérico base: M0.

Este modelo y los siguientes, se basan en el concepto del modelo axisimétrico. Como lo que estamos modelando es un tubo, utilizando el modelo axisimétrico nos ahorramos modelar todo el tubo entero, y lo hacemos solo de una de las partes simétricas. Además, como ya se ha comentado, en este modelo no modelaremos la parte que tiene en cuenta a la rótula alojada en la pieza de aluminio. Aquí solo nos interesará la interacción carbono-aluminio.

El modelado de los distintos elementos se hará siguiendo la propia división que tiene Abaqus.

4.1.1 Módulo Part.

En el módulo *part* se modelan los sólidos a analizar en el modelo de elementos finitos. En este caso, todos los elementos utilizados son axisimétricos y deformables. El elemento cohesivo se utiliza para modelar la adhesión del adhesivo a los dos materiales a los que une, por lo que tenemos dos elementos cohesivos absolutamente iguales. Las medidas utilizadas son las siguientes (figura 15):

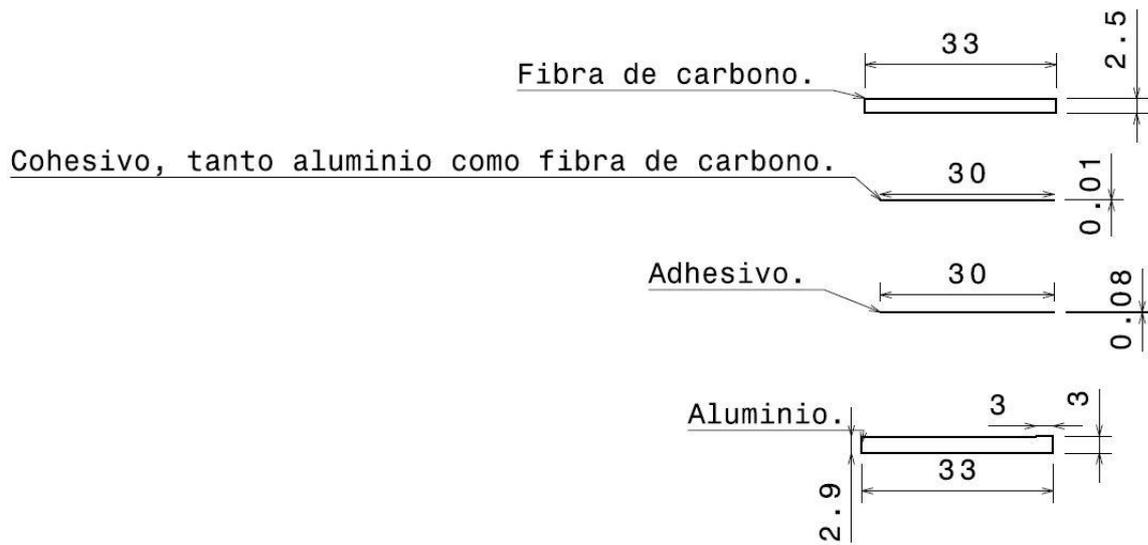


Figura 15. Esquema y medidas del modelo.

4.1.2 Módulo Property.

En el módulo *property* le asignamos a cada *part* su material y su sección. A priori, según vemos el esquema del análisis, tenemos 3 elementos elástico lineales y dos elementos cohesivos. Sin embargo, por la configuración del conjunto, y al ser un problema axisimétrico, en el *part* que modela la fibra de carbono debemos de hacer un estudio aparte para luego incluirlo en el modelo. Así pues:

4.1.2.1 Aluminio.

El aluminio se modela como un material elástico lineal con sección de sólido homogéneo, con las siguientes propiedades:

Tabla 1. Propiedades del aluminio.

Módulo de Young	Coefficiente de Poisson
72000 MPa	0,3

4.1.2.2 Adhesivo.

La parte perteneciente al adhesivo se modela como un material elástico lineal con sección sólida homogénea con las siguientes propiedades, consultadas en la hoja técnica (Anexo 1) y la marca del adhesivo:

Tabla 2. Propiedades del adhesivo.

Módulo de Young	Coefficiente de Poisson
2757 MPa	0,38

4.1.2.3 Cohesivo del Al.

El cohesivo del Aluminio es la parte que modela la adhesión entre el adhesivo y el aluminio. Para definir este material y su homólogo del carbono debemos de establecer tres características y sus propiedades correspondientes. Además, a este *part* y el otro cohesivo hay que asignarles una sección cohesiva, para que el programa a la hora de mallar y de mostrar resultados tenga en cuenta el crecimiento de la grieta. Primeramente, definimos la parte elástica, pero de tipo tracción:

Tabla 3. Características elásticas del cohesivo del aluminio.

E/Knn	G1/Kss	G2/Ktt
300000	600000	600000

Ahora debemos definir los criterios de rotura. En este caso escogemos el de máxima tensión, definido por los siguientes parámetros:

Tabla 4. Características de máxima tensión para el cohesivo del aluminio.

Tensión nominal Modo I	Tensión nominal primera dirección tangencial	Tensión nominal segunda dirección tangencial
16,33	32,66	32,66

Por último, para poder seguir la evolución de la grieta en el elemento cohesivo, y saber así cuando se despega, debemos incluir las características de la evolución del daño. Dichas propiedades son:

- Tipo: Energía.
- Ablandamiento: Lineal.
- Degradación: Máxima.
- Comportamiento en modo mixto: BK.
- Ratio modo mixto: energía.
- Coeficiente BK: 2.284.
- Valores energéticos (definidos en J/mm²):

Tabla 5. Características de evolución del daño del cohesivo del aluminio.

Energía normal de fractura	Energía de fractura a cortante en la primera dirección tangencial.	Energía de fractura a cortante en la segunda dirección tangencial.
0,75	1,5	1,5

4.1.2.4 Cohesivo de la Fibra de carbono.

El cohesivo de la fibra de carbono es exactamente igual al del aluminio (incluyendo la sección de tipo cohesivo), aunque obviamente cambian sus propiedades. Dichas propiedades son:

Tabla 6. Características elásticas del cohesivo de la fibra de carbono¹¹.

E/Knn	G1/Kss	G2/Ktt
300000	600000	600000

Tabla 7. Características de máxima tensión en el cohesivo de la fibra de carbono.

Tensión nominal Modo I	Tensión nominal primera dirección tangencial	Tensión nominal segunda dirección tangencial
2,5	5	5

Por último, procedemos a definir los parámetros de evolución del daño, como se ha hecho anteriormente:

- Tipo: Energía.
- Ablandamiento: Lineal.
- Degradación: Máxima.
- Comportamiento en modo mixto: BK.
- Ratio modo mixto: energía.
- Coeficiente BK: 2.284.
- Valores energéticos (definidos en J/mm²):

Tabla 8. Características de la evolución del daño en el cohesivo de la fibra de carbono.

Energía normal de fractura	Energía de fractura a cortante en la primera dirección tangencial.	Energía de fractura a cortante en la segunda dirección tangencial.
0,75	1,5	1,5

4.1.2.5 Fibra de carbono.

El modelado de la fibra de carbono (figura 16) en este proyecto no ha sido algo trivial. Tanto en el modelado 2D como el axisimétrico, Abaqus entiende que la dirección de apilado de las capas de fibra de carbono es la perpendicular al plano de dibujo. Sin embargo, en nuestro modelo, la secuencia de apilado sigue una normal que está dentro del plano de dibujo, por lo que no podemos utilizar las herramientas para material compuesto que trae el programa. Como solución a dicho problema, ideamos el caracterizar nuestro material de fibra de carbono como anisótropo y dividirlo en dos, para así tener las capas a $\pm 20^\circ$. Posteriormente, dentro del mismo *part*, creamos geoméricamente 10 franjas iguales, donde aplicamos alternativamente los dos materiales, para así crear las 10 capas de las que dispone el tubo real de fibra de carbono. El código de obtención se puede consultar en el anexo 2, donde además se ha utilizado la teoría del laminado explicada en el libro de los profesores de este departamento [5].

¹¹ Como podemos observar, coincide con el valor equivalente en el aluminio.



Figura 16. División de las capas de fibra de carbono dentro de Abaqus.

Para definir nuestro material como anisótropo, partimos de las propiedades de la fibra + resina proporcionadas por la empresa Racormance. Todo el procedimiento está en el anexo 2 (hecho en un código de Matlab), sin embargo, sí se quiere explicar que dentro de este *part* tenemos dos secciones, una asignada a cada parte: las franjas de color rojo son a las que se les ha asignado las propiedades de la fibra a 20° de orientación, mientras que a las de color azul son las que están a -20° . Dichas secciones son sólidas y homogéneas. Por último, tenemos que destacar que, para el correcto modelado de las propiedades de las láminas, se les ha asignado un sistema coordenado cilíndrico para que así funcionen en el modelo axisimétrico.

4.1.3 Módulo Assembly.

En el módulo *assembly* lo único que se hace es situar geoméricamente los diferentes *parts* dentro del modelo, pero no se establecen relaciones entre ellos. De esta manera, la situación que queda es la mostrada en la figura 17:

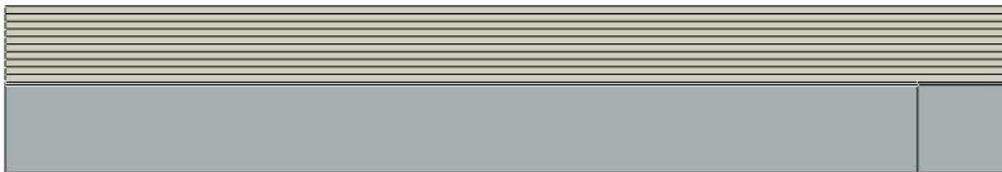


Figura 17. Ensamblado del conjunto modelado.

En la figura 18, donde tenemos una vista más aumentada y detallada del ensamblaje, se ven, de abajo a arriba los siguientes *parts*: aluminio, cohesivo del aluminio, adhesivo, cohesivo del carbono y fibra de carbono.



Figura 18. Vista detallada del ensamblaje.

4.1.4 Módulo Step.

En el módulo *step* se configura el paso de carga. Es importante configurar un paso que permita la correcta resolución del problema, pero también que ahorre el máximo coste computacional posible. Sin embargo, la anterior propuesta es una de las tantas estrategias que hay a la hora de configurar el *step*. La estrategia seguida finalmente en el proyecto ha sido la de aumentar los puntos de cálculo (por eso se ha limitado el paso a 0.01) a base de subir el coste computacional del cálculo. El *step* que se ha configurado en este proyecto, y que ha funcionado correctamente de acuerdo a lo que se requería es el siguiente:

Inicial	Mínimo	Máximo
0.001	1E-005	0.01

Tabla 9. Configuración del paso de carga.

En la pestaña “Otros” se le ha puesto que el almacenamiento en la matriz sea no-simétrico. Al poner unos pasos de carga tan pequeños, se le ha puesto como número máximo de pasos posibles 1000000, para que así tenga posibilidades de cálculo de sobra.

Por último, para que Abaqus nos pueda mostrar la degradación de los elementos cohesivos, se le ha pedido que nos muestre la variable “maxsct”, que simboliza la iniciación de grieta según el criterio de máxima tensión. Esta variable sólo es mostrada en ambos elementos cohesivos, que son los que se pueden degradar.

4.1.5 Módulo Interaction.

El módulo *interaction* es uno de los más importantes a la hora de hacer este modelo, pues tenemos muchos sólidos en contacto, y es muy importante a la hora de obtener unos resultados fiables el que todos los sólidos estén correctamente relacionados. Definimos dos categorías de interacciones, las referidas a los contactos en sí, y las que están referidas a las restricciones. Los contactos son contactos físicos que se producirían en la realidad y las restricciones están asociadas a la plena adhesión entre los cohesivos y el aluminio/fibra de carbono y los cohesivos y el *part* adhesivo intermedio que modela la elasticidad del adhesivo. También se modela como una

restricción (en este caso de tipo cinemático) al MPC que se utiliza para sólo tener que aplicar un desplazamiento en el punto MPC y que éste se transmita al *part* fibra de carbono emulando así el desplazamiento del tubo al intentar despegarse.

4.1.5.1 Contactos.

Dentro de la categoría de las interacciones por contacto podemos establecer otras dos sub-categorías: los contactos reales y los contactos propios entre los sólidos. Definimos como contacto real el contacto entre, por ejemplo, el adhesivo y la parte del aluminio que se pone de “tope” para que el adhesivo no salga hacia afuera del tubo. Si no se definiera un contacto entre esas superficies, el problema no entendería que ahí hay una limitación física y podría darse el caso de una interpenetración entre ambas superficies.

Por otro lado, defino como contacto propio el hecho de que un sólido no puede interpenetrarse a sí mismo. Si tomamos como ejemplo uno de los dos cohesivos, ese *part* podrá deformarse de múltiples maneras, pero lo que no puede hacer es “desdoblarse”, esto es, si tiene forma rectangular, el lado de la derecha debe de permanecer siempre en la derecha, aunque la variación de la superficie del cohesivo sea negativa o positiva.

Para poder modelar ambos contactos, es necesario establecer qué tipo de contacto tenemos. En este modelo se ha optado por un contacto de tipo normal, que ha sido aplicado a todos los contactos.

Los contactos que se han modelado del tipo contacto real han sido los siguientes, figura 19:

1. Cohesivo Al con el tope de aluminio.
2. Cohesivo FC con el tope de aluminio.
3. Adhesivo con el tope de aluminio.
4. *Part* aluminio con el *part* fibra de carbono, para impedir que se interpenetren.

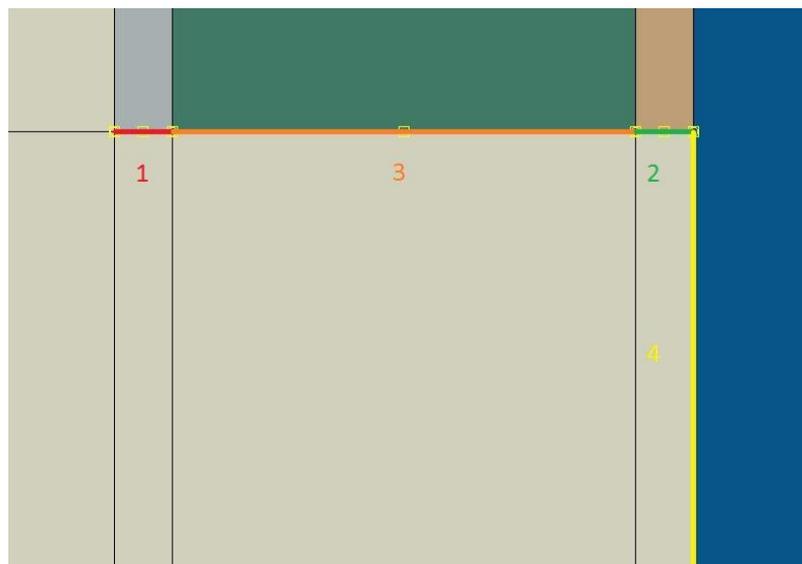


Figura 19. Esquema de los contactos reales.

Por la otra parte, los contactos que se han modelado como contacto propio son los dos lados longitudinales de ambos cohesivos. De forma esquemática, figura 20:

1. Cohesivo Al.
2. Cohesivo FC.

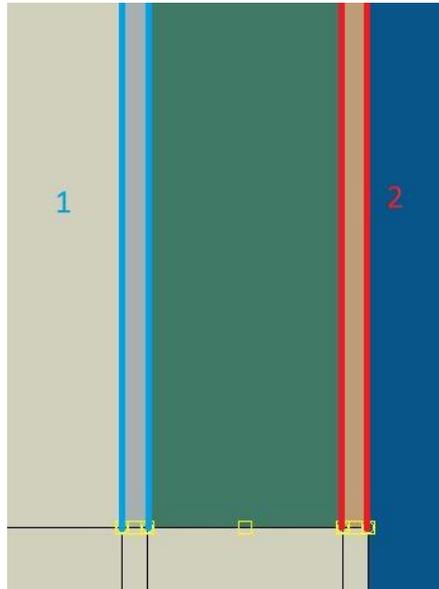


Figura 20. Esquema de los contactos propios.

4.1.5.2 Restricciones.

En las restricciones también encontramos dos tipos de ellas: el MPC y los tie. Con el MPC lo que queremos es que el desplazamiento o la carga que se aplique en un punto se traslade a la superficie esclava. Así, podemos utilizarlo para poner sólo un desplazamiento en ese punto y no tener que asignarlo a toda la superficie. Con los de tipo tie, lo que hacemos es forzar una adhesión perfecta entre varios *parts*, es decir, vinculamos los modos del mallado de esas superficies para que no se puedan separar.

El MPC aplicado puede verse en la figura 21. Relaciona el punto fuera del *part* fibra de carbono con la superficie superior, simulando el desplazamiento que ocurriría si el tubo se despegase. Esta es la condición de contorno que origina las cargas en nuestro modelo.

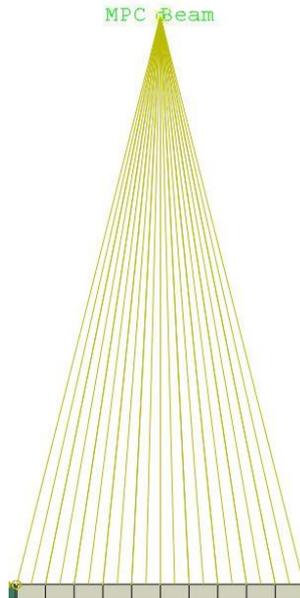


Figura 21. Esquema del punto MPC.

Con los tie forzamos una perfecta adhesión entre el cohesivo y el elemento a pegar (hipótesis en la que se basa el presente modelo de elementos finitos y sus distintas variantes). También forzamos una cohesión perfecta entre los cohesivos y el adhesivo, ya que en la realidad forman parte del mismo sólido, que es el pegamento aplicado.

Los tie que están aplicados en este modelo son los siguientes, figura 22:

1. Entre el Al y el cohesivo Al.
2. Entre el cohesivo Al y el adhesivo.
3. Entre la fibra de carbono y el cohesivo FC.
4. Entre el cohesivo FC y el adhesivo.

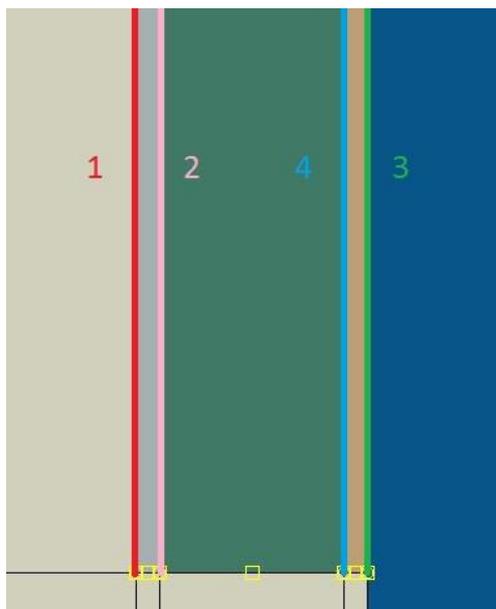


Figura 22. Esquema de las restricciones de tipo tie utilizadas.

4.1.6 Módulo Load.

En el módulo *load* es donde asignamos las condiciones de contorno a nuestro modelo. En este caso, son bastante sencillas: un empotramiento en la parte del *part* aluminio que está más cercana a la rótula, y un desplazamiento longitudinal de 0,015 mm en el punto MPC que simula la acción del despegue. Como se ha escrito anteriormente en el presente proyecto, el empotrar el aluminio en el modelo se debe a que, aunque en la realidad el conjunto gira, gira como un sólido rígido todo el mismo porque lo que ese giro no afecta al despegue del tubo de la pieza de aluminio.

Como se puede observar en la figura 23, el desplazamiento es aplicado en el punto de referencia del MPC, por lo que se trasladará a todo el tubo de carbono.

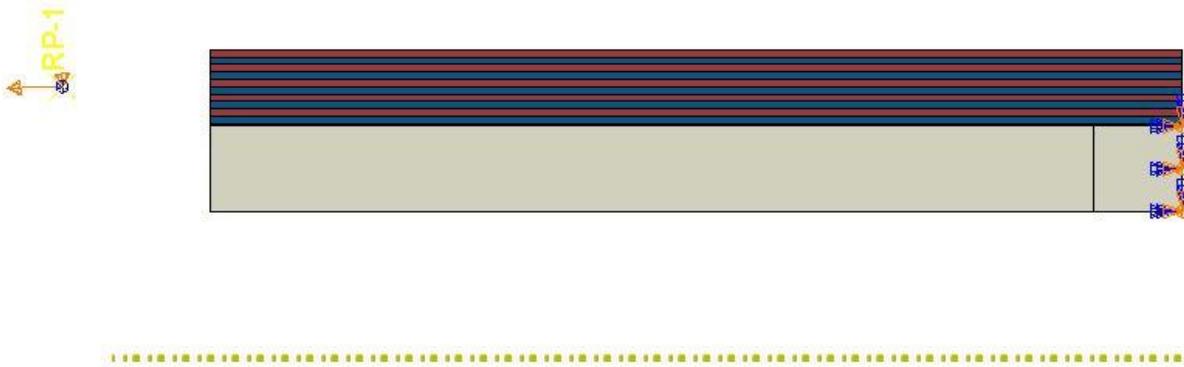


Figura 23. Configuración de las cargas en el modelo.

4.1.7 Módulo Mesh.

En el módulo *mesh* es donde mallamos el modelo. Es en este momento del modelado donde pasamos de tener superficies geométricas sin ninguna capacidad de cálculo a asignarles unos puntos de cálculo con un determinado orden y sentido. Este módulo es uno de los más importantes de todo el proceso, pues con un mal mallado podemos falsear los resultados u obtener un tiempo computacional demasiado elevado. El proceso de mallado ha de ser inteligente y consecuente con los medios que se tienen y con lo que se quiere obtener. Es evidente que a más puntos de cálculo se obtiene más precisión en el resultado de los mismos, pero también se tendrá un coste computacional (tiempo de cálculo) más elevado. Queda en la persona que modela encontrar ese equilibrio entre ambos aspectos.

En el mallado de este modelo el coste computacional no es un aspecto relevante, ya que al ser un modelo axisimétrico se modela en 2D, lo que disminuye radicalmente el número de nodos de cálculo y por ende su tiempo de cálculo.

Por último, antes de explicar el mallado de los 5 elementos presentes en el modelo, es importante decir qué tipo de elementos lleva cada *part*: los modelados como sólidos homogéneos llevan el CAX4R, un elemento axisimétrico de 4 nodos bilineal con integración reducida y control del reloj de arena. Los elementos cohesivos llevan el COHAX4: un elemento axisimétrico cohesivo de 4 nodos.

4.1.7.1 Inserto de aluminio.

A la hora de mallar el modelo, el inserto de aluminio ha sido la parte más difícil de mallar, ya que por un lado tiene que tener un mallado fino para poder congeniar bien con el mallado del cohesivo que está a su lado, pero por otra parte hay grandes partes del inserto donde los resultados obtenidos no nos son relevantes, por lo que se intenta reducir los nodos en esa zona.

En la figura 24 se puede observar el problema que se ha tenido a la hora de mallar esta pieza. En la parte de la izq. se ha tratado de reducir los puntos de cálculo, ya que no es relevante. Sin embargo, en la parte de la derecha han tenido que ser aumentados para que coincidan con el número de nodos del elemento cohesivo asociado a la pieza de aluminio, y así obtener mejor resolución del problema.

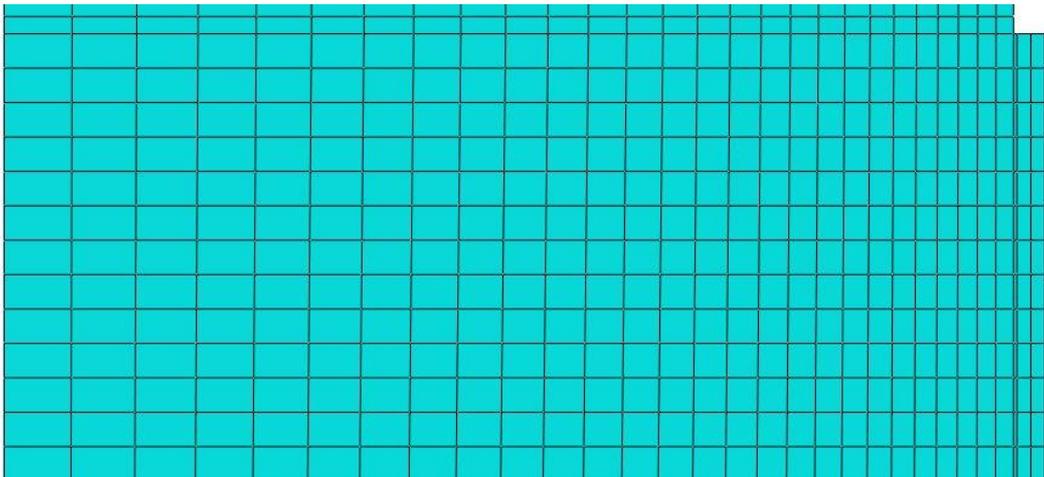


Figura 24. Ejemplo de mallado del insert de aluminio.

También en la parte inferior derecha (en el “tope”), se han incluido dos pequeñas particiones que parecen sin sentido alguno, pero que hacen que mejore la resolución del problema al encajar con los nodos de las capas de cohesivo-adhesivo-cohesivo.

4.1.7.2 Elementos cohesivos.

Ambos elementos cohesivos (figura 25) han sido mallados con un mallado muy fino para que contengan un gran número de nodos, pero con un solo elemento en su dirección transversal. El motivo del mallado fino (esto es, con muchos nodos o puntos de cálculo) es para poder detectar en cada paso de carga el crecimiento de las grietas que se producirían por el despegue del tubo de carbono.



Figura 25. Mallado de los elementos cohesivos.

4.1.7.3 Tubo de carbono.

Para el mallado de la fibra de carbono (figura 26) se ha optado por dejar en todo el *part* el mismo tamaño de malla que el cohesivo asociado a dicha fibra.

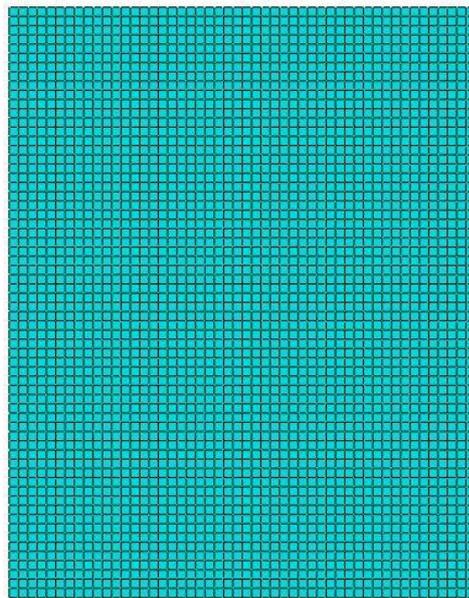


Figura 26. Mallado de la fibra de carbono.

4.1.7.4 Adhesivo.

El mallado del adhesivo también ha sido muy simple. Se ha escogido el tamaño de malla de los elementos cohesivos, permitiendo que haya dos elementos en su dirección transversal (al ser un sólido homogéneo).



Figura 27. Mallado del adhesivo.

4.1.8 Módulo Job.

En el módulo *job* es donde se le indica al programa que ponga en marcha la resolución de las ecuaciones asociadas al modelo de elementos finitos que hemos desarrollado. Se puede configurar desde la potencia del ordenador que le dejamos disponible para resolver, hasta el cuándo lo puede hacer. Además, en ese módulo se pueden guardar tantos *jobs* como nos hagan falta, con distintos valores de cargas o condiciones de contorno. Esto es útil si tenemos un problema con varias configuraciones.

4.2 Modelo M1.

El modelo M1 es la primera variante del M0, donde lo único que se cambia son las propiedades del cohesivo de la fibra de carbono, asignándole las propiedades del cohesivo del aluminio. Como se puede observar en la siguiente imagen, donde se le pide a Abaqus que nos diferencie los *parts* por materiales, los dos cohesivos aparecen en gris ya que tienen el mismo material (figura 28).

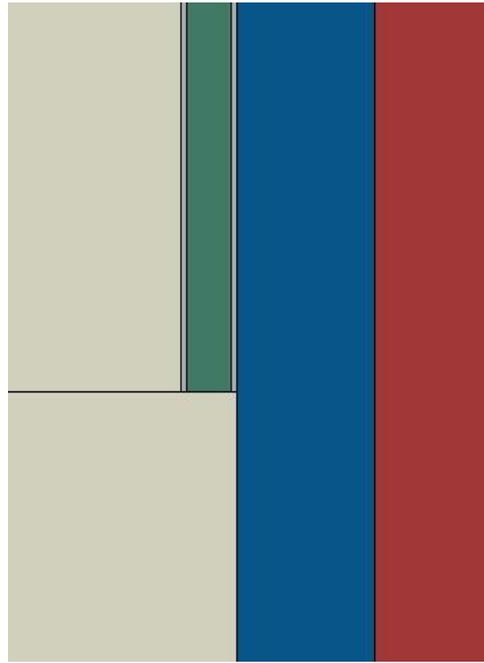


Figura 28. Materiales presentes en el Modelo M1.

Salvo este cambio, todo lo demás configurado en el modelo M0 se mantiene en esta variante.

4.3 Modelo M2.

El modelo M2 es la segunda variante del M0, en el que los únicos cambios que se han producido han sido el intercambiar las propiedades de los cohesivos, teniendo ahora el cohesivo del aluminio las propiedades del asignado a la fibra de carbono, y viceversa.

La situación del modelado es la siguiente, figura 29:

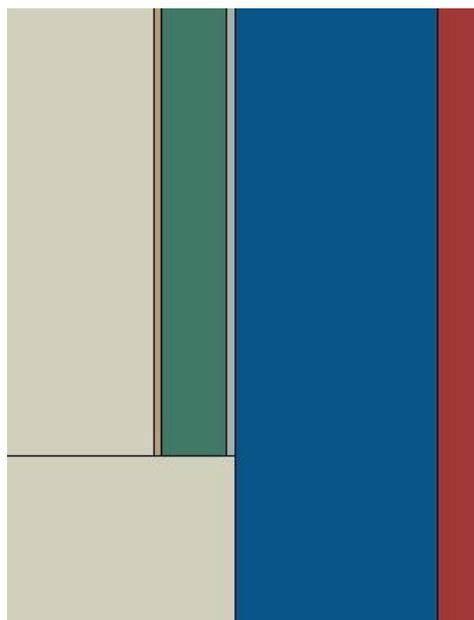


Figura 29. Materiales presentes en el Modelo M2.

4.4 Modelo M3.

Las variantes introducidas en el modelo M3 no son tan simples como los cambios de propiedades producidos en los dos primeros. En este caso, las propiedades de los materiales se mantienen intactas, pero la geometría de los *parts* no. Como se puede ver en la figura 30, en una vista en perspectiva:

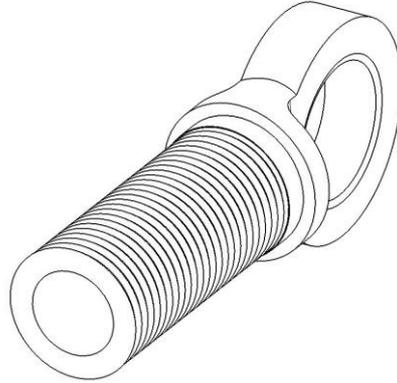


Figura 30. Vista en perspectiva del inserto triangular.

Con este modelo se pretende estudiar si un cambio en la geometría del inserto, como un mecanizado en forma triangular de la superficie (figura 31), podría mejorar la adhesión al mismo.

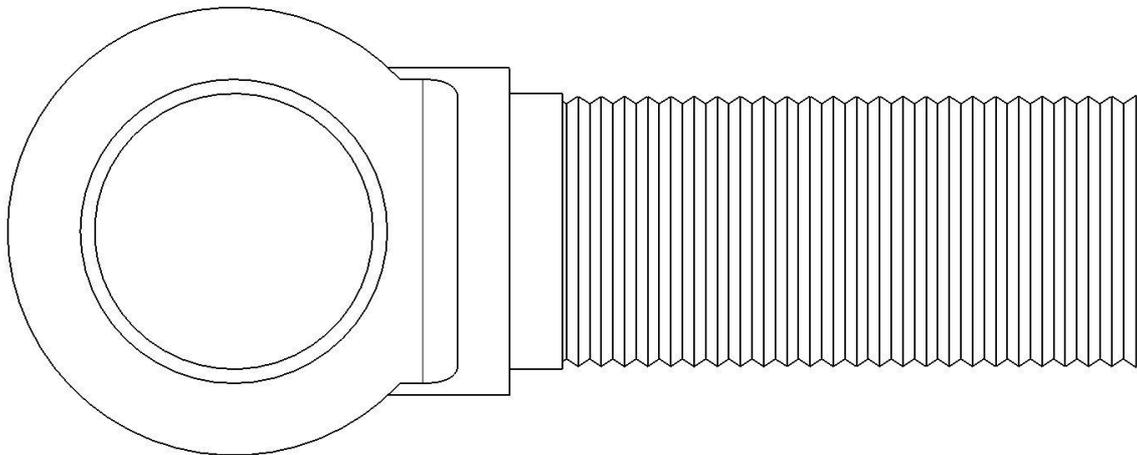


Figura 31. Vista lateral del inserto triangular.

Para el modelado de este caso en Abaqus (figura 32), se ha tenido que cambiar la geometría de tres *parts*: el cohesivo del aluminio, el propio aluminio y el adhesivo. La geometría se ha cambiado para adaptarla al diseño del inserto arriba mostrado, y para asegurar que el cohesivo sigue teniendo un espesor de 0,01 mm. Por tanto, la vista general que se obtiene es la siguiente:

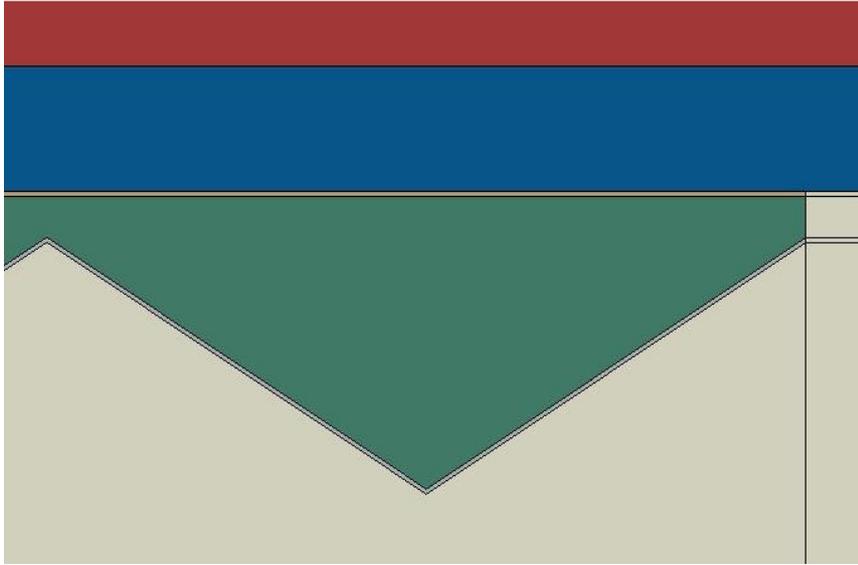


Figura 32 Situación de maeriales y geométrica en el modelo M3.

5 RESULTADOS DE LOS MODELOS NUMÉRICOS.

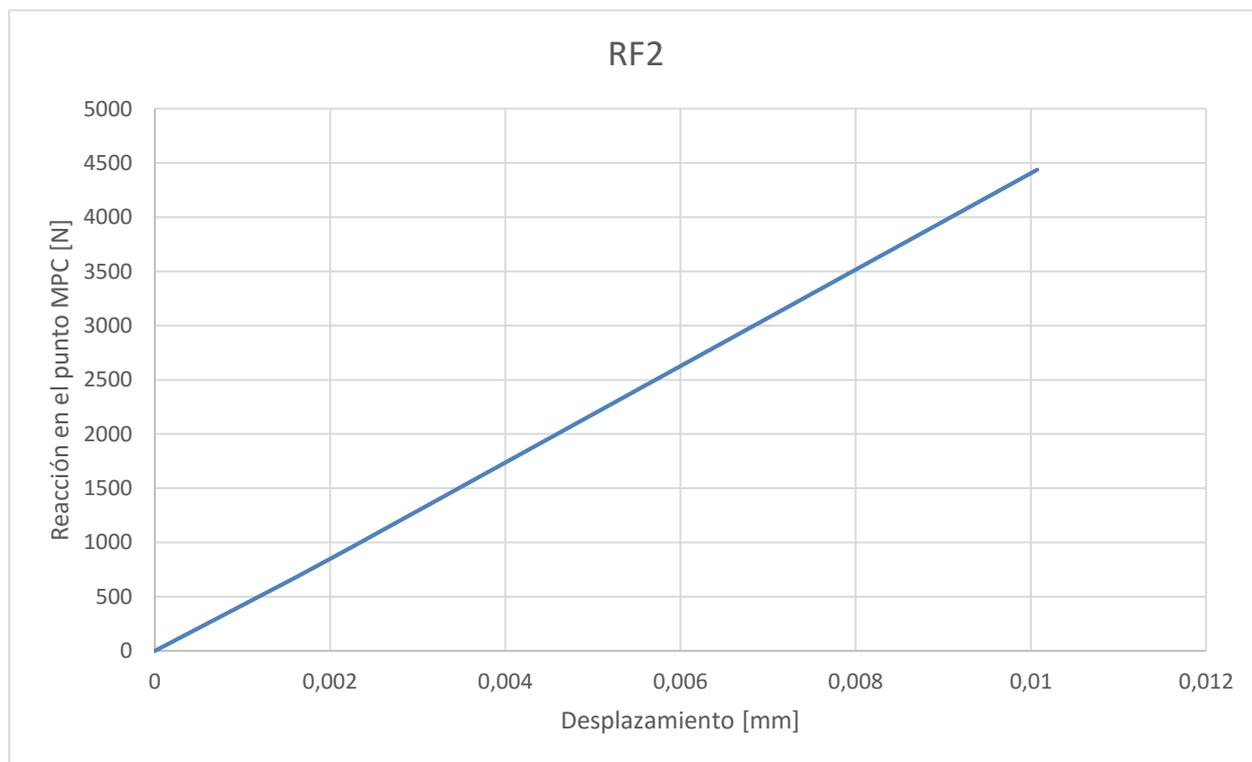
Una vez modelados y simulados los 4 modelos numéricos, se va a proceder a mostrar los resultados de los mismos. Para ello, se ha creído conveniente mostrar una gráfica de fuerza en las reacciones frente al desplazamiento aplicado en el punto MPC, y cuatro gráficas basadas en los nodos que corresponden a los elementos cohesivos utilizados: dos con el estado del mismo cohesivo (el porcentaje en tanto por uno de degradación) en la superficie correspondiente al aluminio y otra a la fibra de carbono y otras dos con σ_{22} y σ_{12} en dichas superficies.

5.1 Modelo M0.

Los resultados obtenidos en el modelo M0 (modelo base) han sido los siguientes:

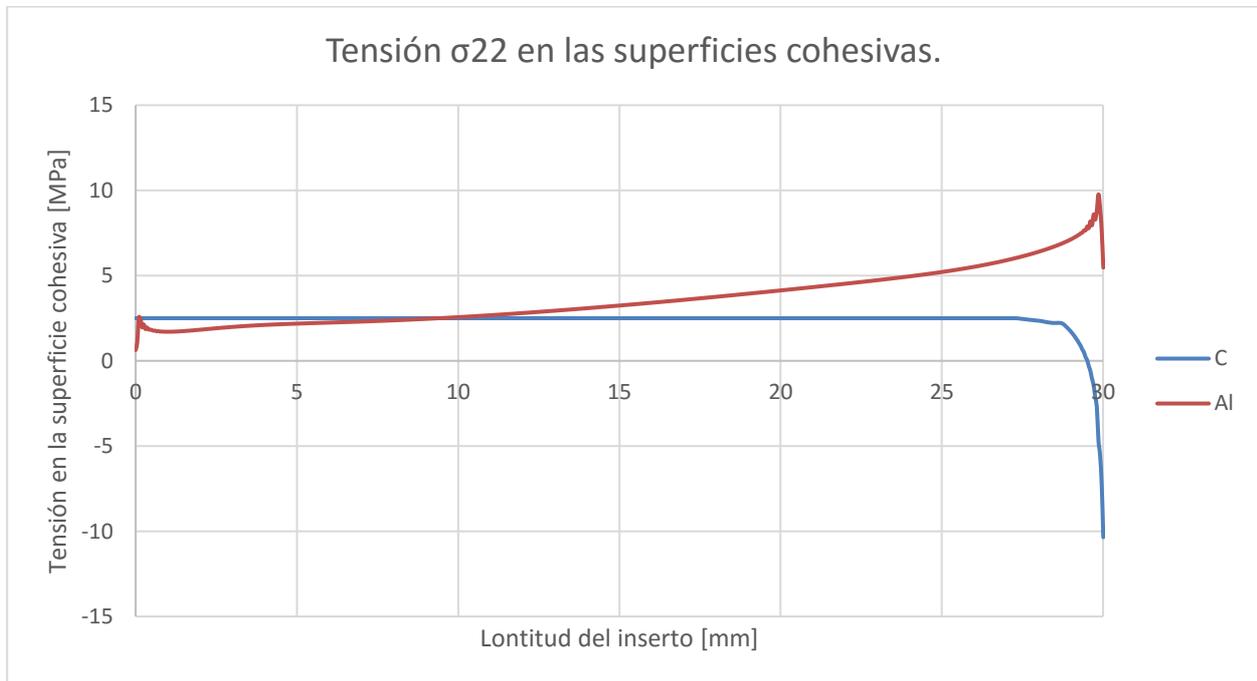
5.1.1 Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.

En esta gráfica se relaciona la fuerza de reacción obtenida en el punto MPC junto a su desplazamiento.



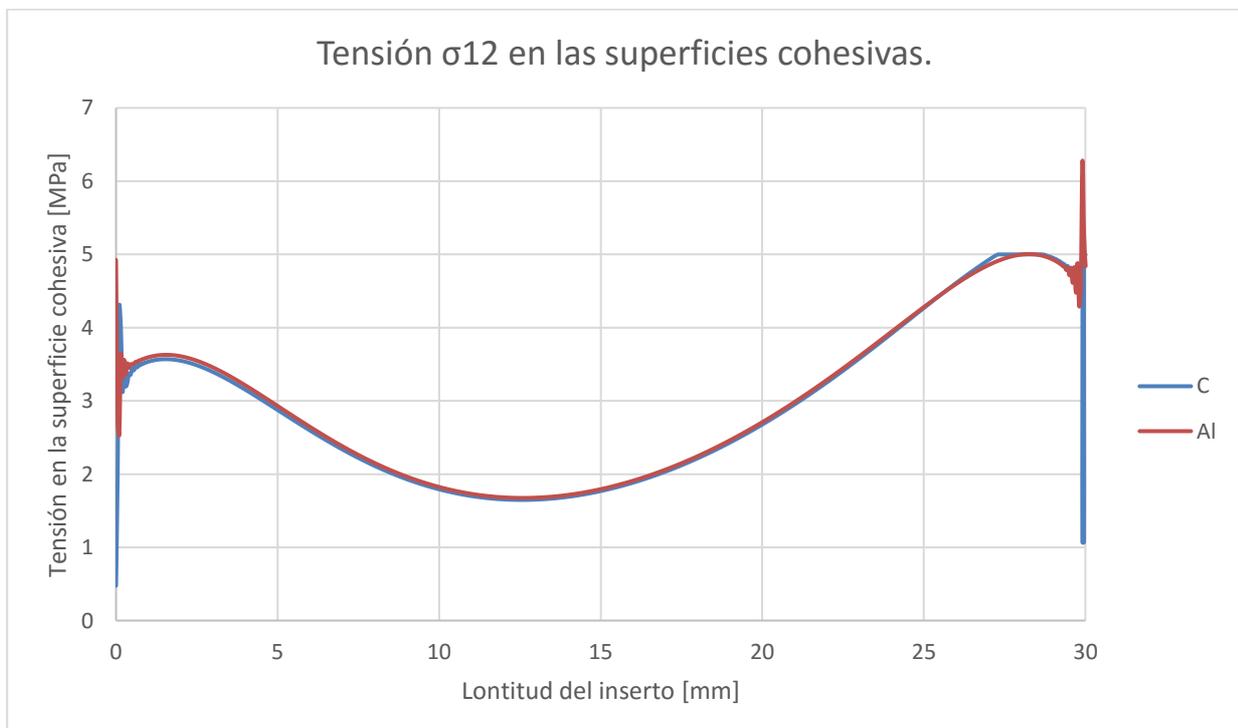
5.1.2 Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{22} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



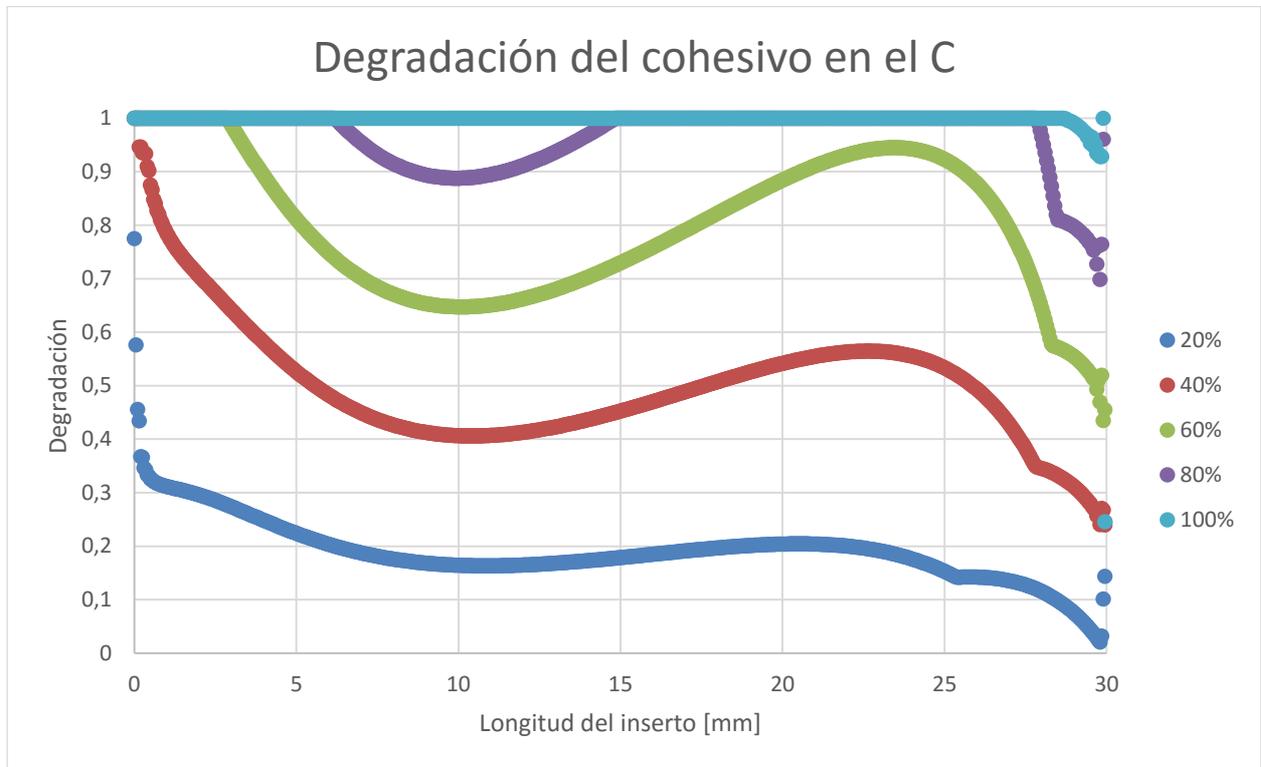
5.1.3 Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{12} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



5.1.4 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.

Degradación del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.



5.1.5 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.

Degradación del elemento cohesivo asociado al aluminio a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.

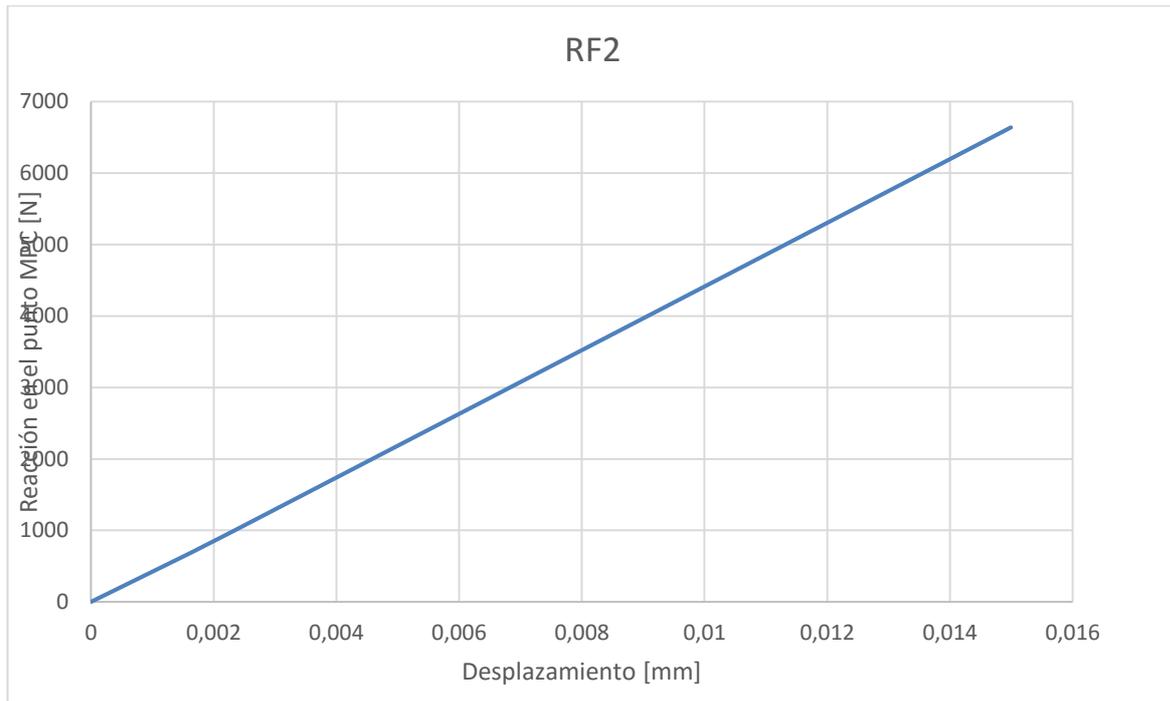


5.2 Modelo M1.

Los resultados obtenidos en el modelo M1 (con ambos cohesivos con las propiedades de adhesión al aluminio) han sido los siguientes:

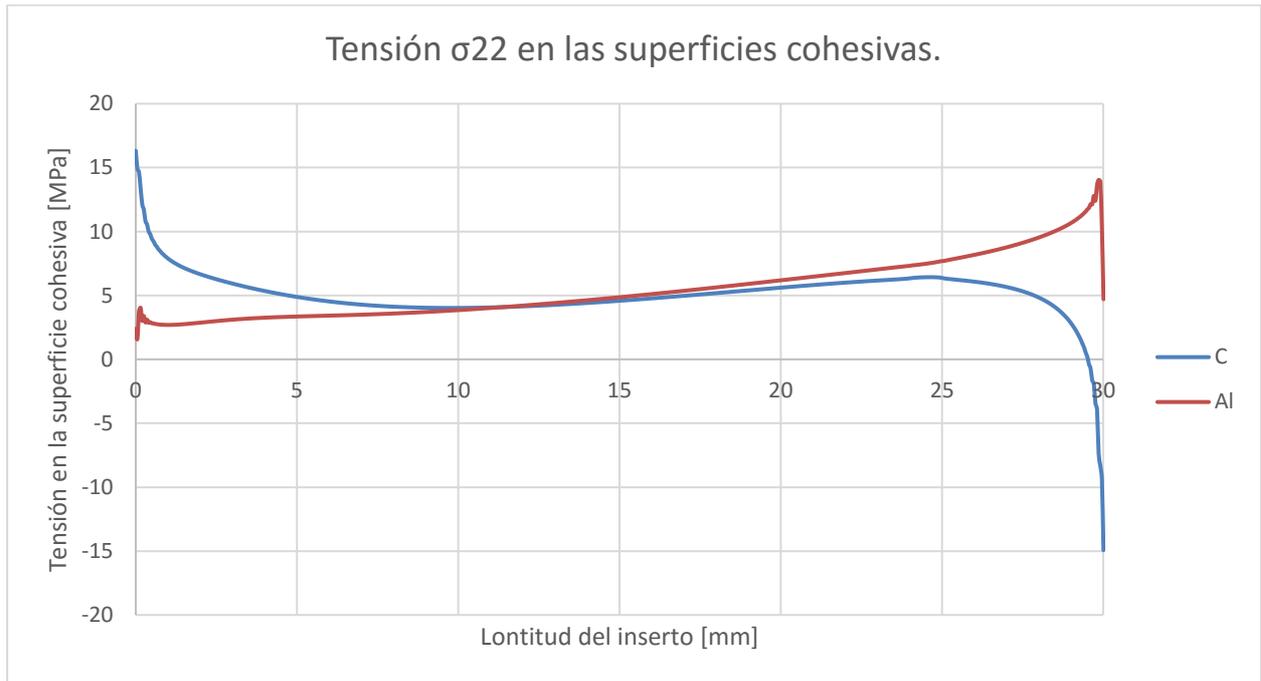
5.2.1 Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.

En esta gráfica se relaciona la fuerza de reacción obtenida en el punto MPC junto a su desplazamiento. Al tener ambos elementos cohesivos las propiedades de la adhesión del aluminio, la fuerza de reacción final en la rotura es mucho mayor, y el desplazamiento que ha admitido la unión también.



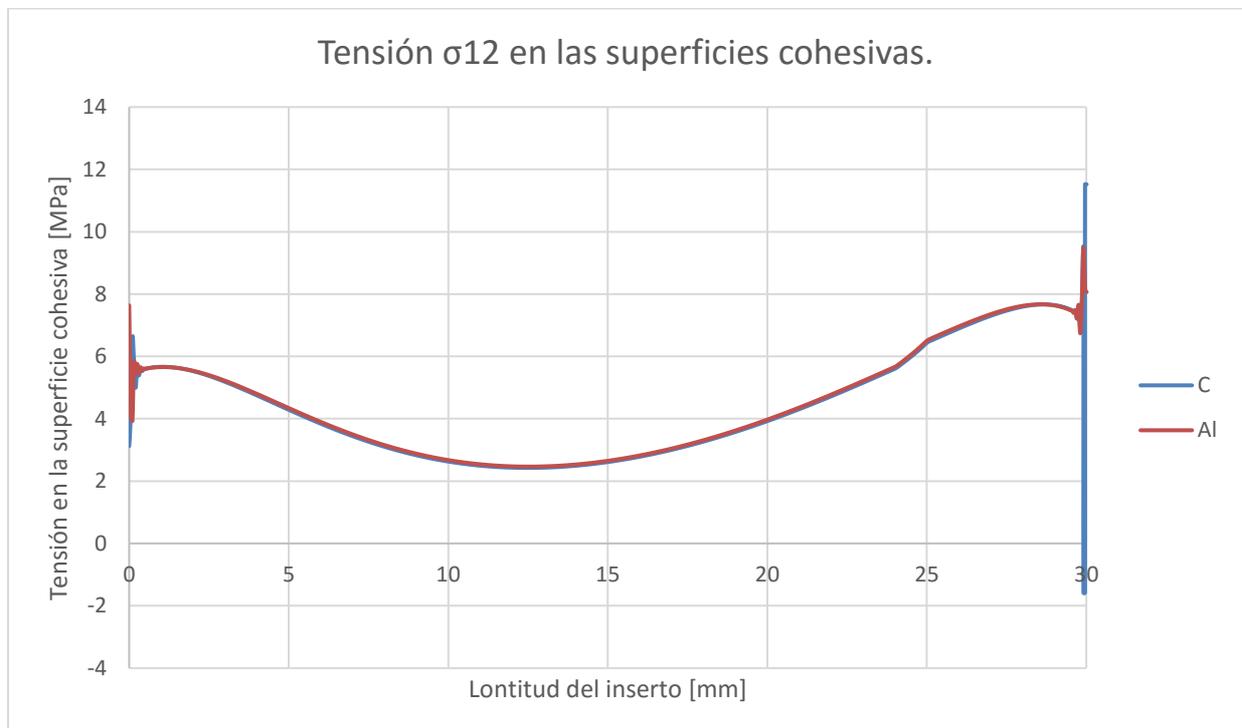
5.2.2 Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{22} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



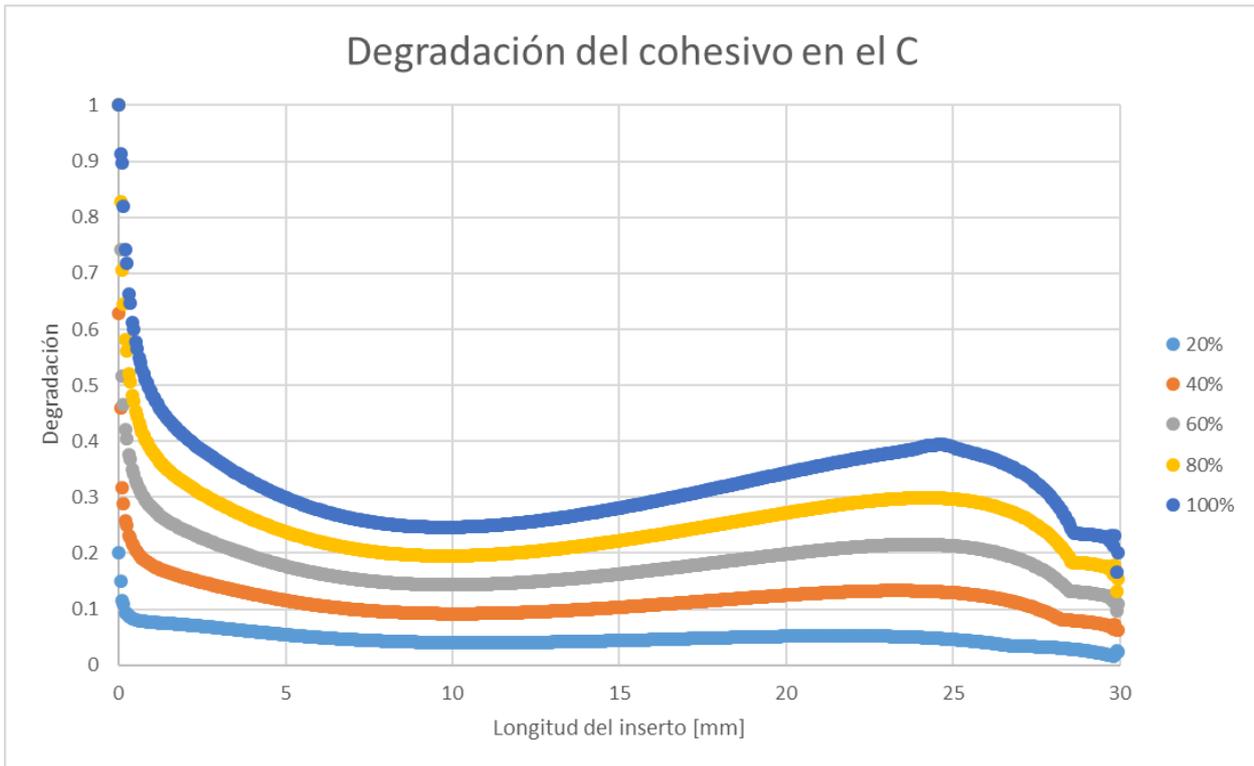
5.2.3 Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{12} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



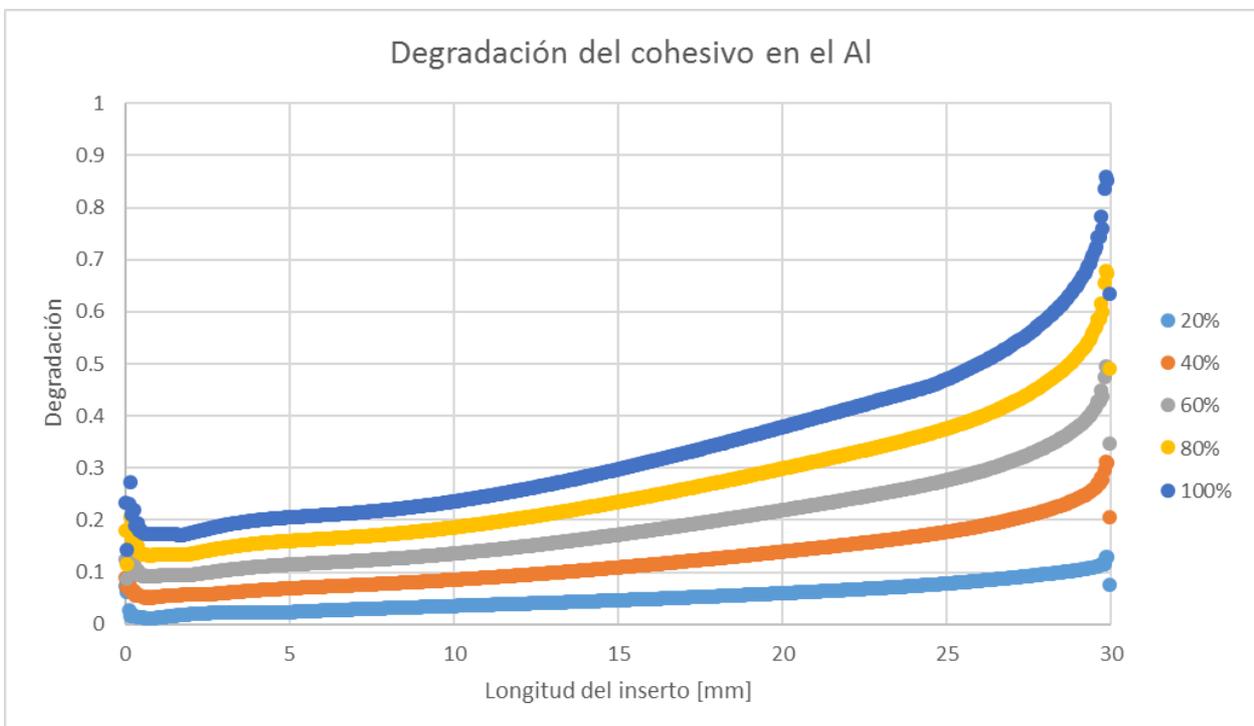
5.2.4 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.

Degradación del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.



5.2.5 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.

Degradación del elemento cohesivo asociado al aluminio a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.

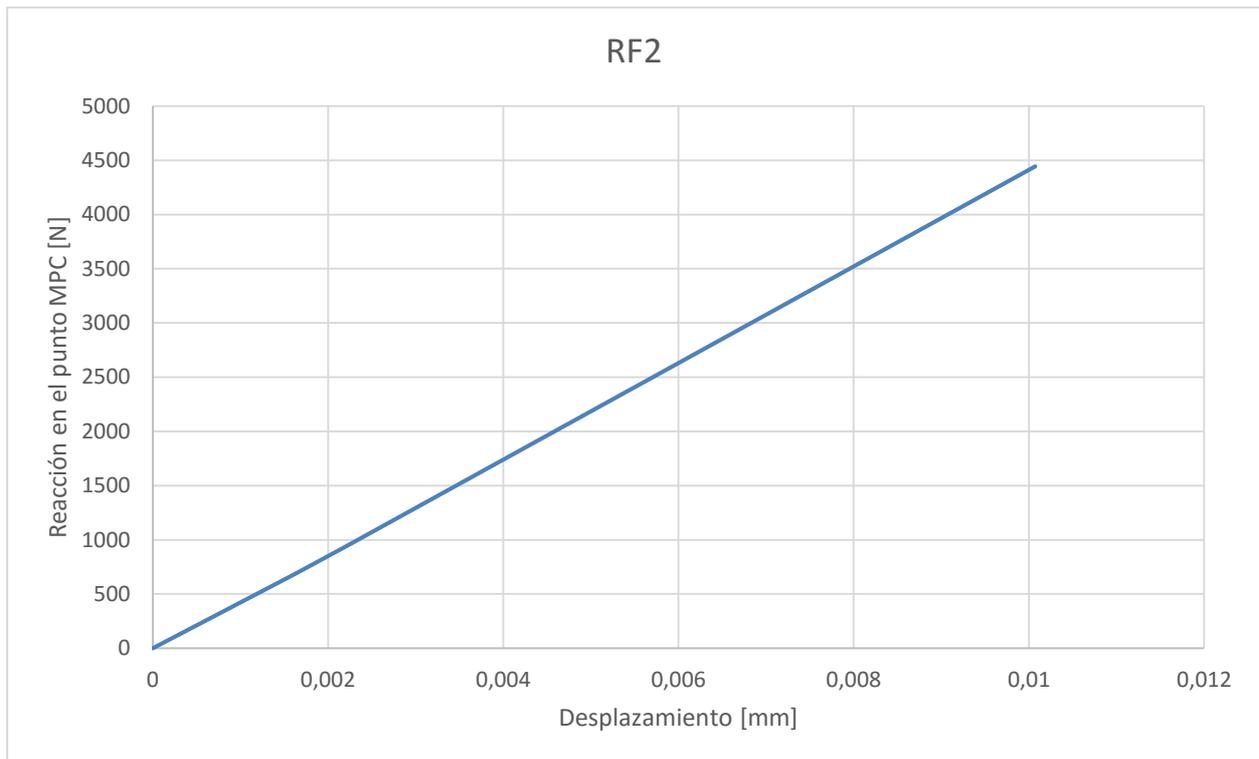


5.3 Modelo M2.

Los resultados obtenidos en el modelo M2 (con las propiedades de los elementos cohesivos cambiadas a la inversa) han sido los siguientes:

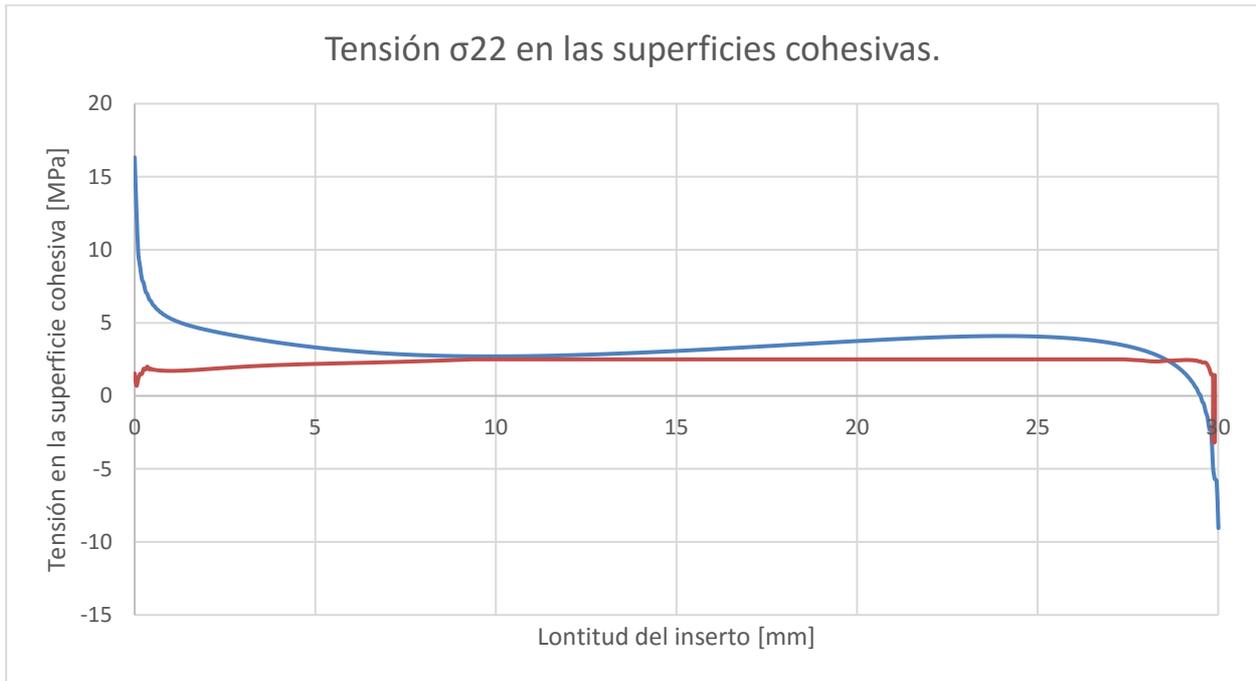
5.3.1 Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.

En esta gráfica se relaciona la fuerza de reacción obtenida en el punto MPC junto a su desplazamiento. Se puede observar que la fuerza de reacción en la rotura es similar a la obtenida en el modelo M0.



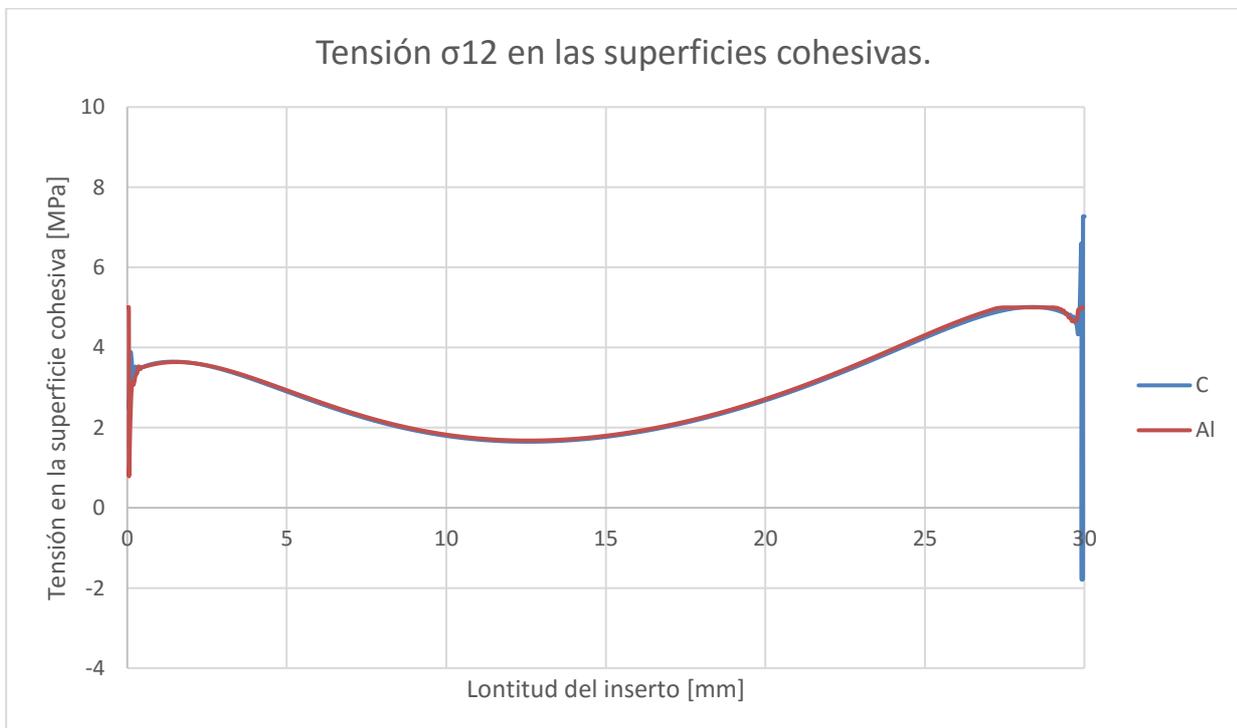
5.3.2 Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{22} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



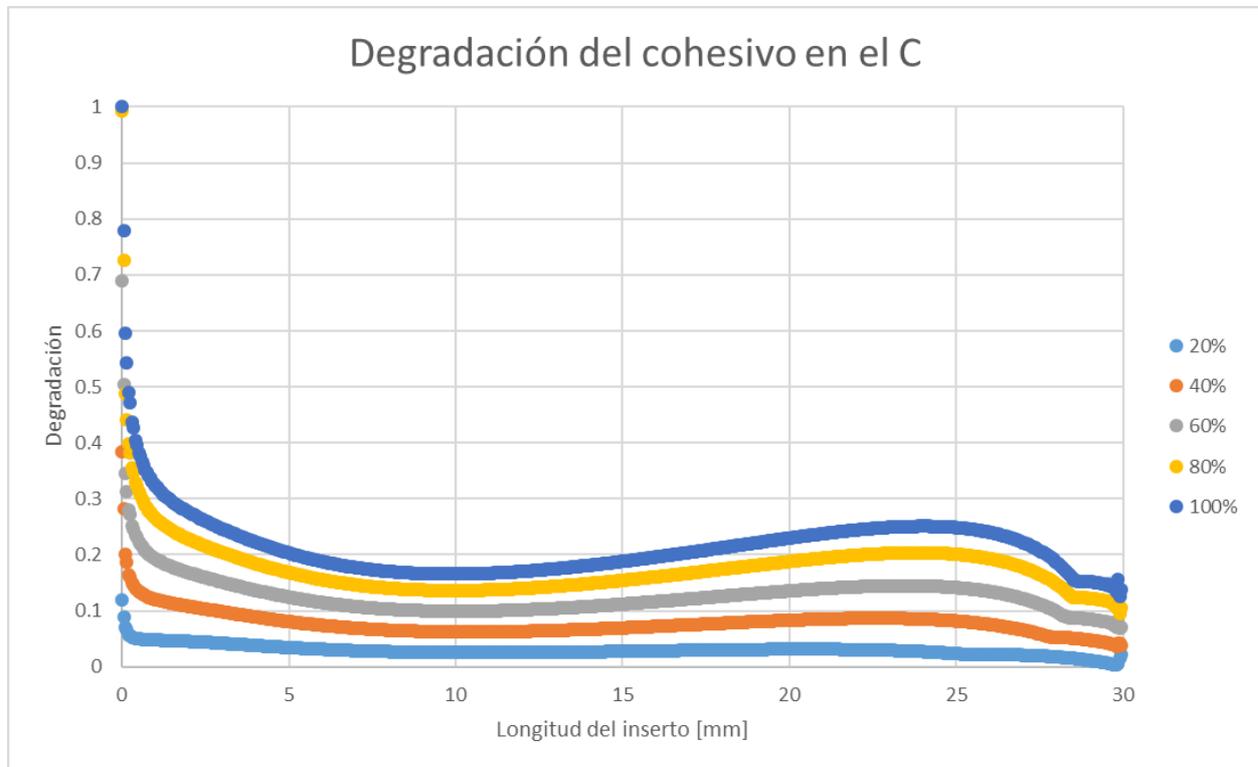
5.3.3 Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{12} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



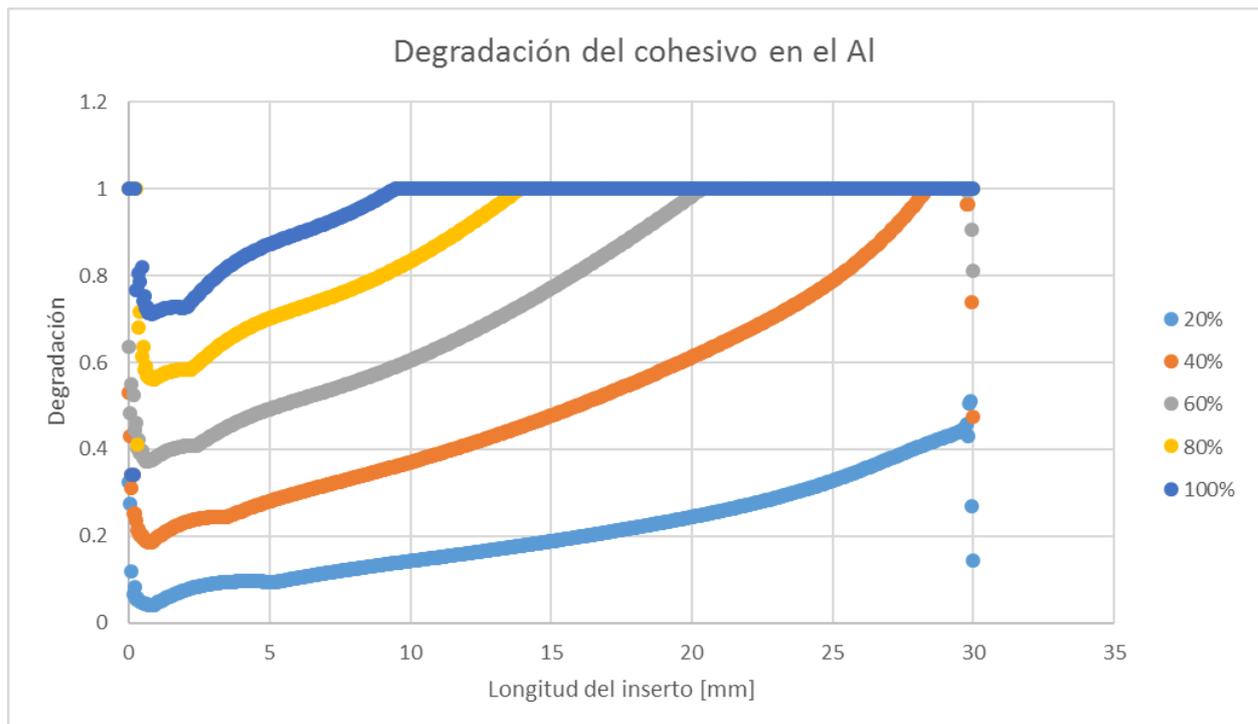
5.3.4 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.

Degradación del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.



5.3.5 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.

Degradación del elemento cohesivo asociado al aluminio a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga. En esta gráfica se puede ver, que como se han intercambiado las propiedades los dos elementos cohesivos, ahora el más débil es el asociado al aluminio.

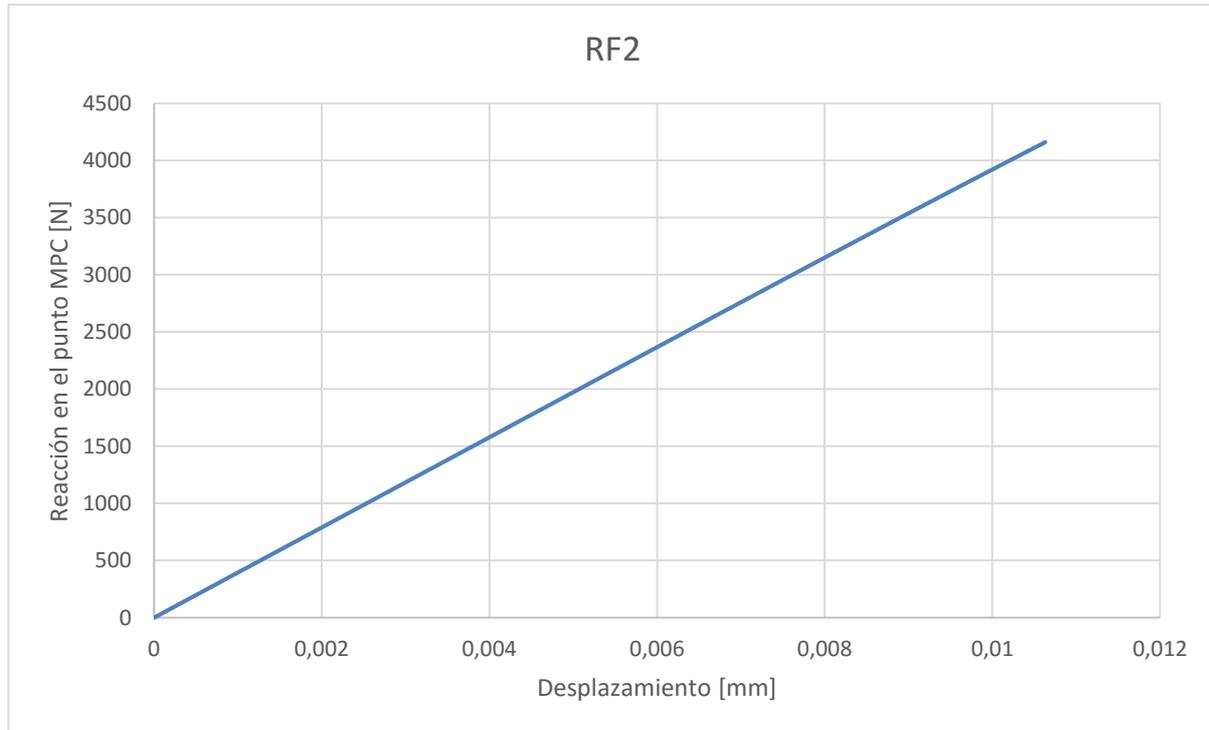


5.4 Modelo M3.

Los resultados obtenidos en el modelo M3 (con el moleteado en el aluminio) han sido los siguientes:

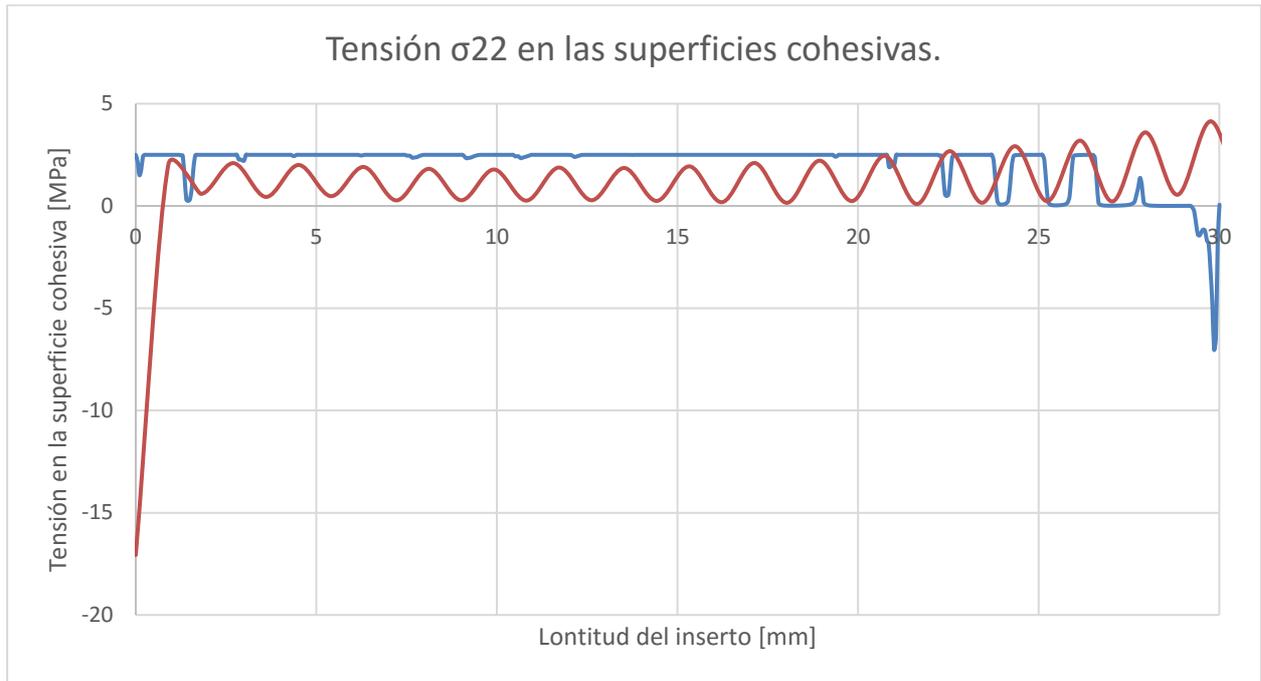
5.4.1 Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.

En esta gráfica se relaciona la fuerza de reacción obtenida en el punto MPC junto a su desplazamiento. La carga de rotura en este modelo es menor que en los anteriores, al tener un espesor de adhesivo mayor.



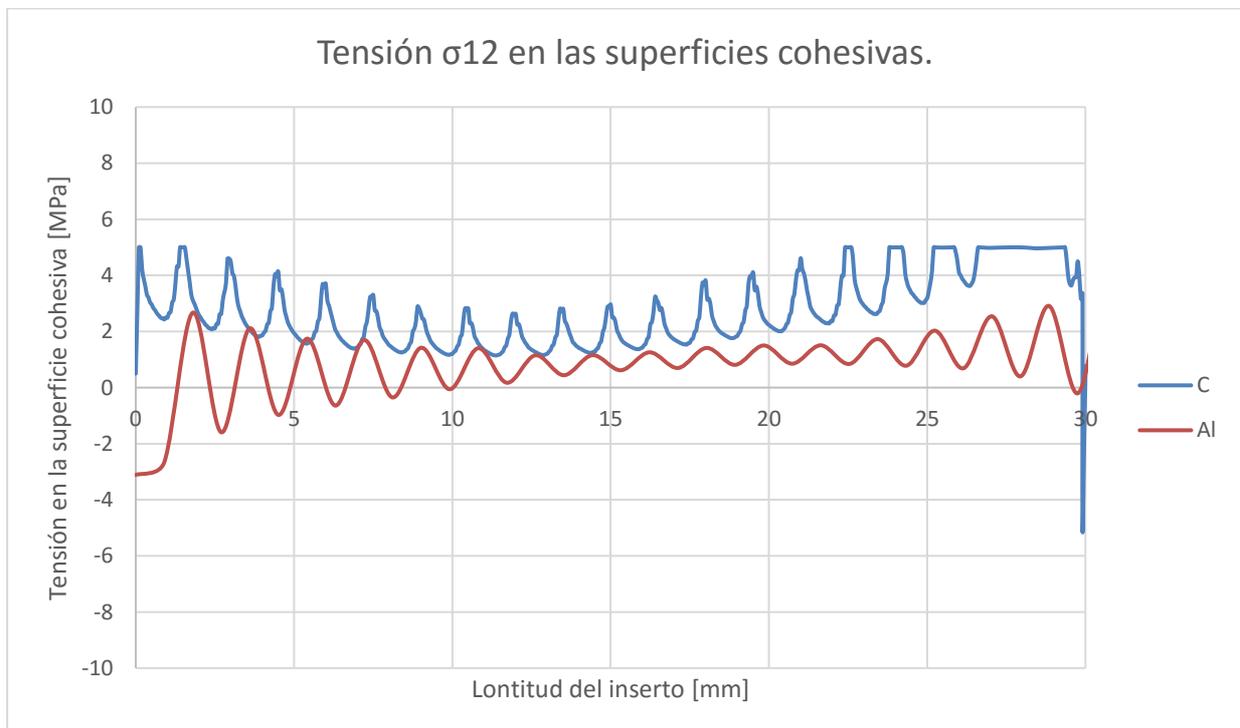
5.4.2 Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{22} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



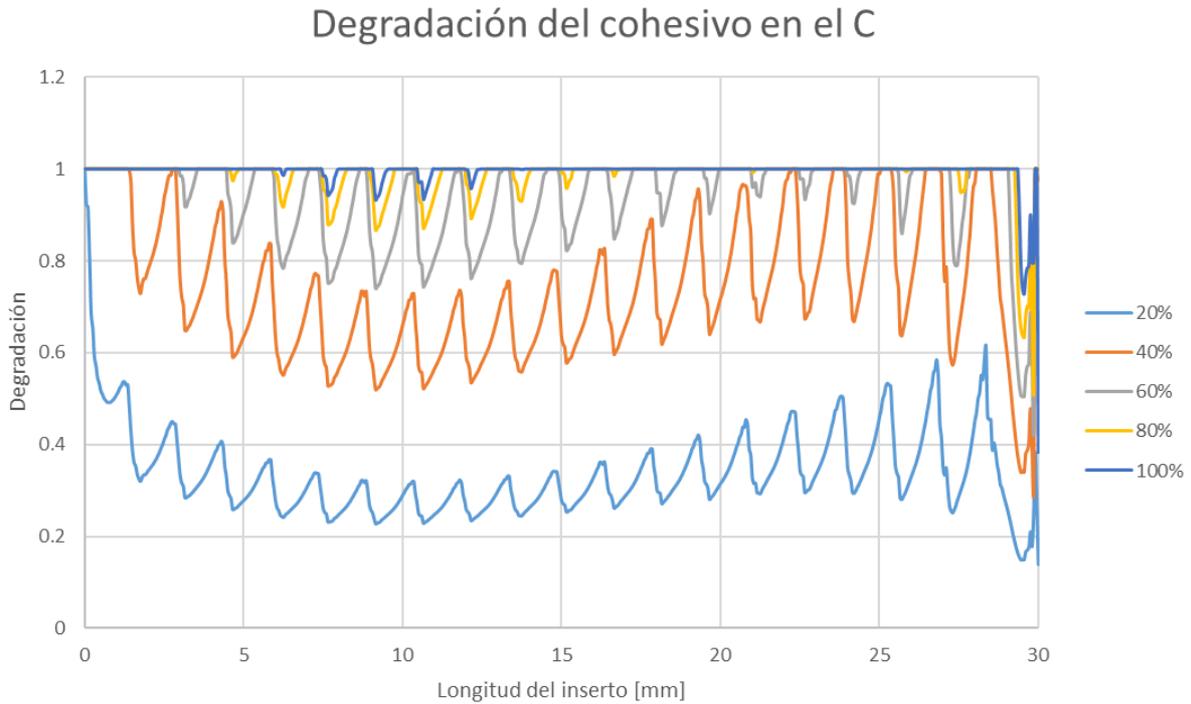
5.4.3 Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{12} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



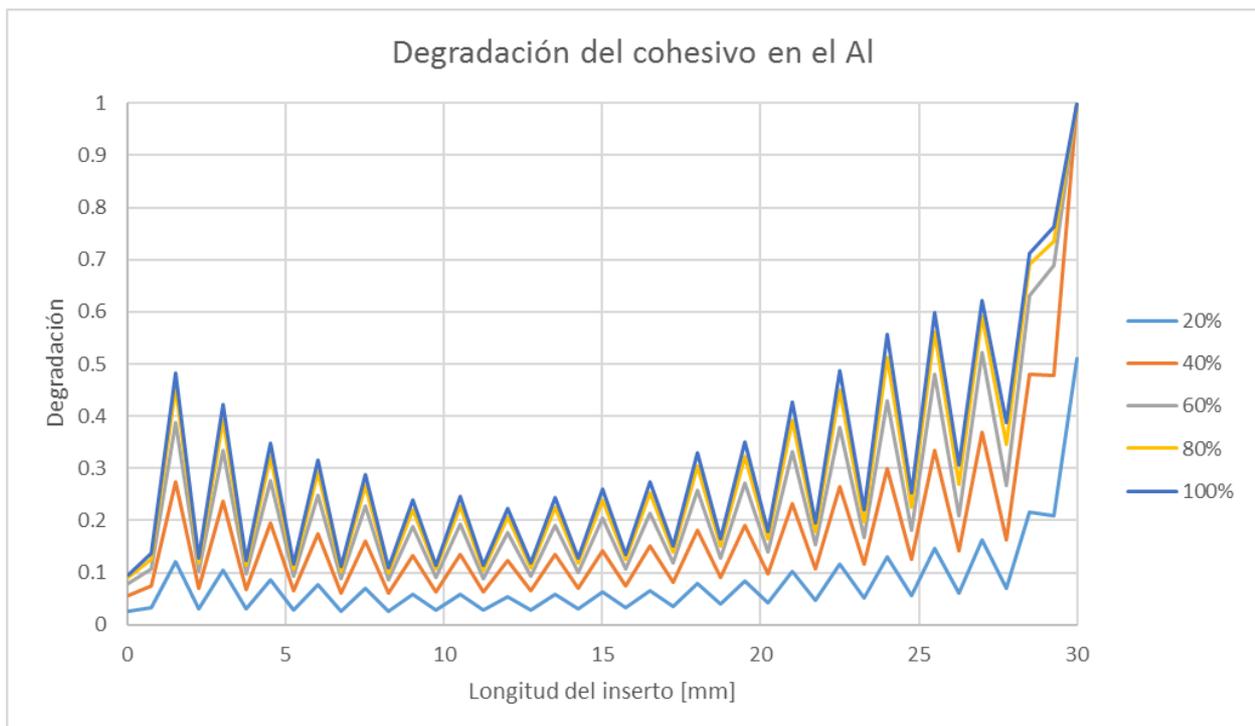
5.4.4 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.

Degradación del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga. En el último estado de carga se produce la rotura total de la unión.



5.4.5 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.

Degradación del elemento cohesivo asociado al aluminio a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.



6 ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Los ensayos experimentales del presente proyecto han sido llevados a cabo para comprobar que las propiedades de adhesión del adhesivo Permabond ES5681 con los distintos materiales a los que está pegado son las correctas. Se ha hecho dos tandas de ensayo, pegando en la primera tubos de fibra de carbono entre sí, y en la segunda piezas de aluminio con forma cilíndrica.

6.1 Procedimiento.

Dentro del procedimiento, se debe de distinguir los dos ensayos, aunque ha sido muy parecido entre ambos, hay partes en las que se difiere.

6.1.1 Ensayo tubos de carbono.

Para el ensayo de los tubos de carbono se tuvo que hacer primeramente una fase de lijado, para reducir la tolerancia a lo menor posible. Una vez se lijaron, se fijó una distancia de pegado de 5 cm. También se lijaron interiormente los tubos a los que se pegarían (los de la izquierda de cada pareja en la figura 33).



Figura 33. Longitud de pegado de los tubos.

Antes de pegar los tubos, y después del lijado, se limpiaron con el limpiador industrial de la marca Loctite modelo SF 7063 (figura 34).



Figura 34. Tubos con el limpiador de Loctite SF 7063.

Una vez limpios, se pegaron los tubos con el adhesivo de Permabond, el ES5681. El adhesivo fue repartido lo más homogéneo y regular que se pudo, aún a sabiendas de que estamos en un proceso manual y que las tolerancias no son todo lo exactas que nos gustaría para poder regularizar el ensayo. Estas condiciones son en las que el equipo ARUS Andalucía Racing Team puede hacer los pegados para los tubos de la suspensión del monoplaça, por lo que en este proyecto se ha querido reproducir esa situación real (figura 35).

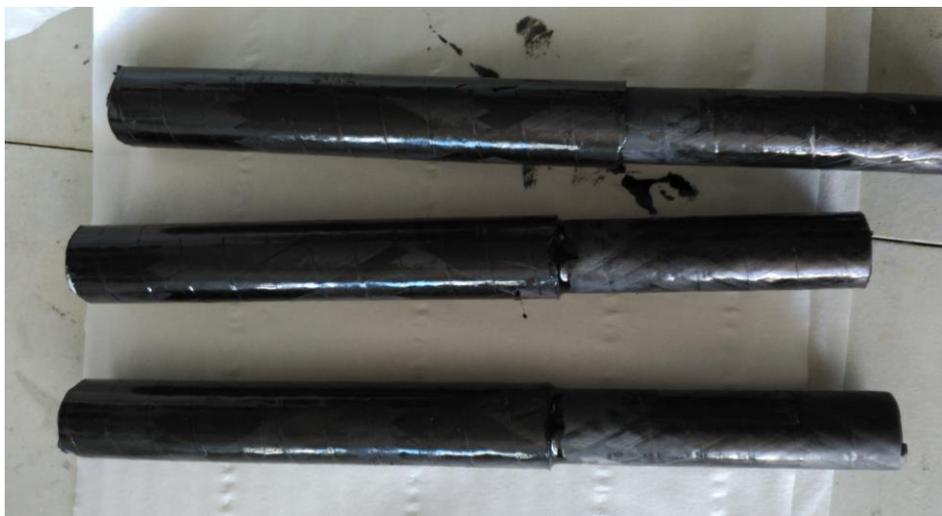


Figura 35. Tubos pegados con el adhesivo Permabond ES5681

Posteriormente, los tubos fueron curados durante dos horas en un horno del laboratorio del departamento a 100° C.

6.1.2 Probeta de aluminio.

Para el ensayo de la probeta de aluminio se siguió un procedimiento parecido al de los tubos de carbono. Sin embargo, al disponer de una sola probeta y tener que ser esta reutilizada para el segundo ensayo, hubo que hacer un proceso de limpieza después del primero.

Las probetas a utilizar fueron las de la figura 36: a la de la izq. es donde se aplica el adhesivo, y se introduce en la de la derecha. Ambos cilindros (izq. exterior y derecha interior) tienen una tolerancia de 0,1 mm para asegurarnos ese espesor de adhesivo.



Figura 36. Probetas de aluminio.

Se procedió a su lijado y limpieza con el mismo limpiador industrial que el anterior ensayo, el Loctite SF 7063. Una vez lijados y libres de impurezas, se pegó con el pegamento Permabond ES5681 (figura 37).



Figura 37. Las dos probetas a pegar con el limpiador Loctite SF 70993 y el adhesivo ES5681.

Posteriormente al primer ensayo, hubo que limpiar el cilindro exterior y el interior. Para ello se dispusieron de distintos papeles de lija y del limpiador industrial. Aun así, es probable que las impurezas que quedaron en los cilindros y los restos de adhesivo hayan influido en los resultados de los ensayos, que se incluyen en el siguiente punto del presente proyecto.

6.2 Ensayos.

Con las probetas anteriormente preparadas, se hicieron dos ensayos para comprobar las propiedades de adhesión del pegamento a tales materiales.

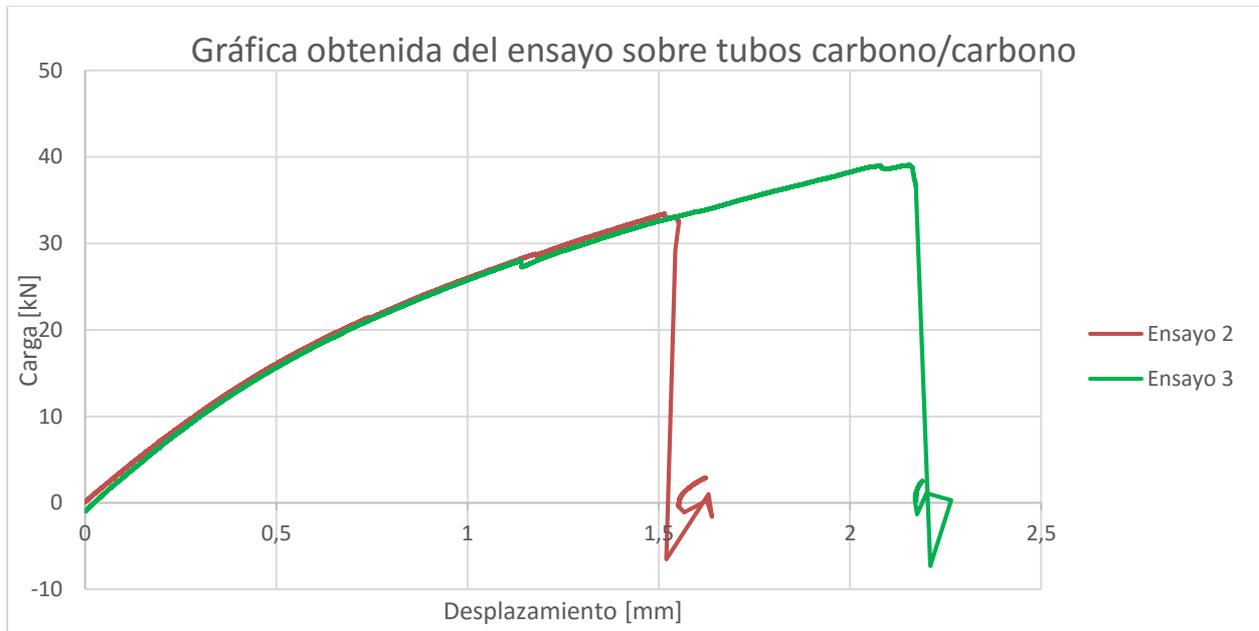
6.2.1 Unión carbono-carbono.

Una vez pegados y curados los tubos, se hicieron en la máquina de la figura 38 tres pruebas.



Figura 38. Máquina del departamento donde se hizo el ensayo.

De las tres pruebas posibles, en la primera de ellas se cometió el error de aplicar carga de compresión al inicio, por lo que los resultados salieron falseados. Además, la máquina no registró bien los valores, por lo que en la hoja de cálculo final con todos los datos no aparece. Así, de los dos ensayos que se pudieron hacer correctamente pudimos sacar las siguientes curvas:



Como se puede observar, en el tercer ensayo, el pegamento aguantó sobre la fibra de carbono mucha más carga y desplazamiento. Aachacamos la disminución de propiedades del adhesivo en la segunda de las pruebas a un pegado deficiente.

La geometría de las probetas, medidas en tres tramos diferentes han sido (en milímetros):

Tabla 10. Datos geométricos del ensayo de pegado sobre fibra de carbono.

	L1	L2	L3	Media	Área de pegado en mm ²
Barra 2	22,4	21,7	21,6	21,90	3440,0
Barra 3	22	22	21,9	21,97	3450,5

Los demás datos de los ensayos han sido:

- Longitud del pegado: 50 mm.

Por lo que las tensiones de cortadura que se han obtenido son de:

- Tensión máxima ensayo 1: 9,72 MPa.
- Tensión máxima ensayo 2: 11,32 MPa.

Si tomamos la media de las máxima tensiones como tensión representativa del global del ensayo (y con la que se corregirá el modelo M0), obtenemos que:

- Tensión máxima media del ensayo: 10,52 MPa.

Por último, en la siguiente imagen se muestra el estado de los tubos una vez terminado el ensayo (figura 39). Como se puede observar, el despegue de los tubos no fue limpio: quedaron restos de adhesivos en ambas probetas.



Figura 39. Estado de unas de las parejas de tubos después del ensayo.

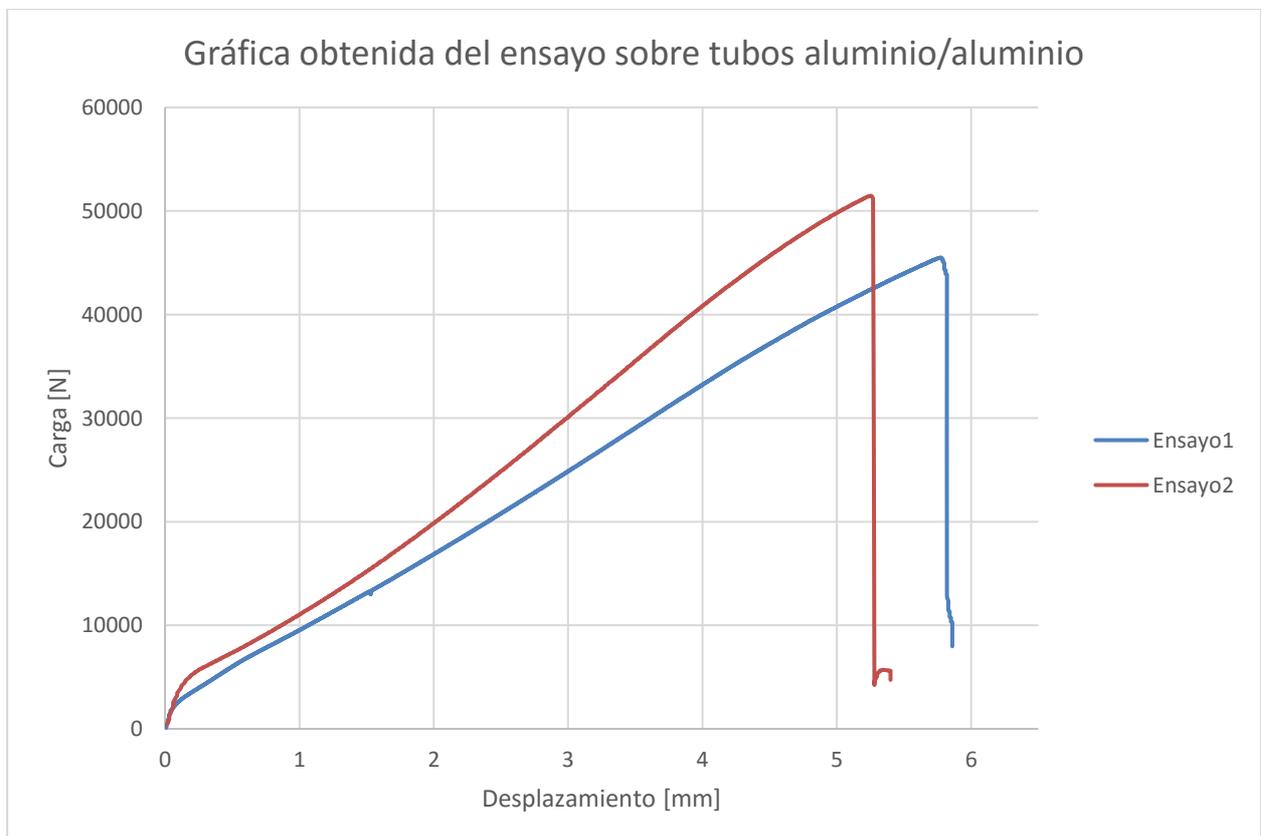
6.2.2 Unión aluminio-aluminio.

Para el ensayo de las probetas de aluminio una vez pegadas, se tuvieron que llevar antes al horno del departamento para el curado del adhesivo. En ambos casos curó 20 minutos a 150° C. Tras el curado y un posterior tiempo de espera para el enfriado del aluminio, se ensayaron como se puede observar en la figura 40:



Figura 40. Ensayo de las probetas de aluminio en la máquina del departamento.

La evolución de la carga con respecto del desplazamiento en estos dos ensayos ha sido la siguiente:



Los datos geométricos de este ensayo son los siguientes:

Tabla 11. Datos geométricos del ensayo sobre probetas de aluminio.

Longitud Ensayo 1:	25	mm
Longitud Ensayo 2:	14	mm

Diámetro:	27,1	mm
-----------	------	----

Superficie ensayo 1:	2128,43	mm ²
Superficie ensayo 2:	1191,92	mm ²

Y los datos obtenidos del mismo son los siguientes:

- Carga máxima del ensayo 1: 45488,97 N.
- Carga máxima del ensayo 2: 51473,07 N.
- Tensión máxima del ensayo 1: 21,37 MPa.
- Tensión máxima del ensayo 2: 43,18 MPa.

Si tomamos como representativa del ensayo la tensión media de las máximas del mismo:

- Tensión máxima media del ensayo: 32,28 MPa.

Los datos de las tensiones máximas medias de los dos ensayos se tendrán en cuenta en la corrección del modelo numérico que se hará en los siguientes puntos del siguiente proyecto.

También hay que comentar la disparidad de los resultados obtenidos. En el primer ensayo, con más superficie de pegado, se ha obtenido más desplazamiento, pero menor resistencia. Y en el segundo totalmente lo contrario, con menor superficie de pegado. Se piensa que es posible que las impurezas y los restos de pegamento existentes en el segundo ensayo debido a la reutilización de la probeta hayan podido afectar a los resultados.

Por último, en el estado después del despegado de los tubos se pudo observar que quedaron restos de adhesivo en ambos cilindros, en los dos ensayos realizados.

7 CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.

Una vez realizado los ensayos, se deben de utilizar los resultados para poder ajustar a la realidad el modelo numérico realizado con Abaqus. De esta manera, se tomarán los resultados de las máximas tensiones medias a cortadura obtenidas en cada ensayo, y serán utilizadas para sustituir los valores correspondientes en las propiedades de los elementos cohesivos del modelo M0, por lo que se pasará a tener un 5º modelo, llamado modelo M4. También se ha aumentado el desplazamiento que excita el modelo, para conseguir la rotura del mismo, pues al mejorar las propiedades es previsible que rompa a más desplazamiento. Por último, se han incluido las gráficas resultado del modelo, como en los anteriores.

7.1 Propiedades extraídas de la correlación.

Las propiedades de los materiales en el modelo M4 pasan a ser las siguientes:

- Cohesivo del aluminio:

Tabla 12. Propiedades corregidas del cohesivo del aluminio.

Tensión nominal Modo I	Tensión nominal primera dirección tangencial	Tensión nominal segunda dirección tangencial
16,14	32,28	32,28

- Cohesivo de la fibra de carbono:

Tabla 13. Propiedades corregidas del cohesivo de la fibra de carbono.

Tensión nominal Modo I	Tensión nominal primera dirección tangencial	Tensión nominal segunda dirección tangencial
5,26	10,52	10,52

Por último, se ha cambiado la carga que se imponía al modelo. Hemos pasado de un desplazamiento longitudinal de 0,01 mm en la dirección que forzaba el despegue del tubo, a un desplazamiento de 0,03 mm.

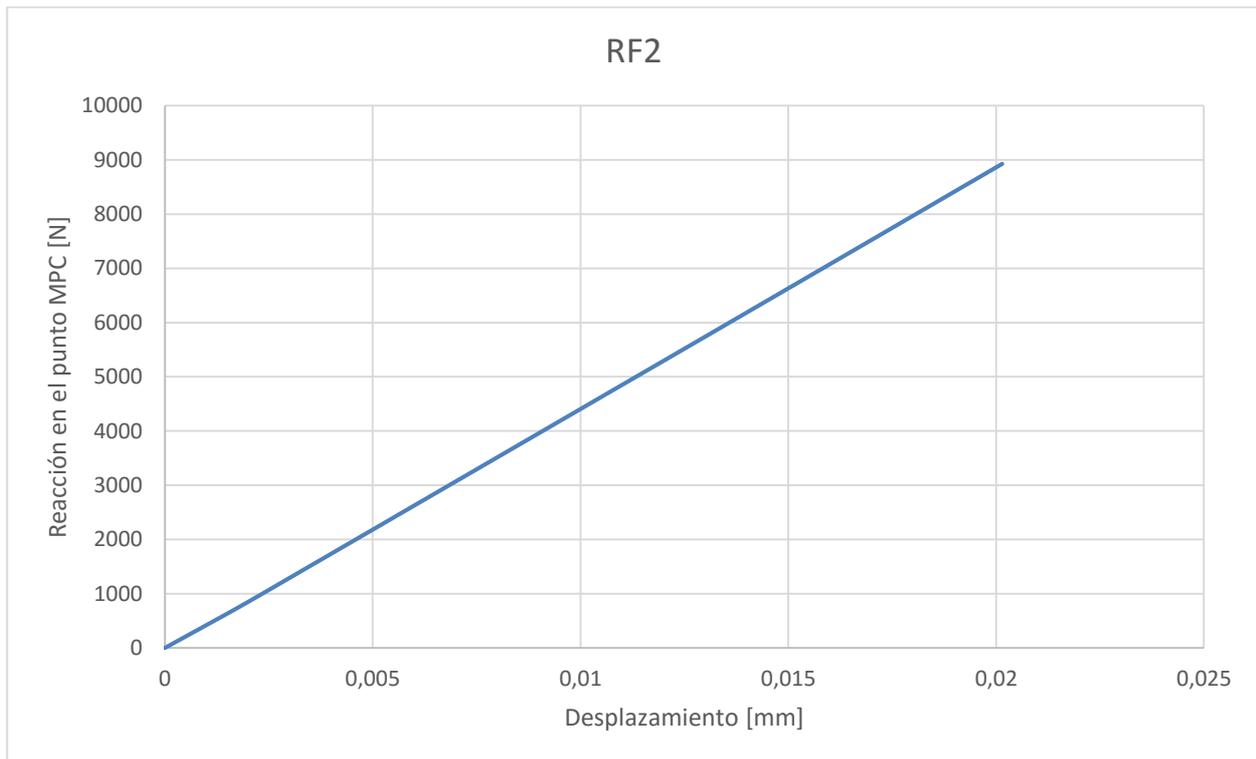
Como se puede comprobar, si bien las propiedades del elemento cohesivo del aluminio han mejorado de forma imperceptible, las propiedades del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono han mejorado sustancialmente. Con los resultados de los ensayos, se ha podido comprobar que la adhesión en el caso de la fibra de carbono es el doble de buena de lo que presuponíamos.

7.2 Resultados del Modelo M4.

Los resultados obtenidos en el modelo M4 (modelo final, con las propiedades de los cohesivos corregidas por los resultados experimentales) han sido los siguientes:

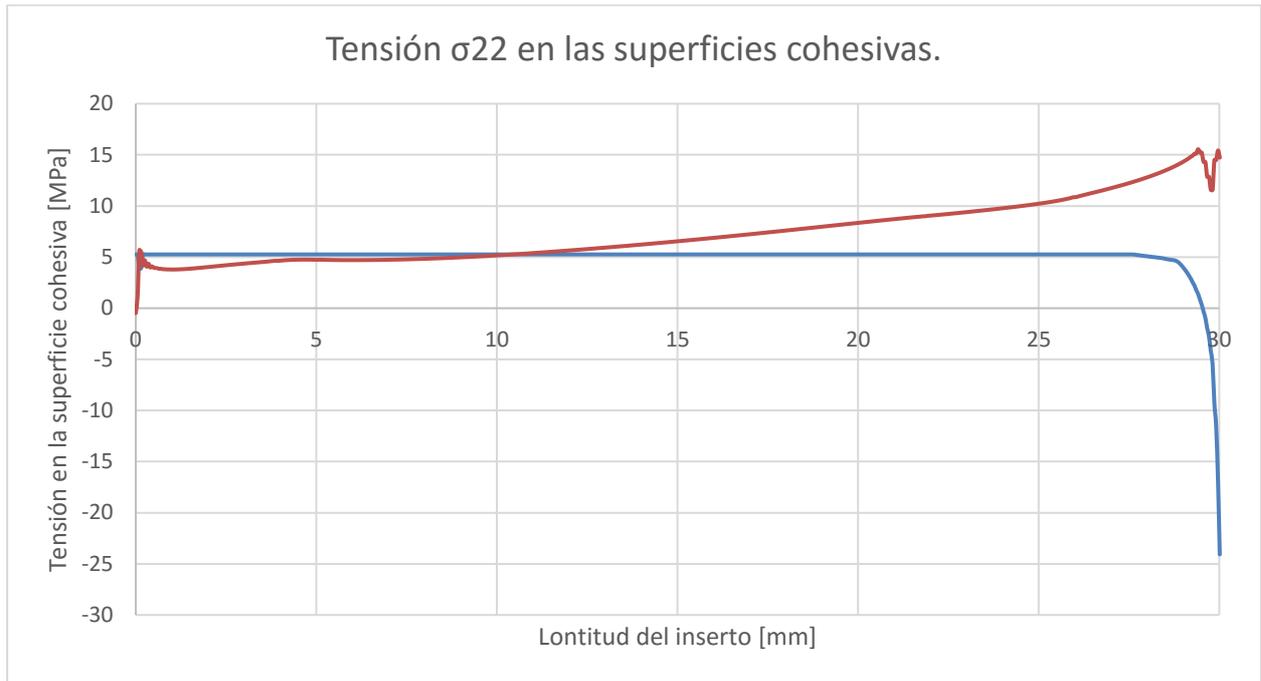
7.2.1 Gráfica fuerza de reacción – desplazamiento.

En esta gráfica se relaciona la fuerza de reacción obtenida en el punto MPC junto a su desplazamiento. En este modelo vemos que al mejorar las propiedades del cohesivo de la fibra de carbono la fuerza reacción obtenida en la rotura y el desplazamiento admisible aumentan considerablemente.



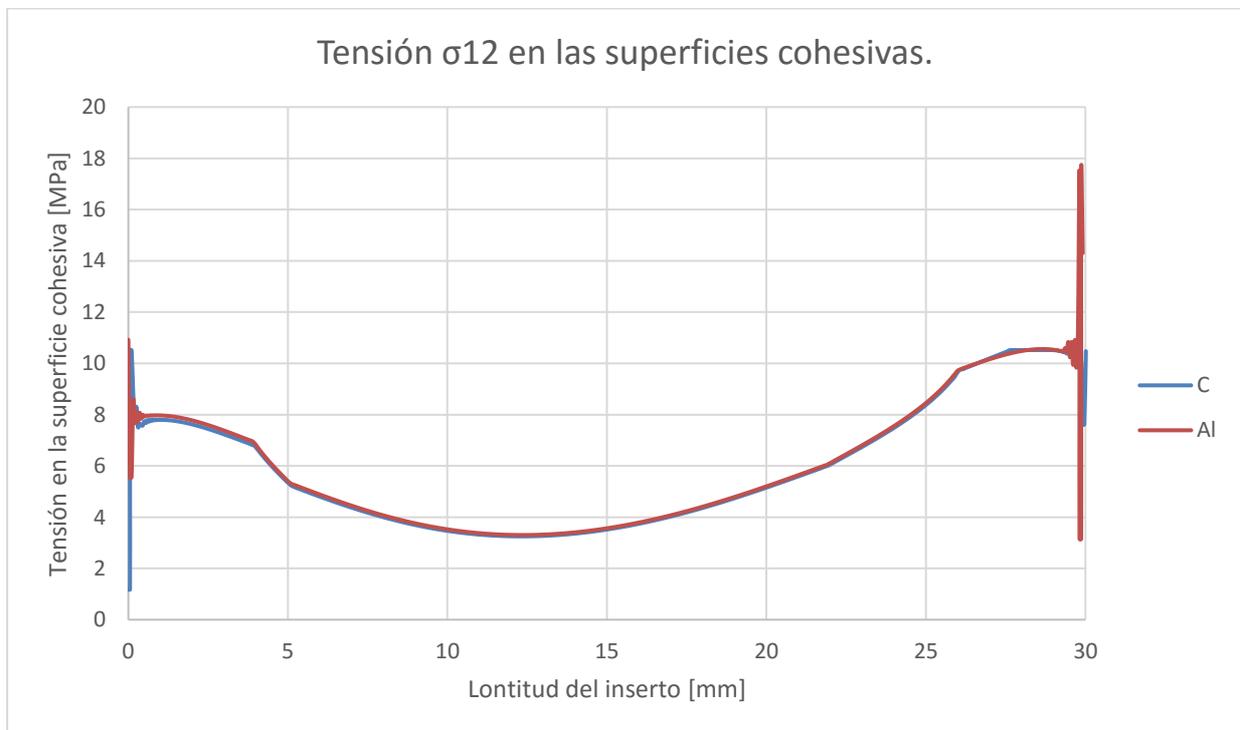
7.2.2 Gráfica σ_{22} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{22} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



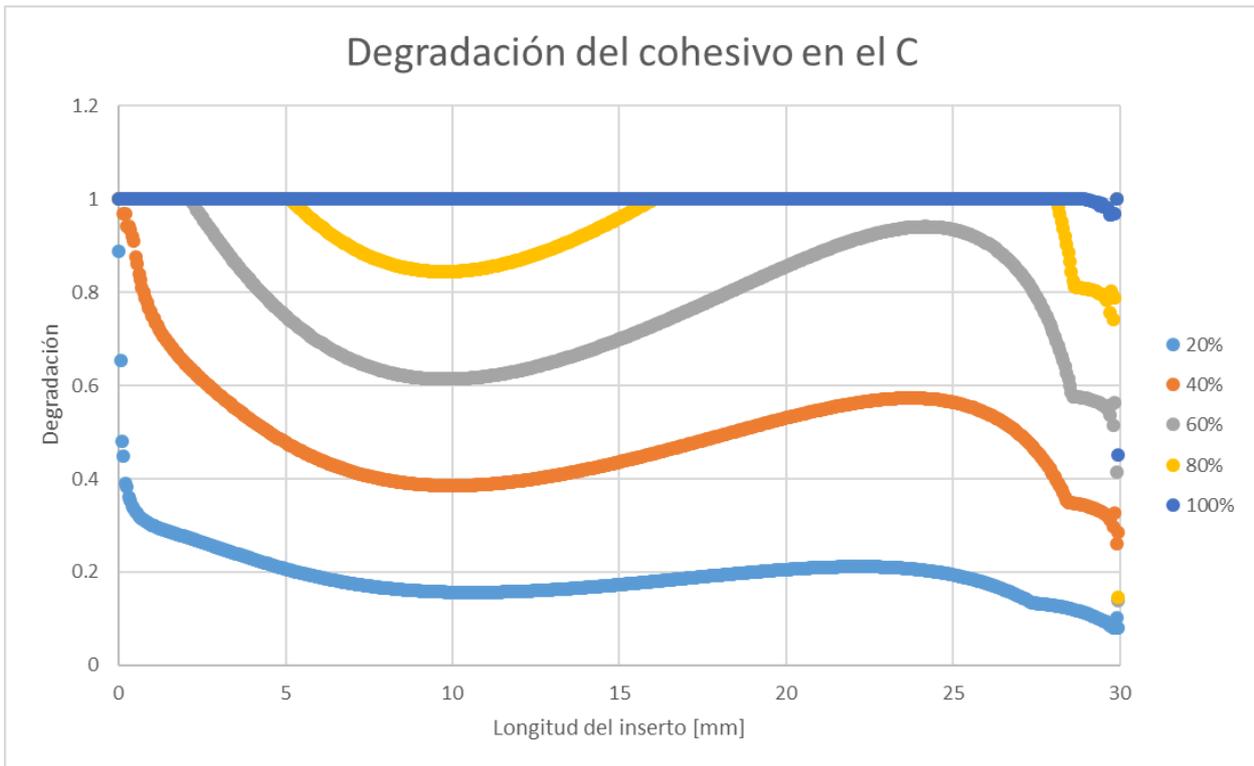
7.2.3 Gráfica σ_{12} a lo largo de la superficie.

En esta gráfica se puede observar la evolución de σ_{12} a lo largo de la superficie de los elementos cohesivos, en el momento de la rotura del adhesivo.



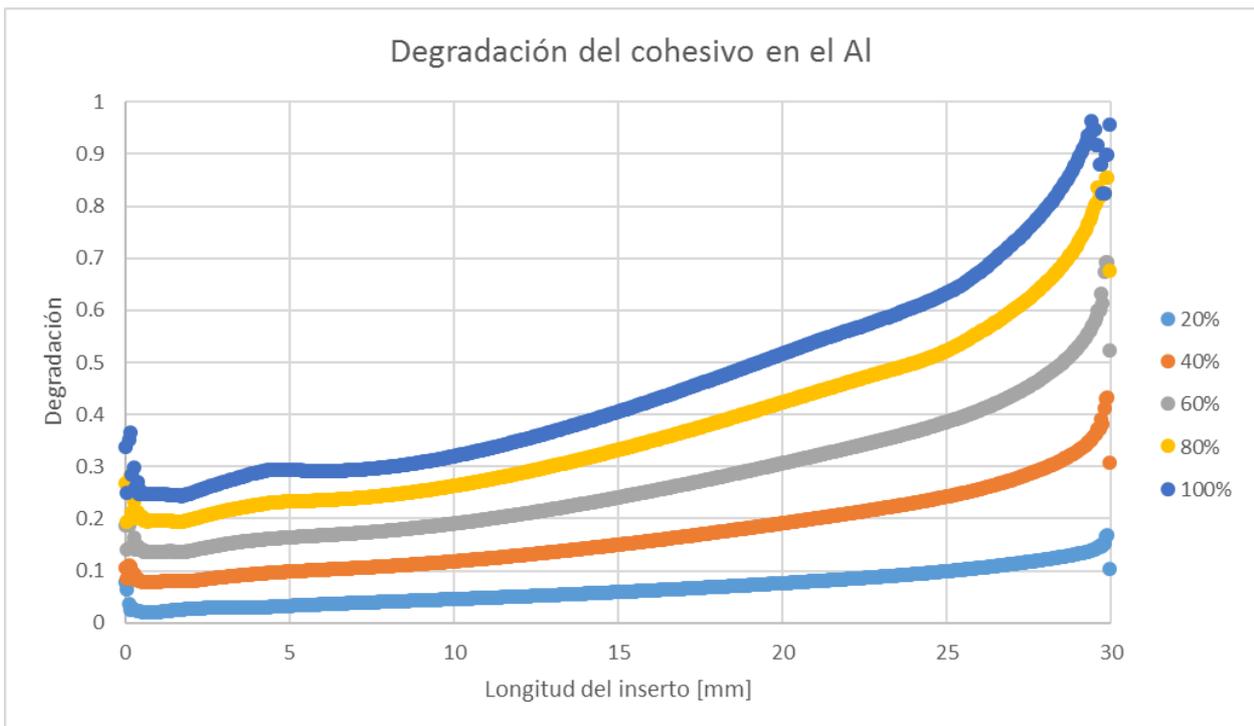
7.2.4 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del C.

Degradación del elemento cohesivo asociado a la fibra de carbono a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga. En el último estado de carga se produce la rotura total de la unión.



7.2.5 Gráfica de la degradación del elemento cohesivo del Al.

Degradación del elemento cohesivo asociado al aluminio a lo largo de la superficie de unión, en distintos estados de carga.



8 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

En este punto del proyecto, ya se cuenta con toda la información que se ha recabado de los 5 modelos de elementos finitos hechos y de las dos tandas de ensayos experimentales realizadas. Ya que este proyecto es un estudio, que además debe de aportar información y experiencia al ARUS Andalucía Racing Team, este punto contendrá una serie de conclusiones que han sido extraídas de dicho estudio y una serie de ideas para un trabajo futuro que creemos que es importante poder continuar para seguir intentando introducir esta tecnología en el diseño de los siguientes prototipos del equipo.

8.1 Conclusiones.

Las conclusiones extraídas de este proyecto son varias, pero casi todas están centralizadas en la parte más débil que tiene esta unión: la adhesión entre el adhesivo y la fibra de carbono.

Si bien los ensayos realizados demostraron que la adhesión entre dichos materiales es el doble de resistente de lo que presuponíamos, sigue siendo la parte limitante de la unión y la que antes rompe. De hecho, se ha comprobado con los modelos de elementos finitos que en el modelo M1 ha roto a más carga (ya que ambos cohesivos tenían las propiedades de la adhesión con el aluminio) y que el modelo M2 ha roto al desplazamiento usual de rotura, entorno a 0,01007 mm, ya que, aunque se han intercambiado las propiedades del cohesivo, el de la fibra de carbono es claramente menos resistente.

La segunda conclusión que hemos extraído es que, con los materiales y la tecnología de los que dispone el equipo, la suspensión de fibra de carbono (al menos las uniones) hubieran sido viables. En el modelo M4, el más ajustado a la realidad, la carga final de rotura está entorno a los 9000 N, prácticamente el doble de lo que por cálculos estructurales debería de ocurrir en la barra más crítica en el caso más crítico durante una competición. Si bien es cierto que al alcanzar esos valores máximos el adhesivo como tal sufriría una degradación, quedaría lejos de poder significar una rotura de la suspensión. También se ha detectado en los ensayos y en los cálculos del modelo de elementos finitos que la rotura del adhesivo es una frágil y súbita, por lo que no tiene una deformación que pueda servir de testigo. Este hecho hace que, si se implementara la suspensión de fibra de carbono, habría que adoptar un método de inspección de las uniones adhesivas para que en ningún caso pudiese el coche salir a pista con un brazo de la suspensión despegado.

La última conclusión extraída es que el moleteado del inserto de fibra de carbono no aporta nada a la mejora de la resistencia de la unión. Este mecanizado mejora las propiedades de la adhesión con el aluminio al añadir más superficie de pegado (aunque por el contrario aumenta el espesor, factor que es contraproducente en las uniones adhesivas). Sin embargo, el factor limitante de la unión en este caso volvería a ser la adhesión con la fibra de carbono, que se mantiene en los niveles anteriores y hace que la carga de rotura del modelo M3 sea igual que la de los modelos M0 y M2. Se descarta hacerle un moleteado interior a la fibra de carbono o cualquier operación de mecanizado parecida ya que no es posible mecanizar de esta forma dicho material.

8.2 Trabajo futuro.

El trabajo que tiene por delante el miembro del equipo que vaya a ocuparse de este estudio en el futuro tiene varias vertientes, tanto experimentales como analíticas.

Primero, habría que intentar buscar, en conjunto con la empresa que nos fabricara los tubos, una resina epoxi que mejorara las propiedades de la adhesión. Se sabe que en realidad la adhesión con la fibra de carbono se produce con la resina epoxi, pues la fibra queda bañada en ella y es el recubrimiento lo que entra en juego en este caso.

Segundo, también habría que intentar adquirir unos tubos de fibra de carbono con mejor acabado superficial. El acabado superficial es un aspecto muy importante en las uniones adhesivas, y siempre es positivo intentar mejorarlo al máximo.

Tercero, intentar hacer ensayos reales con tubos de fibra de carbono pegados a los insertos de aluminio e industrializar el pegado. Al hacer los ensayos completos, se podrán extraer los resultados reales de la unión adhesiva, sin tener que pasar por un modelo de elementos finitos. Sin embargo, en dichos ensayos (y también en los que se han realizado para el presente proyecto) entra en juego el pegado de la unión, que hasta ahora se ha estado haciendo de manera manual. Por ello, se cree conveniente la preparación de un método y el utillaje correspondiente para poder hacer el proceso de la forma más repetitiva posible, y así intentar evitar los posibles errores en el pegado. O incluso, iniciar la búsqueda de empresas de la zona que pudiesen hacer el servicio de manera industrial, hecho que sería ideal para asegurarnos una perfecta distribución del adhesivo en toda la zona deseada.

9 BIBLIOGRAFÍA.

[1] Formula SAE. From Wikipedia, the free encyclopedia. 19 junio 2016 [consulta: 16 julio 2016]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE

[2] Zicral. From Wikipedia, the free encyclopedia. 5 marzo 2016 [consulta: 21 julio 2016]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Zicral>

[3] GARCÍA-LEDESMA, R; OÑORO, J; AMO, J.M; DURÁN, M.C. y DURÁN, J. Influencia del espesor de adhesivo de poliuretano en la resistencia de uniones sometidas a cortadura. Revista de Metalurgia, CSIC, 2005.

[4] Fibra de carbono. From Wikipedia, the free encyclopedia. 27 julio 2016 [consulta: 16 agosto 2016]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono

[5] PARÍS, F; CAÑAS, J; MARÍN, J.C; BARROSO, A. Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. 2008.

10.1 Anexo I: hoja técnica del adhesivo Permabond ES5681.



PERMABOND® ES5681
Single-part, heat-cure Epoxy
Technical Datasheet

Features & Benefits

- Rapid cure speed
- Excellent resistance to vibration
- Easy to use – no mixing required
- High shear and peel strength
- High temperature resistance
- Good resistance to chemicals

Description

PERMABOND® ES5681 is a single-part heat cured epoxy adhesive with excellent adhesion to metal surfaces, ceramics as well as composite materials. It is a tough, multipurpose adhesive with excellent impact and vibration resistance.

Physical Properties of Uncured Adhesive

Chemical composition	Epoxy Resin
Appearance	Black
Viscosity @ 25°C	40,000 – 60,000 mPa.s (cP)
Specific gravity	1.1

Typical Curing Properties

Flow at high temperature	Flowing
Maximum gap fill	0.5 mm <i>0.02 in</i>
Cure speed (oven) *	135°C (275°F): 35 minutes 150°C (300°F): 20 minutes 160°C (320°F): 15 minutes
Cure speed (induction)	<2 minutes

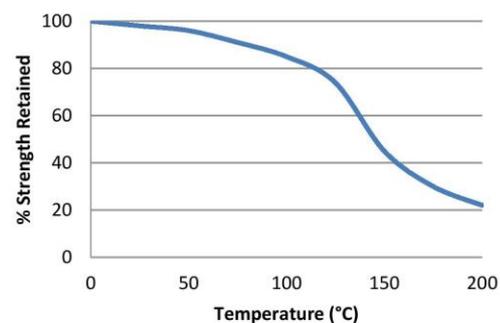
*Actual cure times will depend on the time it takes for the adhesive to reach this temperature - for example, large assemblies or a crowded oven will require longer to reach full cure. Alternative, quicker methods of curing include induction, hotplates, infrared lamps and hot-air guns.

Typical Performance of Cured Adhesive

Shear strength* (ISO 4587):	Steel 30 - 35 N/mm ² (4400 - 5100 psi) FRP Glass/Polyester: 3-5 N/mm ² (400-700psi) FRP Glass/Epoxy: 14-16 N/mm ² (2000-2300psi) Carbon Fibre: 18-22 N/mm ² (2600-3200 psi)
Tensile strength (ASTM D 2095):	35-40 N/mm ² (5100- 5800 psi)
Hardness	84 Shore D
Impact strength (ASTM D 950):	30-40 KJ/m ²
Peel strength (aluminium)	180-200 N/25mm (40- 44 PIW)

*Strength results will vary depending on the level of surface preparation and gap.

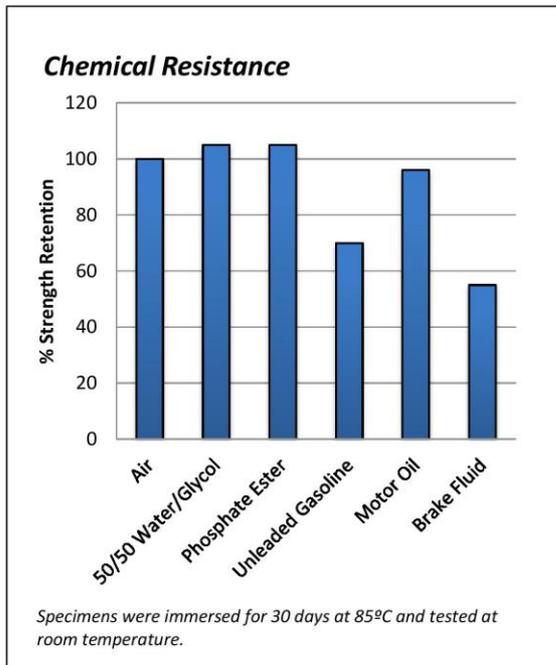
Temperature Resistance



ES5681 can withstand higher temperatures for brief periods (such as for paint baking and wave soldering processes) providing the joint is not unduly stressed. The minimum temperature the cured adhesive can be exposed to is -40°C (-40°F) depending on the materials being bonded.

The information given and the recommendations made herein are based on our research and are believed to be accurate but no guarantee of their accuracy is made. In every case we urge and recommend that purchasers before using any product in full-scale production make their own tests to determine to their own satisfaction whether the product is of acceptable quality and is suitable for their particular purpose under their own operating conditions. THE PRODUCTS DISCLOSED HEREIN ARE SOLD WITHOUT ANY WARRANTY AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED.

No representative of ours has any authority to waive or change the foregoing provisions but, subject to such provisions, our engineers are available to assist purchasers in adapting our products to their needs and to the circumstances prevailing in their business. Nothing contained herein shall be construed to imply the non-existence of any relevant patents or to constitute a permission, inducement or recommendation to practice any invention covered by any patent, without authority from the owner of this patent. We also expect purchasers to use our products in accordance with the guiding principles of the Chemical Manufacturers Association's Responsible Care® program.



Directions for Use

- 1) The adhesive should be dispensed from the cartridge via the nozzle supplied (this can be cut to give the appropriate sized bead to cover the bond area).
- 2) Apply the adhesive to one surface and avoid entrapping air.
- 3) Assemble parts applying sufficient pressure to ensure the adhesive spreads to cover the entire bond area.
- 4) Use a jig / clamp to prevent parts moving during cure.
- 5) It is advisable not to disturb the joint until the adhesive is fully cured.
- 6) Cure with heat – see page one for cure schedule.

Storage & Handling

Storage Temperature	2 to 7°C (35 to 45°F)
---------------------	-----------------------

Additional Information

This product is not recommended for use in contact with strong oxidizing materials.

Information regarding the safe handling of this material may be obtained from the material safety data sheet (MSDS).

Users are reminded that all materials, whether innocuous or not, should be handled in accordance with the principles of good industrial hygiene.

Surface Preparation

Surfaces should be clean, dry and grease-free before applying the adhesive. Use a suitable solvent (such as acetone or isopropanol) for the degreasing of surfaces. Some metals such as aluminium, copper and its alloys will benefit from light abrasion with emery cloth (or similar), to remove the oxide layer.

Contact Permabond:

- Americas +1 732 868 1372
 - US 800-640-7599
 - Asia + 86 21 5773 4913
 - Europe +44 (0) 1962 711661
 - UK 0800 975 9800
 - Deutschland 0800 111 388
 - France 0805 111 388
- info.americas@permabond.com
info.europe@permabond.com
info.asia@permabond.com

The information given and the recommendations made herein are based on our research and are believed to be accurate but no guarantee of their accuracy is made. In every case we urge and recommend that purchasers before using any product in full-scale production make their own tests to determine to their own satisfaction whether the product is of acceptable quality and is suitable for their particular purpose under their own operating conditions. THE PRODUCTS DISCLOSED HEREIN ARE SOLD WITHOUT ANY WARRANTY AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED.

No representative of ours has any authority to waive or change the foregoing provisions but, subject to such provisions, our engineers are available to assist purchasers in adapting our products to their needs and to the circumstances prevailing in their business. Nothing contained herein shall be construed to imply the non-existence of any relevant patents or to constitute a permission, inducement or recommendation to practice any invention covered by any patent, without authority from the owner of this patent. We also expect purchasers to use our products in accordance with the guiding principles of the Chemical Manufacturers Association's Responsible Care® program.

10.2 Anexo II: código de Matlab para la obtención de las propiedades de la fibra de carbono.

```
clc
clear all
format short g
E3=228.4E9;
E1=6.35E9;
E2=E1;

G32=5.6E9;
G31=G32;
G21=3.7E9;

nu32=0.3;
nu31=nu32;

nu23=E2/E3*nu32;
nu13=E2/E3*nu31;

syms nu12;
nu21=E2/E1*nu12;
delta=(1-nu12*nu21-nu23*nu32-nu31*nu13-2*nu21*nu32*nu13)/(E1*E2*E3);
ans=solve(G21-(1-nu23*nu32)/(E2*E3*delta)-
(nu12+nu32*nu13)/(E1*E3*delta))/2);

aux=eval(ans);

if aux(1,1) > 0.5
    nu12=aux(2,1);
else
    nu12=aux(1,1);
end
nu12;
nu21=E2/E1*nu12;
clear 'aux'

delta=eval(delta);

C=zeros(6,6);
C(1,1)=(1-nu23*nu32)/(E2*E3*delta);
C(2,2)=(1-nu13*nu31)/(E1*E3*delta);
C(1,2)=(nu12+nu13*nu32)/(E1*E3*delta);
C(1,3)=(nu13+nu23*nu12)/(E2*E1*delta);
C(2,3)=(nu23+nu21*nu13)/(E2*E1*delta);
C(3,3)=(1-nu12*nu21)/(E2*E1*delta);
C(4,4)=G21;
C(5,5)=G31;
C(6,6)=G32;

C(2,1)=C(1,2);
C(3,1)=C(1,3);
C(3,2)=C(2,3);
C=C/1E6;

C=giroci([0 1 0],90,C)
```

```

alfa1=20;
alfa2=-20;

v=[0 0 1];

Cmas20=girociij(v, alfa1,C)
Cmenos20=girociij(v, alfa2,C)

C20=extrae(Cmas20)
Cm20=extrae(Cmenos20)

```

Donde la función girociij es la siguiente:

```

function C_ij_new=girociij(v, alfa, C_ij);

V=[0 v(3) -v(2); -v(3) 0 v(1); v(2) -v(1) 0];
Theta=eye(3)+sind(alfa)*V+(1-cosd(alfa))*V*V;

%de Ting 2.8-4
%Giro de la matriz

K1=Theta.^2;
K2=[Theta(1,2)*Theta(1,3), Theta(1,3)*Theta(1,1), Theta(1,1)*Theta(1,2);
    Theta(2,2)*Theta(2,3), Theta(2,3)*Theta(2,1), Theta(2,1)*Theta(2,2);
    Theta(3,2)*Theta(3,3), Theta(3,3)*Theta(3,1), Theta(3,1)*Theta(3,2)];
K3=[Theta(2,1)*Theta(3,1), Theta(2,2)*Theta(3,2), Theta(2,3)*Theta(3,3);
    Theta(3,1)*Theta(1,1), Theta(3,2)*Theta(1,2), Theta(3,3)*Theta(1,3);
    Theta(1,1)*Theta(2,1), Theta(1,2)*Theta(2,2), Theta(1,3)*Theta(2,3)];
K4=[Theta(2,2)*Theta(3,3)+Theta(2,3)*Theta(3,2),
    Theta(2,3)*Theta(3,1)+Theta(2,1)*Theta(3,3),
    Theta(2,1)*Theta(3,2)+Theta(2,2)*Theta(3,1);
    Theta(3,2)*Theta(1,3)+Theta(3,3)*Theta(1,2),
    Theta(3,3)*Theta(1,1)+Theta(3,1)*Theta(1,3),
    Theta(3,1)*Theta(1,2)+Theta(3,2)*Theta(1,1);
    Theta(1,2)*Theta(2,3)+Theta(1,3)*Theta(2,2),
    Theta(1,3)*Theta(2,1)+Theta(1,1)*Theta(2,3),
    Theta(1,1)*Theta(2,2)+Theta(1,2)*Theta(2,1)];

KT=[K1 2*K2; K3 K4];

C_ij_new=KT*C_ij*KT';
end

```

Y la función extrae:

```

function D=extrae(C)
D=zeros(1,21);
D(1)=C(1,1);
D(2)=C(1,2);
D(3)=C(2,2);

```

```
D(4)=C(1,3);  
D(5)=C(2,3);  
D(6)=C(3,3);  
D(7)=C(1,4);  
D(8)=C(2,4);  
D(9)=C(3,4);  
D(10)=C(4,4);  
D(11)=C(1,5);  
D(12)=C(2,5);  
D(13)=C(3,5);  
D(14)=C(4,5);  
D(15)=C(5,5);  
D(16)=C(1,6);  
D(17)=C(2,6);  
D(18)=C(3,6);  
D(19)=C(4,6);  
D(20)=C(5,6);  
D(21)=C(6,6);  
end
```