

# Trabajo Fin de Grado Ingeniería de Materiales

## Cálculo del reparto de carga en uniones remachadas aeronáuticas

Autor: Armando López López

Tutor: Alberto Barroso Caro

Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de  
Estructuras

Facultad de Física

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Materiales

# **Cálculo del reparto de carga en uniones remachadas aeronáuticas**

Autor:  
Armando López López

Tutor:  
Alberto Barroso Caro  
Profesor titular

Dep. Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Facultad de Física  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado: Cálculo del reparto de carga en uniones remachadas aeronáuticas

Autor: Armando López López

Tutor: Alberto Barroso Caro

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*“La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas, y por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos”.*

*-Albert Einstein*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, agradezco infinitamente a mis padres todo el esfuerzo que llevan depositando en mí durante todos estos años y a los que debo mi educación en todos los ámbitos.

A mi Abuela y a mi tío que siempre os llevo conmigo.

A mi tutor Alberto Barroso por brindarme la oportunidad de trabajar con él y quien ha sido alguien fundamental en el desarrollo del trabajo ya que, sin su inestimable ayuda, atención y las horas dedicadas por su parte no hubiese sido posible la realización y finalización de este trabajo.

A mi familia y amigos de la facultad, que tan buenos momentos hemos pasado, y seguiremos pasando, juntos.

A Elena, por tu apoyo y comprensión durante este largo camino.

A todas aquellas personas que me han ayudado a alcanzar, en mayor o menor medida, este objetivo.

*Armando López*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

El presente trabajo tiene como objetivo hallar un modelo de elementos finitos simplificado de varias uniones remachadas que permitan reproducir lo que ocurre en la realidad y que es propuesto por autores como Niu en la bibliografía. Se persigue obtener parámetros importantes como la influencia de la rigidez de los remaches y el espesor de adherentes en el reparto de carga en los 2 tipos de uniones que se van a modelar buscando reproducir los resultados que se muestran en la bibliografía de referencia.

Su principal cometido es utilizar estos modelos como referencia para realizar un diseño previo de uniones remachadas o el caso de útiles para ensayos de fatiga de grandes componentes que tienen una unión remachada.

Se marca como objetivo también la parametrización con curvas de ajuste simples para el cálculo de la carga que pasa por cada remache

# Abstract

---

The objective of this paper is to find a simplified finite element model of several riveted joints that allow reproducing what happens in reality and that is proposed by authors such as Niu in the bibliography. We seek to obtain important parameters such as the influence of the stiffness of the rivets and the thickness of adherents in the distribution of load in the 2 types of joints that are going to be modeled looking to reproduce the results that are shown in the reference bibliography.

Its main purpose is to use these models as a reference to perform a prior design of riveted joints or the case of tools for fatigue tests of large components that have a riveted joint.

Parameterization with simple adjustment curves for calculating the load that passes through each rivet is also marked as a target.

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introducción</b>	
1.1 Motivación	1
1.2 Problema de estudio y objetivos	2
<b>2 Aspectos básicos</b>	<b>3</b>
2.1 Uniones mecánicas	3
2.1.1 Uniones remachadas	3
2.1.2 Remaches: Características, Tipos e Identificación	3
2.2 Análisis de uniones remachadas	6
2.3 Tipos de unión	8
2.3.1 Uniones a solape simple	9
2.3.2 Uniones a solape doble	9
2.3.3 Uniones escalonadas	10
2.3.4 Flexión secundaria	10
2.4 Cargas en una aeronave	12
2.4.1 Introducción	12
2.4.2 Tensiones en el fuselaje	12
2.4.3 Juntas comunes en fuselajes de aeronaves	13
2.5 Propiedades de materiales utilizados en el sector aeronáutico	15
2.5.1 Aleaciones de aluminio	15
2.5.2 Acero y aleaciones de acero	17
2.5.3 Materiales compuestos	18
<b>3 Modelos de referencia (Revisión de trabajos anteriores)</b>	<b>21</b>
3.1 Cálculo de la flexibilidad de los remaches	21
3.2 Resumen de métodos para el cálculo de flexibilidad a cortadura de los remaches	24
3.2.1 Grumann	24
3.2.2 Huth	25
3.2.3 Boeing	26
3.2.4 Comparación entre ecuaciones empíricas	26
3.3 Modelos de referencia para el cálculo del reparto de carga	27
3.4 Modelo de Michael Chun-Yung Niu	27
3.4.1 Uniones balanceadas	30
3.4.2 Uniones no balanceadas	31
3.4.3 Uniones escalonadas	32

3.5. Efecto del espesor de placas en el reparto de carga	33
3.6. Efecto del espesor del escalonado en el reparto de carga	34
<b>4 Modelo de elementos finitos</b>	<b>35</b>
4.1. Introducción al método de los elementos finitos	35
4.2. Resumen del modelado 2D y configuraciones analizadas	36
4.3. Descripción del modelo unión a solape doble	38
4.3.1. Descripción general	38
4.3.2. Geometría y construcción del modelo	38
4.3.3. Carga y condiciones de contorno	40
4.3.4. Mallado y Análisis de convergencia del mallado	41
4.3.5. Tipo de estudio	42
4.3.6. Tipo de elemento	43
4.3.7. Órdenes especiales	44
4.3.8. Representación de tensiones y deformada del modelo en ANSYS	45
4.3. Descripción del modelo unión escalonada	47
4.4.1. Descripción general	47
4.4.2. Geometría y construcción del modelo	47
4.4.3. Carga y condiciones de contorno	49
4.4.4. Mallado y Análisis de convergencia del mallado	49
4.4.5. Tipo de estudio	50
4.4.6. Tipo de elemento	50
4.4.7. Órdenes especiales	50
4.4.8. Representación de tensiones y deformada del modelo en ANSYS	51
<b>5 Resultados</b>	<b>53</b>
5.1. Rigidez de adherentes y remaches	53
5.2. Uniones balanceadas	54
5.2.1. Uniones balanceadas de 5 filas de remaches	54
5.2.2. Uniones balanceadas de 4 filas de remaches	57
5.2.3. Uniones balanceadas de 3 filas de remaches	59
5.2.4. Efecto del espesor sobre el reparto de carga	60
5.3. Uniones no balanceadas	62
5.3.1. Uniones no balanceadas de 5 filas de remaches	62
5.3.2. Uniones no balanceadas de 4 filas de remaches	64
5.3.3. Uniones no balanceadas de 3 filas de remaches	66
5.4. Uniones escalonadas	68
5.3.1. Uniones escalonadas de 5 filas de remaches	68
<b>6 Ensayo experimental para determinar rigidez a cortadura</b>	<b>70</b>
6.1. Objetivo	70
6.2. Probeta a tracción	70
6.3. Procedimiento de ensayo	72
6.4. Resultados	72
6.5. Conclusiones	73
<b>7 Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>74</b>
<b>Anexo I. Códigos APDL</b>	<b>75</b>
<b>Referencias</b>	<b>89</b>

# Índice de Tablas

---

<i>Tabla 2–1. Propiedades mecánicas Aluminio 2024-T3</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2–2. Propiedades mecánicas Aluminio 7075-T6</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2–3. Propiedades mecánicas Hastelloy</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2–4. Propiedades mecánicas Haynes 188</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2–5. Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster utilizadas en materiales compuestos</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2–6. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono, vidrio y kevlar de 49 a 20°C</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3–1. Parámetros de la ecuación de Huth</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4–1. Características generales de la unión a solape doble</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4–2. Características geométricas de la unión a solape doble</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4–3. Datos carga en cada remache para Análisis de Convergencia</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4–4. Parámetros del estudio paramétrico de la unión a solape doble</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4–5. Características generales de la unión escalonada</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4–6. Características geométricas de la unión escalonada</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4–7. Parámetros del estudio paramétrico de la unión escalonada</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5–1. % Carga a medida que varía la rigidez del remache</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5–2. % Carga a medida que varía la rigidez del remache</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5–3. % Carga a medida que aumenta el desbalanceo de la unión</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 5–4. % Carga a medida que aumenta el espesor de las placas de unión</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 5–5. % Carga a medida que aumenta el desbalanceo de la unión</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5–6. % Carga a medida que aumenta el desbalanceo de la unión</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5–7. % Carga a medida que aumenta el desbalanceo de la unión</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5–8. % Carga a medida que aumenta el desbalanceo de la unión</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 6–1. Características geométricas de la unión a solape doble</i>	<i>70</i>

# Índice de Figuras

<i>Figura 1-1. Visión general de una unión remachada</i>	1
<i>Figura 1-2. Reparto de carga hipotético con remaches infinitamente rígidos o flexibles</i>	2
<i>Figura 2-1. Clasificación de las uniones mecánicas</i>	3
<i>Figura 2-2. Tipos de materiales utilizados en remaches aeronáuticos</i>	4
<i>Figura 2-3. Tipos básicos de remaches según forma de la cabeza</i>	4
<i>Figura 2-4. Tabla identificativa de las marcas de los remaches</i>	5
<i>Figura 2-5. Carga circulante y transferida en una unión remachada</i>	6
<i>Figura 2-6. Cargas circulante y transferida en cada chapa y remache por separado</i>	6
<i>Figura 2-7. Distribución de tensión a lo largo de la longitud de solape de una unión adhesiva</i>	7
<i>Figura 2-8. Reparto de carga en uniones con varias filas de remaches</i>	8
<i>Figura 2-9. Clasificación general de varios tipos de uniones remachadas</i>	8
<i>Figura 2-10. Unión a solape simple</i>	9
<i>Figura 2-11. Unión a solape doble</i>	10
<i>Figura 2-12. Unión escalonada</i>	10
<i>Figura 2-13. Unión sometida a cortadura simple</i>	10
<i>Figura 2-14. Curvas de fatiga de un mismo material Alclad 2023 T4 unidos mediante tipos distintos de unión remachada.</i>	11
<i>Figura 2-15. Fuerzas presentes en un fuselaje y componentes de la cubierta de un fuselaje</i>	12
<i>Figura 2-16. Fuselaje semimonocasco</i>	12
<i>Figura 2-17. Refuerzo corto(a) y continuo(b)</i>	13
<i>Figura 2-18. Junta longitudinal típica</i>	13
<i>Figura 2-19. Presión diferencial a distintas altitudes.</i>	14
<i>Figura 2-20. Tensiones debidas a la presurización del fuselaje</i>	14
<i>Figura 2-21. Representación de una estructura tipo sándwich</i>	20
<i>Figura 2-22. Aumento del uso de materiales compuestos en estructuras aeronáuticas</i>	20
<i>Figura 3-1. Fuerzas que actúan en una unión</i>	21
<i>Figura 3-2. Encontrar la flexibilidad del remache (Huth, cortadura simple)</i>	22
<i>Figura 3-3. Modelo para encontrar la flexibilidad del remache (Huth, cortadura doble)</i>	23
<i>Figura 3-4. Gráfica relación fuerza-desplazamiento (Huth, cortadura doble)</i>	23
<i>Figura 3-5. Remaches sometidos a cortadura simple y doble respectivamente</i>	24
<i>Figura 3-6. Representación de la flexibilidad del método y la flexibilidad del modelo</i>	25
<i>Figura 3-7. Comparación entre ecuaciones empíricas</i>	26
<i>Figura 3-8. Modelo común 1D</i>	27
<i>Figura 3-9. Cálculo del espesor medio en la unión</i>	27
<i>Figura 3-10. Modelo simplificado de elementos finitos de una unión remachada con filas de 4 remaches</i>	29
<i>Figura 3-11. Unión inicial, conversión a una única fila de remaches y agrupación de los remaches para conseguir el propósito del modelo respectivamente</i>	29
<i>Figura 3-12. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones balanceadas de 3,4 y 5 remaches respectivamente</i>	30
<i>Figura 3-13. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones no balanceadas de 5 remaches</i>	31
<i>Figura 3-14. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones no balanceadas de 3 remaches</i>	32



<i>Figura 3-15. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones escalonadas de 5 remaches</i>	32
<i>Figura 3-16. Reparto de carga (%) para distintos espesores de placas</i>	33
<i>Figura 3-17. Influencia del aumento del escalonamiento uniones de 5 remaches</i>	34
<i>Figura 4-1. Descripción gráfica de la discretización en FEM</i>	35
<i>Figura 4-2. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo 3D a un modelo 2D</i>	37
<i>Figura 4-3. Descripción gráfica modelo inicial 2D</i>	38
<i>Figura 4-4. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo 3D a solape doble a un modelo 2D</i>	39
<i>Figura 4-5. Modelo de FEM generado finalmente</i>	40
<i>Figura 4-6. Modelo de FEM con condiciones de contorno</i>	40
<i>Figura 4-7. Mallado del modelo con diferentes grados de zoom</i>	42
<i>Figura 4-8. PLANE 182 – 2D geometría y localización de nodos</i>	43
<i>Figura 4-9. PLANE 182 – 2D Salida de tensiones</i>	43
<i>Figura 4-10. Zoom de la geometría deformada del remache derecho e izquierdo respectivamente</i>	45
<i>Figura 4-11. Zoom de la geometría deformada de remaches centrales</i>	45
<i>Figura 4-12. Geometría deformada unión de 4 remaches</i>	46
<i>Figura 4-13. Tensiones tangenciales</i>	46
<i>Figura 4-14. Tensiones de Von Mises</i>	46
<i>Figura 4-15. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo de unión escalonada 3D a un modelo 2D</i>	47
<i>Figura 4-16. Modelo de FEM generado para la unión escalonada</i>	48
<i>Figura 4-17. Modelo de FEM con condiciones de contorno</i>	49
<i>Figura 4-18. Mallado del modelo escalonado con diferentes grados de zoom</i>	49
<i>Figura 4-19. Zoom de la geometría deformada del remache izquierdo y derecho respectivamente</i>	51
<i>Figura 4-20. Zoom de la geometría deformada de remaches centrales</i>	51
<i>Figura 4-21. Geometría deformada unión escalonada</i>	52
<i>Figura 4-22. Tensiones tangenciales</i>	52
<i>Figura 4-23. Tensiones de Von Mises</i>	52
<i>Figura 5-1. Valores de rigidez a tracción de adherentes y remaches</i>	54
<i>Figura 6-1. Parámetros geométricos de la probeta a tracción</i>	71
<i>Figura 6-2. Aspecto general de la probeta</i>	71
<i>Figura 6-3. Montaje de la probeta en la máquina de ensayos</i>	71

# Notación

---

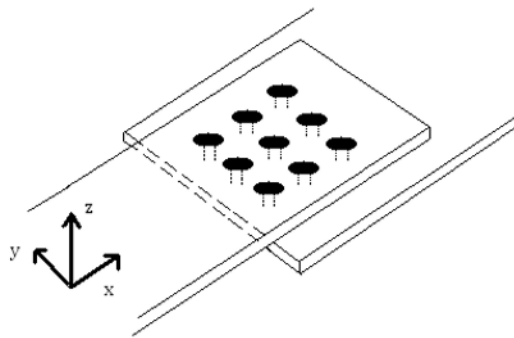
f	Flexibilidad
K	Rigidez
K <sub>r</sub>	Rigidez del remache
Δ <sub>tot</sub>	Desplazamiento total
δ	Valor promedio de un desplazamiento de un punto
P	Carga
E	Módulo de Young placas de unión
E <sub>r</sub>	Módulo de Young remaches
d	Diámetro remaches
t	Espesor placas de unión
t <sub>m</sub>	Espesor medio placas de unión

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Las uniones remachadas se usan ampliamente cuando se conectan componentes estructurales en grandes configuraciones. La información sobre el reparto de la carga y la flexibilidad de los remaches de una unión es de interés en el diseño de estructuras ligeras, que se producen comúnmente en el campo de la aeronáutica. Las estructuras de aeronaves, en particular el fuselaje y las alas, a menudo se conectan usando uniones remachadas con varios tipos de remaches.

Los remaches juegan un papel importante en la industria aeroespacial, existiendo una gran variedad de aplicaciones de uniones remachadas, tanto en aeronaves como en estructuras de motores a reacción. En la figura 1-1 se muestra una visión general de una unión remachada.



*Figura 1-1. Visión general de una unión remachada*

El reparto de la carga entre los remaches de la unión tiene un gran impacto en factores que afectan a la resistencia y la vida a fatiga de la unión, como el fallo por aplastamiento, a tracción, a cortadura (remache y placas) y las concentraciones de tensión, y por lo tanto es de interés al diseñar y dimensionar dicha estructura. Por lo que, hay que tener en cuenta que acarrear concentraciones de tensiones en el entorno del agujero en el que va a ir alojado el remache, pudiendo inducir en un fallo de la unión al estar sometida a una determinada sollicitación. Se puede producir tanto el fallo del elemento de unión como de los materiales que une.

La flexibilidad del remache es una propiedad de interés cuando se calcula el reparto de carga en una unión, ya que tiene influencia en la flexibilidad de la unión y un gran impacto en el reparto de carga, como se ilustra en la Figura 1-2, en una unión en la que idealmente los remaches son infinitamente rígidos, la cantidad de carga transferida al remache central es 0%, con 50% en cada uno de los remaches exteriores dando lugar a una no uniformidad en el reparto de carga. Lo contrario ocurre si en la unión los remaches son infinitamente flexibles, dando lugar a un reparto de carga que es equitativo y uniforme entre los remaches. Por tanto, elegir el valor correcto de flexibilidad del remache es un factor importante en los resultados en conjunto de la unión.

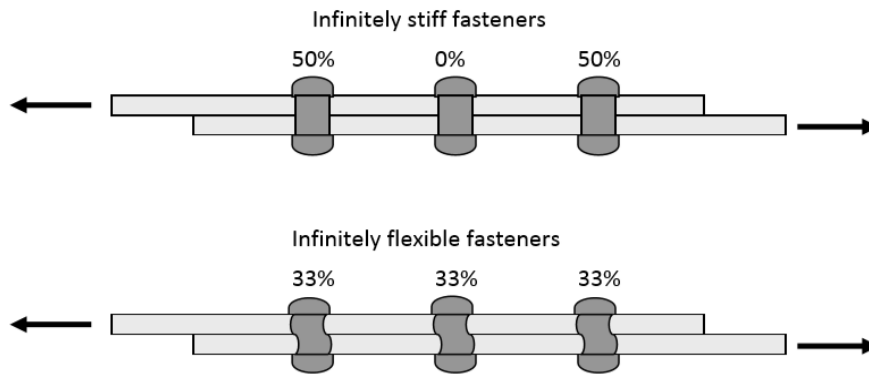


Figura 1-2. Reparto de carga hipotético con remaches infinitamente rígidos o flexibles

## 1.2 Problema de estudio y objetivos

El objetivo de este proyecto se trata de comprender y aplicar la metodología de trabajo necesaria para realizar simulaciones en software de elementos finitos, en concreto el paquete Ansys, realizándose mediante este software la modelización de varios tipos de unión remachada, en concreto uniones a solape doble y escalonadas persiguiéndose a su vez el objetivo de la idealización de estas uniones para calcular el reparto de carga y ver cómo influye la rigidez del remache sobre éste de acuerdo al modelo de referencia “Niu” [1] que se ha escogido, para que ello sirva de herramienta práctica para el diseño de futuras uniones remachadas en estructuras aeronáuticas disminuyendo así el número de ensayos experimentales y generando ahorro de costes. Además de esta propia utilidad, con objetivo de poderse utilizar en el diseño de utillaje para ensayos de fatiga de piezas y grandes componentes en los que los útiles tienen una unión remachada.

De forma muy resumida y simple, el problema se puede esquematizar en la figura 1-2, en la cual se muestra una unión remachada a solape simple solicitada a tracción. Una vez conocidos los parámetros geométricos (longitud y anchura del solape, espesores de adherentes, separación entre remaches), los materiales, sus propiedades mecánicas y las cargas externas, se trataría de determinar la carga que se transfiere por cada remache, que no necesariamente tendría por qué implicar la rotura catastrófica de la unión.

Hay muchas formas de calcular el reparto de carga y la rigidez de los remaches en una unión remachada. Qué actuaciones llevar a cabo para resolver estos problemas depende, como en tantas otras situaciones de ingeniería, principalmente de su aplicación prevista; es decir, qué resultados deseamos obtener y qué simplificaciones son razonables para obtener resultados aceptables.

El trabajo de Niu consistió en determinar el reparto de carga a través de un modelo de barras 1D, en el que se hacen muchas simplificaciones, este proyecto trata de desarrollar una herramienta práctica que nos permita reproducir los resultados que se muestran gráficamente en la bibliografía. Dónde, además podremos tener en cuenta parámetros como el diámetro de remaches, espesor de adherentes y otros parámetros que nos lleven un paso por delante de lo que muestra Niu en su trabajo.

## 2 ASPECTOS BÁSICOS

En el presente capítulo se presentan los aspectos básicos del presente proyecto en el que se definirán características, materiales y propiedades muy importantes de cara a la comprensión de las uniones remachadas.

### 2.1 Uniones mecánicas

Cuando se fabrican estructuras y máquinas necesitamos sus componentes. Para ello disponemos de diferentes tipos de uniones mecánicas entre los que destacan tornillos, remaches, soldaduras, adhesivos, pasadores y cuñas.

Una unión mecánica se define como cualquier conexión entre dos partes distintas de un sistema y se clasifican a grandes rasgos como móviles y rígidas. Las uniones móviles son las que permiten un movimiento relativo entre sus componentes y las uniones rígidas son las que no permiten movimiento entre sus partes. A partir de esta clasificación se muestra un esquema de las uniones mecánicas en la Figura 2-1

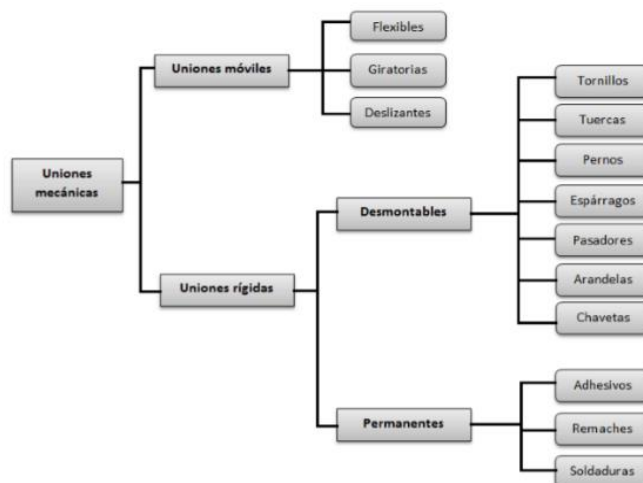


Figura 2-1. Clasificación de las uniones mecánicas

#### 2.1.1 Uniones remachadas

Una de las técnicas de unión más antiguas es el proceso de remachado. Las uniones remachadas están dentro de la clasificación de uniones permanentes rígidas, debido a que una vez instaladas, los remaches no se pueden quitar a menos que se fracturen y/o se tenga que realizar una reparación puntual. Actualmente su aplicación como técnica de montaje va en aumento, esto es debido, en parte, al desarrollo de técnicas de automatización que consiguen abaratar el proceso mecanizado de unión en la industria. Su versatilidad radica en que pueden usarse para montajes manuales, semiautomáticos o automáticos. En comparación con los elementos roscados, es más económico, rápido y fácil de instalar. Otra de sus características es que no se aflojan debido a vibraciones.

#### 2.1.2 Remaches: Características, Tipos e Identificación

Los remaches son elementos permanentes de bajo coste, muy adecuados para operaciones de montaje automático. La razón principal para remachar es un bajo coste en el emplazamiento de la operación, la suma del coste inicial del remache, coste de la mano de obra y el tiempo de trabajo de la máquina para instalar los remaches en su ubicación. El coste inicial de los remaches es sustancialmente más bajo que el de los elementos roscados, ya que estos se fabrican en grandes volúmenes en el encabezado de alta velocidad de máquinas de corte

(máquinas de fabricación por control numérico), con poca pérdida de desechos. Los costes de montaje son bajos y pueden ser instalados por máquinas automáticas de alta velocidad

Presentan ventajas como la posibilidad de unir materiales diferentes, metálicos o no metálicos y con distintos espesores. También presentan un mejor comportamiento a altas y bajas temperaturas con carga sostenida frente a las uniones adhesivas.

Son fabricados en base a materiales dúctiles que son relativamente fáciles de deformar. Los materiales utilizados en la fabricación de los remaches son principalmente hierro dulce, acero, cobre, aluminio, titanio, bronce y níquel. Existen también aleaciones de estos materiales que son realizadas para obtener propiedades específicas requeridas. La selección del material se realiza según el tipo de material a unir, la resistencia deseada y la aplicación específica que vayan a tener.

La siguiente figura nos muestra diferentes tipos de materiales típicos, características y usos recomendados de remaches para aplicaciones aeronáuticas.

MATERIAL DEL REMACHE	CARACTERÍSTICAS DE INSTALACIÓN	USADO SOBRE MATERIALES	RECOMENDACIONES DE USO Y LIMITACIONES
1100-F (aluminio)	fácil (deformación suave)	aluminio, plásticos, fibras	baja resistencia no recomendado en diámetros grande. (Diámetros 1/16- 1/8)
5056 (al-mag)	media	aleaciones de aluminio	a emplear cuando la resistencia del 5056 es adecuada y es deseable una fuerza pequeña de instalación (diámetros 3/32 - 3/16)
2117-T3 (al-cu-mg)	media dura	aleaciones de aluminio	para utilización en aplicaciones de sellado en tanques de combustible diámetros de 1/16 - 5/32)
2017-T3 (al-cu-mg)	dura	aleaciones de aluminio	empleo general
2024-T3 (al-cu-mg)	dura	aleaciones de aluminio	alta resistencia. Empleo limitado debido al almacenamiento en frigoríficos (3/16 -1/4)
monel	muy dura	aleaciones de cobre, acero y acero inox	fuerza de instalación muy alta para diámetros grandes
A-286 (acero inox)	muy dura	titanio, acero y acero inox	hasta 1/4. De empleo en soportes de motor , zonas calientes y ambiente corrosivos
titanio B120	muy dura	acero y acero inox	hasta 3/16. De empleo en zonas calientes y ambiente corrosivos
7075-H75 (al-zn-mg-cu)	media dura	aleaciones de aluminio	no emplear en zonas críticas a la fatiga

Figura 2-2. Tipos de materiales utilizados en remaches aeronáuticos

Existen multitud de remaches fabricados con formas de cabeza y materiales distintos, en las Figura 2-3 se muestran algunos

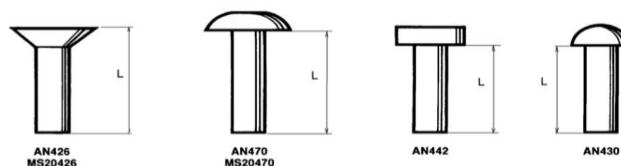


Figura 2-3. Tipos básicos de remaches según forma de la cabeza

Además, dentro de esta clasificación se pueden hacer muchas otras, por ejemplo, por la forma de la cabeza del remache o distinguiendo por su carácter fijo/desmontable.

Los remaches se definen por la forma de la cabeza (norma), material, diámetro de la caña y longitud (se toma para los de cabeza avellanada como la distancia entre la parte inferior de la caña y la parte superior de la cabeza, para los otros tipos de cabeza se toma la distancia entre la parte inferior de la caña y la superficie de apoyo de la cabeza).

Para identificar físicamente los remaches y conocer de forma inequívoca el material de que están contruidos, se realizan marcas sobre las cabezas tal y como se indica en la figura siguiente.

<b>A</b> 1100 NO MARK	MS20430A ROUND HEAD	MS20442A FLAT HEAD	MS20426A 100° C'SUNK	MS20455A BRAZIER	MS20425A 78° C'SUNK	MS20456A BRAZIER	MS20470A UNIVERSAL
<b>AD</b> 2117T DIMPLE	MS20430AD ROUND HEAD	MS20442AD FLAT HEAD	MS20426AD 100° C'SUNK	MS20455AD BRAZIER	MS20425AD 78° C'SUNK	MS20456AD BRAZIER	MS20470AD UNIVERSAL
<b>D</b> 2017T RAISED DOT	MS20430D ROUND HEAD	MS20442D FLAT HEAD	MS20426D 100° C'SUNK	MS20455D BRAZIER	MS20425D 78° C'SUNK	MS20456D BRAZIER	MS20470D UNIVERSAL
<b>DD</b> 2024T RAISED DOUBLE-DASH	MS20430DD ROUND HEAD	MS20442DD FLAT HEAD	MS20426DD 100° C'SUNK	MS20455DD BRAZIER	MS20425DD 78° C'SUNK	MS20456DD BRAZIER	MS20470DD UNIVERSAL
<b>B</b> 5066T RAISED-CROSS	MS20430B ROUND HEAD	MS20442B FLAT HEAD	MS20426B 100° C'SUNK	MS20455B BRAZIER	MS20425B	MS20456B BRAZIER	MS20470B UNIVERSAL
<b>C</b> COPPER NO MARK	MS20435C ROUND HEAD	MS20441C FLAT HEAD	MS20427C 100° C'SUNK	MS20420C 90° C'SUNK			
<b>F</b> STAINLESS STEEL NO MARK	MS20435F ROUND HEAD		MS20427F 100° C'SUNK				
<b>M</b> MONEL NO MARK	MS20435M ROUND HEAD	MS20441M FLAT HEAD	MS20427M 100° C'SUNK				
<b>STEEL RECESSED TRIANGLE</b>	MS20435 ROUND HEAD	MS20441 FLAT HEAD	MS20427 100° C'SUNK	MS20420 90° C'SUNK			

Figura 2-4. Tabla identificativa de las marcas de los remaches

## 2.2 Análisis de uniones remachadas

En el análisis de una unión remachada se debe determinar, por una parte, la carga transmitida por cada remache y por otra parte el estado tensional en el entorno de los taladros de las piezas que se van a unir. Con el análisis de estas tensiones y el conocimiento de los posibles mecanismos de fallo y sus valores admisibles, se podrá proponer criterios de fallo para el diseño de uniones remachadas.

En un a unión remachada con varias filas de remaches, la diferencia entre la carga total que llega a cada fila de remaches menos la carga que se transfiere por dicha fila se denomina carga circulante. En cada fila de remaches, se deben pues calcular los valores de carga transferida y carga circulante pues cada tipo de carga es responsable de un tipo de fallo.

Utilicemos el esquema de la unión de dos chapas a solape simple con dos filas de remaches mostrado en la Fig. 2-5 para ilustrar los conceptos de carga transferida y carga circulante.

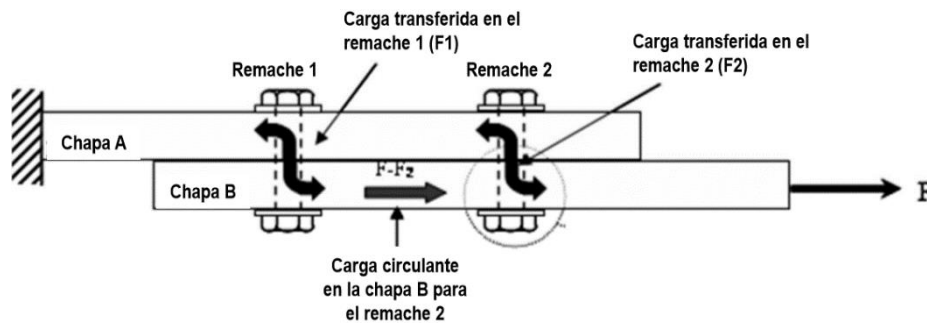


Figura 2-5. Carga circulante y transferida en una unión remachada

En la Fig. anterior se transmite una carga total  $F$  habiéndose instalado dos filas de remaches. En el análisis de la chapa A, parte de la carga  $F_1$  se transfiere entre las dos chapas a través del remache 1, de manera que parte de la carga total  $F$ , de valor  $F_2 = F - F_1$ , circula por la chapa A alrededor del remache 1 y se transmite a la chapa B a través del remache 2.

A su vez, en el análisis de la chapa B, en la fila de remaches 1 no existe carga circulante y toda la carga es transferida por el remache 1 ( $F_1$ ), esta carga es circulante en la chapa B en la fila de remaches 2, en la cual ahora sí existe, además, carga transferida de valor  $F_2$  entre la chapa A y B.

En la Fig. 2-6 se ilustran, por separado, los valores de carga transferida y circulante, para cada chapa y fila de remaches. Este análisis es imprescindible en cualquier unión remachada, ya que, cada tipo de carga (transferida y circulante) activa mecanismos de fallo distintos. Si además cada chapa es de una naturaleza distinta (por ejemplo, metal y compuesto), valores similares de las cargas transferidas y circulantes pueden originar distintos tipos de daño en cada una de las chapas, al variar los valores admisibles.

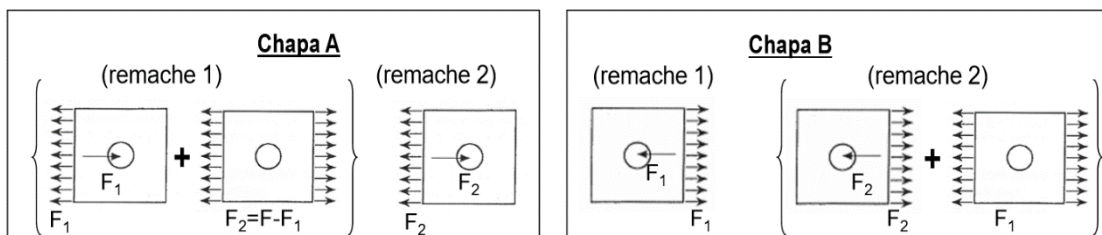
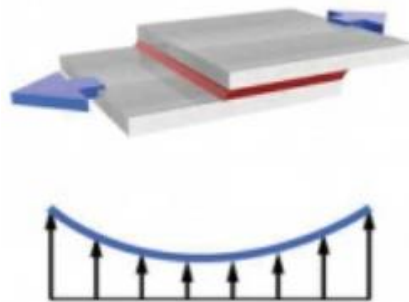


Figura 2-6. Cargas circulante y transferida en cada chapa y remache por separado



El cálculo de la carga transferida en cada fila de remaches es delicado y depende de una cuidadosa ejecución de los taladros, su coincidencia en posición en ambas chapas, el número de filas de remaches y la naturaleza de los materiales a unir, entre otros muchos parámetros.

Para ayudar, en un análisis preliminar, a entender el mecanismo de transmisión de carga en una unión remachada con varias filas de remaches, podemos ayudarnos de los conocimientos de mecanismos de transmisión de cargas en las uniones adhesivas, sin más que imaginar que una unión adhesiva puede ser idealizada como una unión de infinitas filas de remaches de diámetro cero. De esta manera, entendemos fácilmente que las filas de remaches más externas van a tener un valor de carga transferida mayor, quedando las filas de remaches internas más descargadas de carga transferida como se muestra en la siguiente figura 7 que representa el reparto de carga en una unión adhesiva.



*Figura 2-7. Distribución de tensión a lo largo de la longitud de solape de una unión adhesiva*

En la práctica, esta idea lleva a restringir el número de filas a un máximo de 4, siendo raro encontrarse uniones con más filas de remaches. A este respecto es importante destacar que existen configuraciones de uniones remachadas, con numerosas filas de remaches, en las que realmente se está realizando un alivio de la carga de algún componente y no realmente una unión entre dos piezas, en las que no es recomendable, instalar más de cuatro filas de remaches.

Además del número de filas, la naturaleza de las chapas a unir es fundamental, ya que, la capacidad de comportamiento plástico que generalmente presentan los materiales metálicos, hace que, a efectos prácticos, las uniones remachadas entre metal-metal, se calculen siempre con carga transferida idéntica en cada fila de remaches. Con cargas pequeñas y comportamiento elástico, en una unión metal-metal, las filas externas de remaches transmiten más carga, pero a medida que crece la carga total a transmitir, el entorno de los taladros de las filas de remaches externas plastifica, produciéndose redistribuciones locales de las tensiones y permitiendo que las filas de remaches internas crezcan hasta alcanzar valores del límite elástico.

Esta redistribución de tensiones no puede producirse en el caso de unir materiales sin capacidad de comportamiento plástico, como es el caso de uniones entre láminas de materiales compuestos con la fibra orientada en la dirección de la carga, que es el caso más habitual. En el caso de uniones híbridas metal-composite, siempre va a existir una asimetría en la carga transferida por cada fila de remaches, con cargas transferidas generalmente mayores del lado del material compuesto.

El cálculo detallado de la carga transferida en uniones con varias filas de remaches es complejo, requiriendo en casos el modelado por elementos finitos. Para análisis preliminares, se pueden tomar valores ya tabulados, como los que se muestran en la Fig.9 tomados del libro EUROCOMP [7], en la que en el caso composite-metal, la fila 1 es la que está del lado del material compuesto.

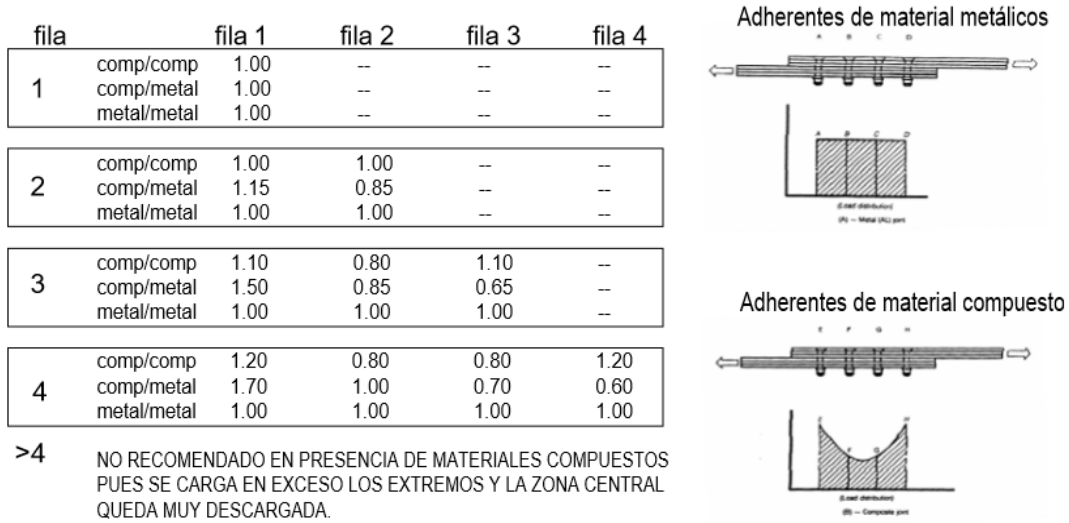


Figura 2-8. Reparto de carga en uniones con varias filas de remaches

En el reparto sugerido en la Fig. 2-8 en el que cada remache se lleva la parte proporcional de carga que resulta de dividir el número mostrado por la suma de todos los remaches, se considera carga concéntrica (la resultante de la carga a transmitir pasa por el centro de gravedad del conjunto de remaches) y se considera también en el caso metal-metal y composite-composite adherentes idénticos a ambos lados de la unión. Es bien conocido que en uniones no-balanceadas (elementos a unir desiguales) los remaches cercanos al material más flexible transmiten más carga que los del extremo opuesto.

A parte de este modelo, veremos más adelante modelos de referencia para el cálculo de reparto de carga como el de Niu [1].

### 2.3 Tipos de unión

El esfuerzo por cortadura es un tipo de esfuerzo que actúa paralelo o tangencialmente a la superficie. El esfuerzo cortante se denota por  $\tau$  (tau). Los esfuerzos de corte se encuentran comúnmente en remaches, clavos y tornillos.

Hay gran variedad de clasificaciones sobre los tipos de unión, en la figura 2-9 vemos una clasificación simple de estas uniones.

		SINGLE RIVETED	DOUBLE RIVETED	TRIPLE RIVETED
SINGLE	LAP JOINT			
	STRAP BUTT JOINT			
DOUBLE	LAP JOINT			
	STRAP BUTT JOINT			

Figura 2-9. Clasificación general de varios tipos de uniones remachadas

En nuestro caso vamos a definir a los 3 tipos de uniones utilizadas en el proyecto, que básicamente son el pilar del resto de clasificaciones. Hablaremos de uniones a solape simple (cortadura simple), uniones a solape doble (cortadura doble) y uniones escalonadas.

### 2.3.1 Uniones a solape simple

Si las placas a unir están conectadas por un remache tal como se muestra en la siguiente figura, y están sujetas a fuerzas de tensión, se desarrollarán tensiones de cortadura en el remache dando lugar a una unión sujeta a cortadura simple.

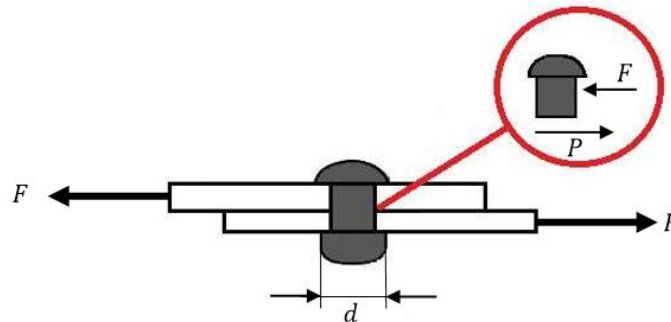


Figura 2-10. Unión a solape simple

La fuerza de corte  $P$  en el plano de corte es igual a la fuerza de tensión  $F$ . La tensión de corte promedio en el plano es  $\tau_m = F/A$ . Se dice que esta unión es del tipo de cortadura simple.

Podemos observar que sólo hay cortadura en el plano que separa las dos placas y toda la fuerza  $F$  es resistida solo por este único plano de cortadura en el remache. Como veremos en el apartado 2.3.4 las uniones a solape simple van a sufrir flexión secundaria.

### 2.3.2 Uniones a solape doble

Si las placas a unir están conectadas de la forma que se muestra en la siguiente figura y están sujetas a fuerzas de tensión, se desarrollarán tensiones de cortadura en el remache dando lugar a una unión sujeta a cortadura doble.

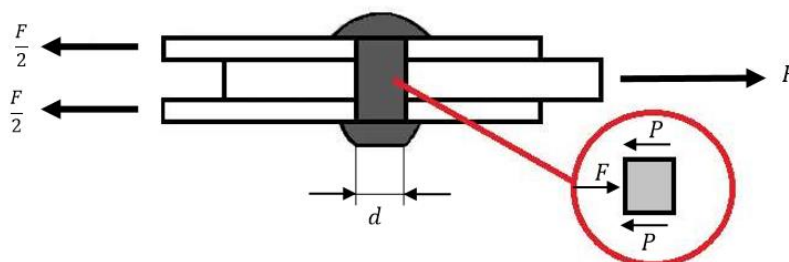


Figura 2-11. Unión a solape doble

Para determinar el esfuerzo cortante promedio en cada plano de corte, se dibujan diagramas de cuerpo libre de remache y de la porción de remache ubicada entre los dos planos. Observando que la  $P$  (fuerza) de corte en cada uno de los planos es  $P = F/2$ , el esfuerzo cortante promedio es  $\tau_m = F/2A$ .

Se dice que esta unión es del tipo de cortadura doble, y debido a su plano de simetría no sufre efectos de flexión secundaria.

La placa central está sometida a una fuerza  $F$ . La fuerza total  $F$  se aplica ahora como una cortante en dos planos (cada  $F/2$ ), originando que el mismo remache ahora necesite cortarse en dos planos para que la separación de las placas ocurra. Por tanto, el remache ahora necesita tener solo la mitad del área de la sección transversal para resistir la misma fuerza  $F$ .

### 2.3.3 Uniones escalonadas

Si las placas a unir están conectadas de la forma que se muestra en la siguiente figura y están sujetas a fuerzas de tensión, se desarrollarán tensiones de cortadura que darán lugar a una unión escalonada

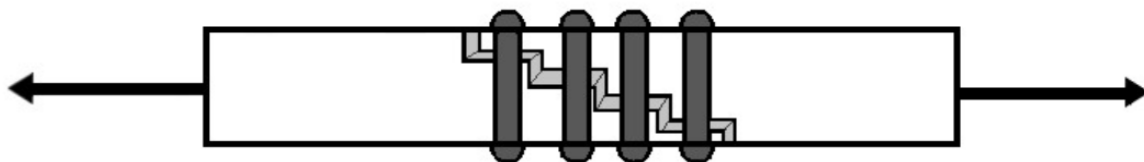


Figura 2-12. Unión escalonada

En uniones escalonadas la excentricidad global es prácticamente nula y la excentricidad local es pequeña, esto es debido a que las cargas pasan por cada remache con una pequeña excentricidad, pero entre cada escalón se generan pequeños momentos que se cancelan entre sí, lo que hace que el giro esté de esta forma impedido y el efecto de la flexión secundaria no se presenta quedando una excentricidad global prácticamente nula.

### 2.3.4 Flexión secundaria

La flexión secundaria ocurre como resultado de la excentricidad de la carga aplicada a lo largo de la línea de transferencia de carga que hace que el par de fuerzas provoque un momento, que genera un giro en la unión, dicho giro continúa hasta que la unión se fracture, esto ocurre cuando la línea que divide el vástago del remache en dos partes se alinea con la carga aplicada. Durante el proceso de rotación, la unión se va reorientando, y los remaches se encuentran inclinados provocando que parte de la carga se proyecte en la dirección de las tensiones de pelado. Por tanto, las tensiones de pelado avanzan más en los extremos por los pequeños giros que tiene la unión como se ilustra en la Figura siguiente. Observamos que es común en uniones sometidas a cortadura simple (solape simple).

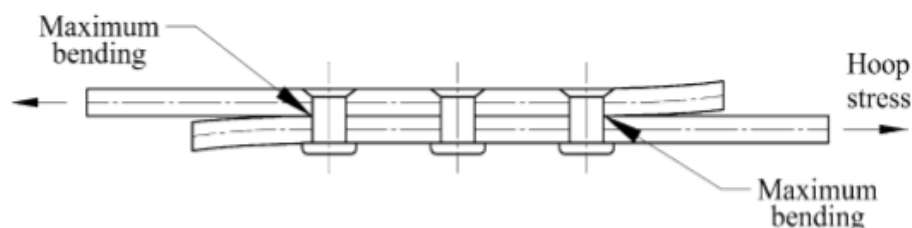


Figura 2-13. Unión sometida a cortadura simple

Está muy relacionada con la transferencia local de la carga, ya que, tiene una gran influencia en la vida a fatiga de las uniones que sufren la flexión secundaria.

La carga de flexión secundaria corresponde al momento de flexión transferido a las placas en una unión mecánica debido a la flexión y la inclinación del vástago del remache que es la fuente de desviación fuera del plano de la junta de sujeción. El esfuerzo de flexión puede ser del mismo orden de tensión de tracción aplicada dependiendo de parámetros como la transferencia local de carga, la distancia entre las filas de remaches (o la longitud de solape), el diámetro del remache, el espesor de la placa y la fuerza de apriete, que también afectan a la flexión secundaria en una unión a cortadura simple. La magnitud de la tensión máxima de flexión en las ubicaciones mostradas por las flechas en la figura anterior puede llegar a ser tan grande como la tensión de tracción aplicada.

Según el programa AGARD (Consultora para la investigación y el desarrollo aeroespacial), la flexión secundaria tiene un efecto muy acusado sobre la vida a fatiga de las uniones a solape simple (cortadura simple). Este efecto lo podemos observar en la figura siguiente

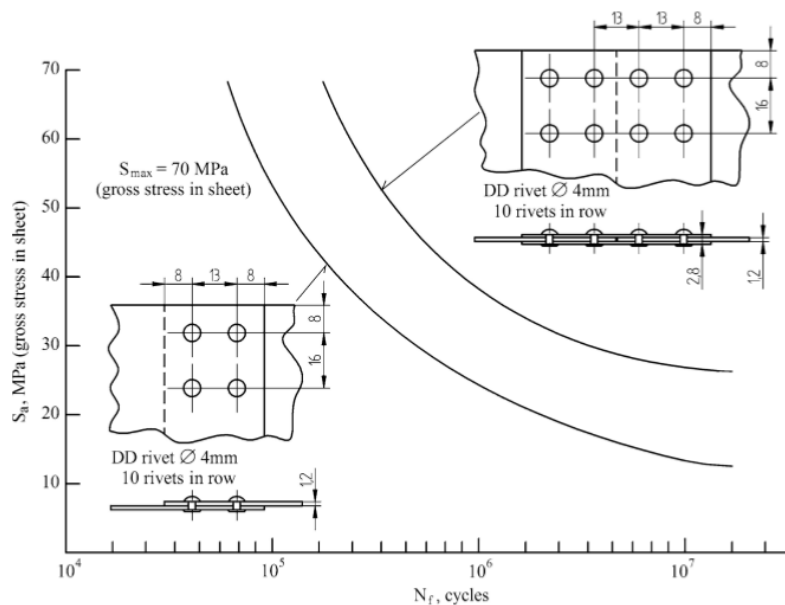


Figura 2-14. Curvas de fatiga de un mismo material Alclad 2023 T4 unidos mediante tipos distintos de unión remachada.

El efecto sobre la vida a fatiga que se muestra en la figura anterior presenta los resultados de las pruebas de fatiga a amplitud constante (CA) de Hartman y Schijve (1969) que indican que, para el mismo espaciado de filas de remaches, la resistencia a la fatiga a  $2 \times 10^7$  ciclos para la unión a solape doble (cortadura doble) es el doble aproximadamente que el de la unión a solape simple (cortadura simple). Por lo que, para una misma tensión las uniones a cortadura simple soportan menos ciclos de carga que las uniones sometidas a cortadura doble (omiten la flexión secundaria). Por lo que, de acuerdo a esta curva S-N, la vida a fatiga de uniones a solape simple está muy influenciada por la flexión secundaria, y, por tanto, se deberá considerar en el caso de que tengamos la certeza de que la carga que estamos aplicando es excéntrica, disminuyendo entonces la vida a fatiga de la unión

En consecuencia, el rendimiento a fatiga de las uniones con excentricidades es inferior al de las uniones simétricas, por tanto, las uniones de cortadura doble son más eficientes ya que no sufren flexión secundaria.

## 2.4 Cargas en una aeronave

### 2.4.1 Introducción

Como se describe en el texto de Niu [1], las cargas de aeronave son aquellas fuerzas y cargas aplicadas a los componentes estructurales del avión, pueden ser causadas por la presión del aire, las fuerzas de inercia o las reacciones en el suelo durante el aterrizaje. Hay muchos tipos de fuerzas a las que un avión se somete en vuelo como las debidas al manejo de la aeronave, al empenaje de cola, la propulsión y el fuselaje.

La piel del fuselaje está unida a la estructura por medio de un gran número de remaches y la presurización del fuselaje (o cabina) de un avión comercial induce tensiones circunferenciales y longitudinales en el fuselaje. El fuselaje es la parte más grande del avión, por lo que, dado que nuestro trabajo se centra en el cálculo de reparto de carga en uniones remachadas aeronáuticas, surge la necesidad mencionar las cargas que se generan en la cubierta el fuselaje ya que tendrán una gran influencia sobre el reparto de carga y la vida a fatiga de la unión.

### 2.4.2 Tensiones en el fuselaje

Debido a la presurización de la cabina, se generan tensiones en la cubierta del fuselaje ya que éste se convierte en un tanque de presión. Aunque las presiones diferenciales son relativamente pequeñas, la superficie es muy grande y, por consiguiente, también lo son las fuerzas longitudinales y circunferenciales que están representadas en la Figura 2-14.

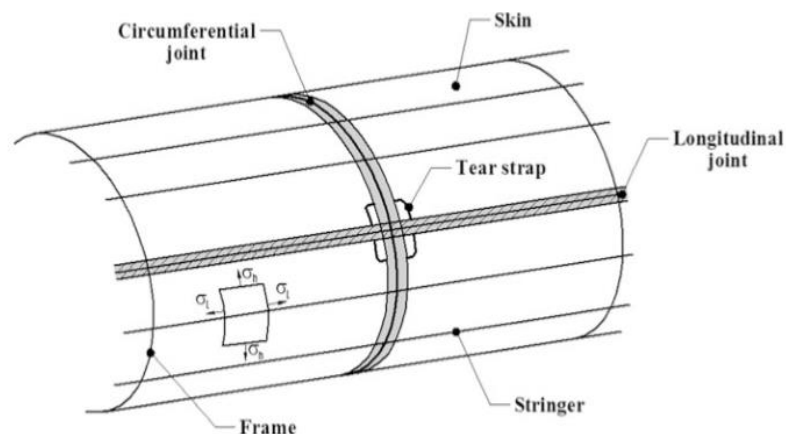
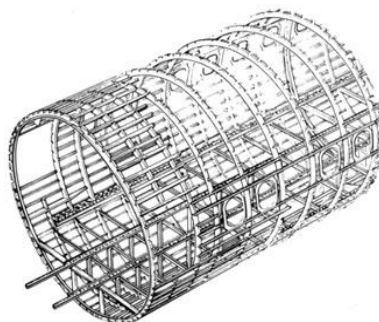


Figura 2-15. Fuerzas presentes en un fuselaje y componentes de la cubierta de un fuselaje

Por lo que, podemos considerar el fuselaje como un recipiente de pared delgada en el que la relación  $\frac{D}{t} < 10$ , debido a que la mayoría de aviones comerciales utilizan fuselaje semimonocasco (Figura 2-15)



Estructura semimonocasco. De Havilland Canada - Dash 7

Figura 2-16. Fuselaje semimonocasco

De acuerdo con la teoría de los recipientes de pared delgada, una carga principal para la cubierta del fuselaje es la tensión circunferencial (hoop tension). Para un recipiente no rigidizado (flexible), la tensión circunferencial es:

$$\sigma_h = p \cdot R / t$$

Donde  $p$  es la presión interna del fuselaje,  $R$  es el radio de curvatura del fuselaje y  $t$  es el espesor de la pared delgada.

La tensión longitudinal es  $\sigma_l = 0.5 \sigma_h$ , por lo que como podemos observar en la figura 16 las uniones piel-fuselaje en las que se generen las dos tensiones serán las más desfavorables y necesitarán de un refuerzo (tear strap).

En la siguiente figura vemos los refuerzos utilizados en las uniones remachadas de fuselajes de aeronaves.

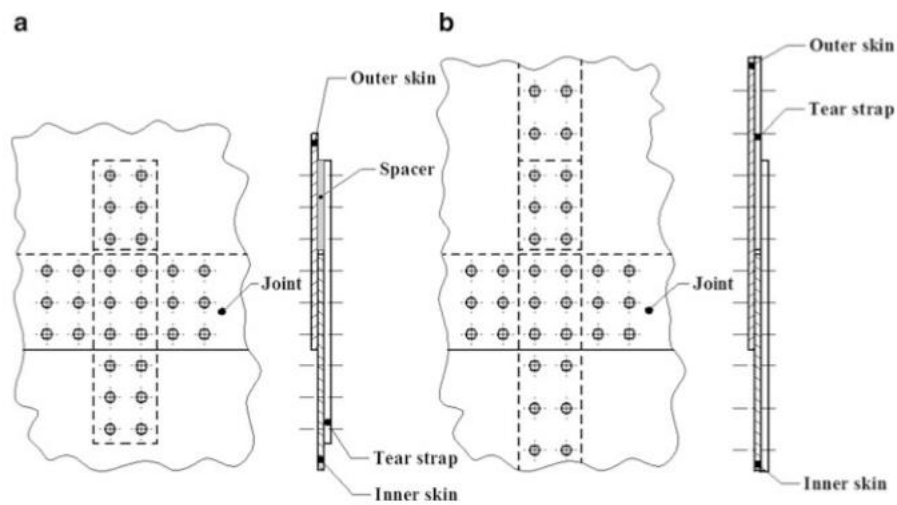


Figura 2-17. Refuerzo corto(a) y continuo(b)

### 2.4.3 Juntas comunes en fuselajes de aeronaves

La junta longitudinal remachada puede consistir en dos, tres e incluso cuatro filas de remaches como se observa en la figura siguiente:

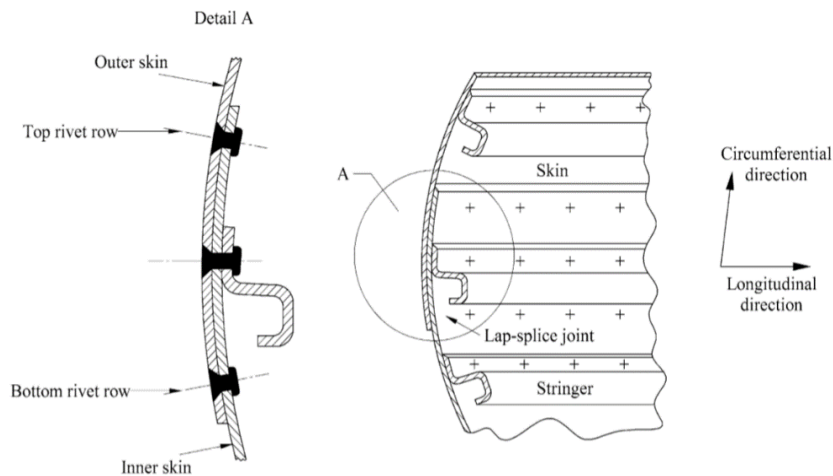


Figura 2-18. Junta longitudinal típica

En general, la mayoría de fuselajes de aviones comerciales están diseñados para una presión equivalente a 8000 pies (2432 metros) de altitud. A esta altitud la presión atmosférica es de 10,92 psi. Los valores de diferencia de presión ( $\Delta p$ ) entre la presión atmosférica ( $p_a$ ) y la presión de cabina ( $p_c$ ) a diferentes altitudes se muestran en la siguiente figura x

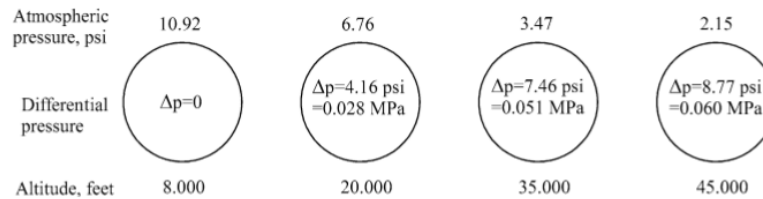


Figura 2-19. Presión diferencial a distintas altitudes

La junta longitudinal (Figura 19) también puede experimentar tensiones de flexión o cortante debido a turbulencias de aire (predominantemente durante el período de ascenso y descenso a bajas altitudes) y maniobras (despegue, aterrizaje), dependiendo de la ubicación a lo largo de la circunferencia del fuselaje y la posición a lo largo del fuselaje. La figura siguiente muestra las condiciones de carga a lo largo de un fuselaje de un avión comercial

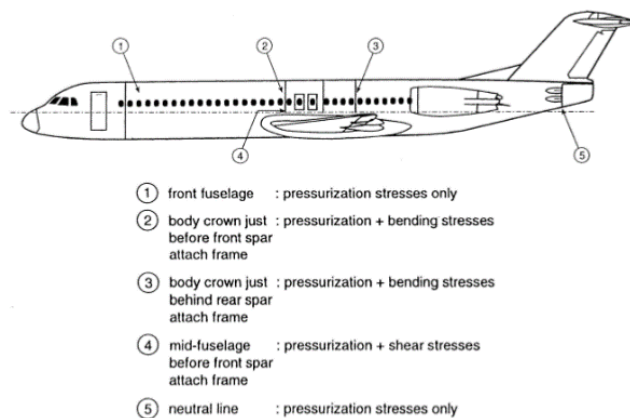


Figura 2-20. Tensiones debidas a la presurización del fuselaje

Como podemos ver, en la zona 1 sólo se experimentan tensiones debidas a la presurización, en la zona 2 vemos que se añaden tensiones de flexión antes del marco de fijación del larguero frontal y otros.

Sin embargo, los refuerzos internos longitudinales y transversales son necesarios para transportar las cargas resultantes de maniobras de vuelo, aterrizajes y maniobras en tierra, etc. Los refuerzos longitudinales, llamados larguerillos, llevan la mayor parte del momento flector del fuselaje. Los refuerzos transversales, llamados marcos, están espaciados en intervalos regulares a lo largo de la longitud del fuselaje para evitar el pandeo de los refuerzos longitudinales y mantener la forma de la sección transversal del fuselaje. La presencia de estos refuerzos internos introduce los siguientes dos aspectos importantes en el diseño del fuselaje de un avión comercial:

1. Los refuerzos, es decir, los larguerillos y marcos, están unidos a la piel del fuselaje por algunos tipos de remaches, o a veces unidos mediante adhesivos. Por lo tanto, hay una transmisión de cargas entre la piel y los refuerzos a lo largo de sus líneas de unión, produciéndose en la intersección de los refuerzos una concentración local de las cargas que interactúan debido a la rigidez de la unión. Entender el mecanismo de transferencia de carga en las articulaciones entre el refuerzo y la piel bajo presión es necesario para determinar la capacidad de carga de estas uniones.
2. La presencia de refuerzos internos, particularmente la presencia de marcos, previene la expansión de la piel del fuselaje como una membrana, generando así un límite de flexión para el fuselaje.



## 2.5 Propiedades de materiales utilizados en el sector aeronáutico

Puesto que no es el objetivo del proyecto no se va a hablar en detalle sobre los materiales utilizados en el sector aeronáutico, describiéndose algunas de las propiedades mecánicas y características de algunos de los principales materiales utilizados en este sector y que han sido modelados en el presente proyecto.

### 2.5.1 Aleaciones de Aluminio

Dentro de los factores más importantes para la selección de aluminio (Al) y de sus aleaciones en el sector aeronáutico se encuentran su elevada relación de resistencia al peso, a la corrosión, conductividad térmica y eléctrica, flexibilidad, apariencia y facilidad de conformado y maquinabilidad.

Para la designación de las aleaciones del aluminio en bruto se identifican mediante cuatro dígitos y una designación de temple mostrando el estado del material:

- 1xxx – Aluminio comercialmente puro
- 2xxx – Aluminio – Cobre
- 3xxx – Aluminio – Manganeso
- 4xxx – Aluminio – Silicio
- 5xxx – Aluminio – Magnesio
- 6xxx – Aluminio – Manganeso - Silicio
- 7xxx – Aluminio – Zinc

#### 2.5.1.1 Aluminio 2024T3

Es una de las aleaciones más utilizadas en el sector aeronáutico en elementos de fijación (remaches macizos, remaches high-shear, remaches ciegos, tornillos ciegos, tornillos de 12 puntos, tornillos hexagonales, pernos, lockbolts, hi-lock, taper-lock, tuercas) capaces concentrar las cargas concentradas y transferirlas. Estos elementos deben poseer características como:

- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia a la fatiga (tracción y cortadura).
- Permeabilidad magnética (a ciertos equipos o sistemas de control)

A continuación se muestra una tabla con las propiedades mecánicas de esta aleación:

PROPIEDADES MECANICAS					
Aleación	Tensión				
	Resistencia (Ksi)		Elongación en 2 in.		
	Ultimo	Cadencia	1/16"	1/2"	
			Espesor	Diámetro	
2024T3	70	50	18	-	

Aleación	Dureza	Corte	Fatiga	Modulo
	Brinell	Ultimo de Corte	Límite de Fatiga*	Módulo de elasticidad (Ksi x 10 <sup>3</sup> ) **
	500 kg Balo de 10 mm	Resistencia (Ksi)	(Ksi)	
2024T3	120	41	20	10,6

Aleación	Módulo de Corte	Resistencia a la fluencia	Resistencia de carga última
	Ksi	Ksi	Ksi
2024T3	18.85	55,11	10587.75

Tabla 2-1. Propiedades mecánica Aluminio 2024T3

### 2.5.1.2 Aluminio 2024T3 ALCLAD

Es resistente a la corrosión formada por superficies de aluminio de alta pureza ligada metalúrgicamente a un núcleo de aleación de aluminio de alta resistencia. Esta aleación de aluminio es usada como protección contra la corrosión en la fabricación de compartimientos para baterías de avión, revestimientos de fuselaje.

Es una aleación de aluminio (Al), Manganeso (Mn) y Magnesio (Mg) tratado a alta temperatura, que tiene en su superficie la resistencia a la corrosión del aluminio puro y la resistencia a la tracción de aleación en el interior.

### 2.5.1.3 Aluminio 7075-T6

Este aluminio es utilizado en vigas, uniones de estructuras, así como en las estructuras mismas, en la fabricación de fuselajes de ala delta o del área de militar, accesorios de aeronaves, engranajes, ejes, partes de misiles, tornillos sin fin, es perfecto para aéreas en donde es necesaria una alta resistencia, así como en la fabricación de moldes.

Los aluminios de esta serie (serie 7XXX) son probablemente los más duros, sin embargo, con el proceso de templado de solución temple y maduración artificial esta dureza tiende a reducirse. Su resistencia a la corrosión es baja si no se protege por una capa química o por pintura.

El aluminio 7075-T6 es una aleación que se caracteriza por:

- Alta resistencia mecánica
- Resistente a la corrosión (sin embargo, es baja respecto a otras aleaciones).
- Resistencia a la fatiga.
- La relación resistencia-densidad es alta.
- Alta dureza.
- Alto índice de endurecimiento

A continuación se muestra una tabla con las propiedades mecánicas más importantes de esta aleación:

Aleación	Tensión			
	Dureza (Ksi)		Elongación % en 2 in.	
	Ultimo	Cadencia	1/16" Espesor	1/2" Diámetro
7075-T6	83	73	11	11

Aleación	Dureza	Corte	Fatiga
	Brinell	Dureza máxima de corte	Límite de Fatiga*
	500 kg de carga 10 mm de esfera	(Ksi)	(Ksi)
7075-T6	150	48	23

Aleación	Módulo de Corte	Resistencia a la fluencia	Resistencia de carga última
	Ksi	Ksi	Ksi
7075-T6	3900	83	73

Tabla 2-2. Propiedades mecánica Aluminio 7075-T6

### 2.5.1.3 Aluminio 7150-T6

Esta aleación es la más resistente de esta serie utilizada en el sector aeronáutico. Es una aleación con una tenacidad alta, lo que permite que se reemplace al aluminio 7075-T6 ya que cuenta con una resistencia de 6 a 10 Ksi mayor. Es una aleación que se puede tratar térmicamente, con el fin de aumentar su resistencia. Su resistencia a la corrosión es justa para sus aplicaciones.

Esta aleación es utilizada en la piel de las alas en los aviones comerciales, en donde un material resistente a la fluencia es vital.

## 2.5.2 Acero y aleaciones de acero

Como bien sabemos el acero ha ido cayendo en desuso debido a su alta densidad y problemas por corrosión. Se pueden clasificar en función del porcentaje de carbono que contengan o el porcentaje de aleante, que les da una serie de características u otras. Algunos de los más utilizados se presentan a continuación.

### 2.5.2.1 Acero inoxidable 17-4PH

Combina alta resistencia y dureza posterior al tratamiento térmico de baja temperatura y a corto plazo que reducen al mínimo el pandeo y desoxidación y una resistencia excelente a la corrosión, posee excelentes características de mecanizado. Debido a la alta resistencia, esta aleación se usa principalmente en el sector aeroespacial en engranajes, válvulas, alabes de turbinas y ejes.

### 2.5.2.2 Acero SAE 4130

Pertenece a la serie 4000 AISI de los aceros. Es un metal ferroso. Es una baja aleación de acero. Es un acero de medio carbono.

Esta aleación contiene Molibdeno y Cromo lo que le permite ser más resistente. El contenido de carbono es del 0.30% lo que le permite tener excelentes características frente a la soldadura. Esta aleación puede ser endurecida por tratamiento térmico. Es una aleación maquinable, los mejores resultados se obtienen en temperaturas normalizadas, la dureza del acero aumenta con los tratamientos térmicos, por lo que su maquinabilidad resulta más difícil después del tratamiento.

Respecto a sus aplicaciones es usada en estructuras tales como motores de aviación y tuberías soldadas.

## 2.5.3 Superaleaciones para uso a elevadas temperaturas

Una superaleación, o aleación de alto rendimiento, es una aleación que exhibe una excelente resistencia mecánica y a la fluencia (tendencia de los sólidos a moverse lentamente o deformarse bajo tensión), resistencia a altas temperaturas, estabilidad y una gran resistencia a la corrosión y la oxidación.

El comienzo de los estudios sistemáticos de aleaciones de alta temperatura se produce a finales de la década de 1930 ligado al desarrollo de aviones con motores de turbina de gas.

### 2.5.3.1 Nimonic 90

Esta es una aleación compuesta por Níquel (Ni), Cromo (Cr) y Cobalto (Co) reforzada por las adiciones de Titanio (Ti) y Aluminio (Al). La aleación se ha desarrollado para a través de tratamientos térmicos como el de maduración ser más resistente a la fluencia hasta temperaturas de 920 °C. Tiene una alta resistencia.

Esta aleación es utilizada en los alabes de turbina, discos, piezas forjadas, secciones de anillos y herramientas para trabajos en caliente.

### 2.5.3.2 Hastelloy B

Es una aleación resistente al agrietamiento por corrosión bajo tensiones, resistente a altas temperaturas, se puede endurecer por precipitación. No es bueno utilizar este material en presencia de sales férricas o cúpricas. Es un material resistente al ácido clorhídrico en todas las concentraciones y a temperaturas ambientes y altas.

Su principal aplicación es en los turbos de los motores a reacción.

Esta superaleación puede ser B1, B2 o B3.

**PROPIEDADES MECANICAS**

Propiedad	Unidades	SI
<b>Alargamiento</b>	%	<60
<b>Dureza Brinell</b>		100-230
<b>Impacto Izod</b>	J/m	42-100
<b>Módulo de Elasticidad</b>	GPa	180-220
<b>Resistencia a la Tracción</b>	MPa	600-980
<b>Elongación</b>	&	40

Tabla 2-3. Propiedades mecánicas Hastelloy

**2.5.3.3 Haynes 188**

Es una superaleación de Cobalto, Níquel, Cromo y Tungsteno. Es una aleación que combina una excelente resistencia a altas temperaturas, presenta una buena resistencia a la oxidación en ambientes sobre los 2000°F. Tiene excelente resistencia a la solidificación gaseosa. Además de poseer buenas características con la soldadura, puede utilizarse para trabajar en caliente. Es una aleación dúctil, se recomienda utilizarla para trabajo en frío.

Dentro de sus aplicaciones es una aleación en el ámbito militar y en la aviación comercial en las turbinas de gas de los motores o en las cámaras de combustión, también es usado en los ductos de transición y en los postquemadores.

Aleación	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente	Resistencia a la tensión a 1600°F
<b>Haynes 188</b>	960 MPa	420 MPa

Tabla 2-4. Propiedades mecánicas Haynes 188

**2.5.3 Materiales Compuestos**

La definición de material compuesto ha sufrido sucesivas revisiones para poder incorporar nuevos productos y mantener diferencias con los existentes que no se consideran dentro de esta definición. Se suele definir el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos (fibra + matriz) o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material. El material compuesto, tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material. Las propiedades que suelen ser de interés en estos materiales son:

- Resistencia Mecánica
- Rigidez
- Resistencia a corrosión
- Resistencia a la abrasión
- Peso
- Vida a fatiga
- Aislamiento térmico
- Aislamiento acústico

A continuación, se presentan las matrices:

Las materias primas más usadas como matrices en los materiales compuestos son las resinas epoxi y poliéster con gran variedad en sus propiedades mecánicas y químicas. Su propiedad más interesante, que les da nombre (termoestables), es su respuesta al calor ya que no se funden al calentarlas (a diferencia de los termoplásticos) si bien pierden propiedades de rigidez a partir de una cierta temperatura por lo que este valor (hasta 300° C para el epoxi y 110 para las de poliéster) representa una limitación real para su uso. La tabla I.4 recoge las principales propiedades de las resinas epoxi y poliéster. En la tabla siguiente se muestran las propiedades típicas de las resinas

Propiedad	Unidades	Resinas Epoxy	Resinas Poliéster
Densidad	Mg m <sup>-3</sup>	1.1-1.4	1.2-1.5
Módulo de Young	GPa	3-6	2-4,5
Coef. Poisson		0.38-0.4	0.37-0.39
Resist. Tracción	Mpa	35-100	40-90
Resist. Compresión	Mpa	100-200	90-250
Alarg. Rotura (Tracción)	%	1-6	2
Conduct. Térmica	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	0.1	0.2
Coef. dilatación	10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	60	100-200
Temp. distorsión	°C	50-300	50-110
Contracción Curado	%	1-2	4-8
Absor. de Agua (24 h a 20 °C)	%	0.1-0.4	0.1-0.3

Tabla 2-5. Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster usadas en los materiales compuestos.

A continuación, se presentan las fibras:

Las más usadas son las de carbono, vidrio, boro (en menor medida) y las orgánicas (registradas como Kevlar).

Las fibras de carbono son frágiles y muestran una recuperación elástica del 100% cuando se someten a esfuerzos inferiores a los de rotura. Lógicamente las propiedades transversales de las fibras son muy inferiores a las longitudinales. Uno de los mayores problemas de las fibras de carbono es la variabilidad de sus propiedades, condicionadas en gran medida por su longitud ya que al aumentar ésta aumenta también la posibilidad de existencia de un defecto.

En lo que se refiere a las fibras de vidrio, se han usado muchas combinaciones de vidrios minerales. Todas tienen como base sílice (Si O<sub>2</sub>) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. El vidrio E es el más usado por sus buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas y de desgaste. El C tiene una mayor resistencia a la corrosión química, pero es más caro y de menor resistencia. El S es también más caro que el E pero es más rígido y más resistente a la temperatura. En la tabla siguiente se muestran las propiedades típicas de las fibras.

Propiedades	Unidades	Carbono Base PAN Tipo I	Carbono Base PAN Tipo II	Vidrio E	Kevlar 49 Poliamida
Diámetro	μ m	7,0-9,7	7,6-8,6	8-14	11.9
Densidad	10 <sup>3</sup> kgm <sup>-3</sup>	1.95	1.75	2.56	1.45
Módulo de Young E <sub>11</sub>	GPa	390	250	76	125
Módulo de Young E <sub>22</sub>	GPa	12	20	76	
Resistencia a tracción	GPa	2.2	2.7	1.4-2.5 (típica) 3.5 (estirada recientemente)	2.8-3.6
Alargamiento de rotura	%	0,5	1.0	1.8 - 3.2	2.2 - 2.8
Coeficiente de dilatación térmica (0 a 100 °C)	10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup>	-0.5 a -1.2 (paralelo) 7-12 (radial)	-0.1 a -0.5 (paralelo) 7-12 (radial)	4.9	-2 (paralelo) 59 (radial)
Conductividad térmica (paralela al eje de la fibra)	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	105	24	1.04	0.04

Tabla 2-6. Propiedades de las fibras de Carbono, Vidrio y Kevlar 49 a 20° C

También cabe destacar el uso de un elemento conocido como estructura tipo sándwich, las cuales son estructuras que tienen en el núcleo la geometría de un panal de abeja para permitir minimizar la cantidad de material para alcanzar el peso mínimo y el costo mínimo de material, provee buenas propiedades de compresión y cortante. Puede tener fabricación de tipo:

- Metálico: Aluminio, acero inoxidable, Titanio
- No metálicos: Fibra de vidrio, Nomex, papel Kraft

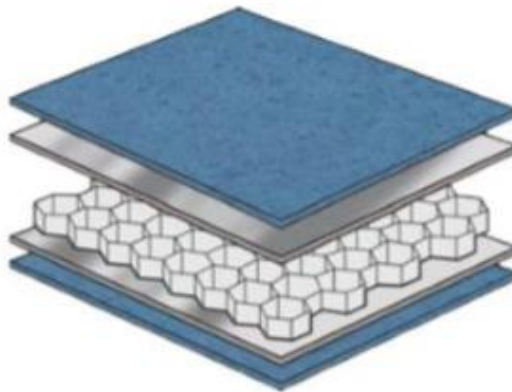


Figura 2-21. Representación de una estructura tipo sándwich

Esta estructura es usada en el campo aeroespacial para construir pisos de aviones, alas con misiles, cubiertas de ventilador, depósito de combustible, componentes del fuselaje entre otros debido a su excelente resistencia a la humedad y corrosión, en base a una relación de bajo peso y gran fuerza.

La utilización de los materiales compuestos ha significado un gran avance dentro de la industria aeroespacial, dados los beneficios que estos ofrecen como son: capacidad de moldeo, menor peso, menor necesidad de mantenimiento, resistencia a la corrosión y a la fatiga, aumentando su uso en las últimas décadas en la construcción de aeronaves. Esto se observa en la siguiente figura:

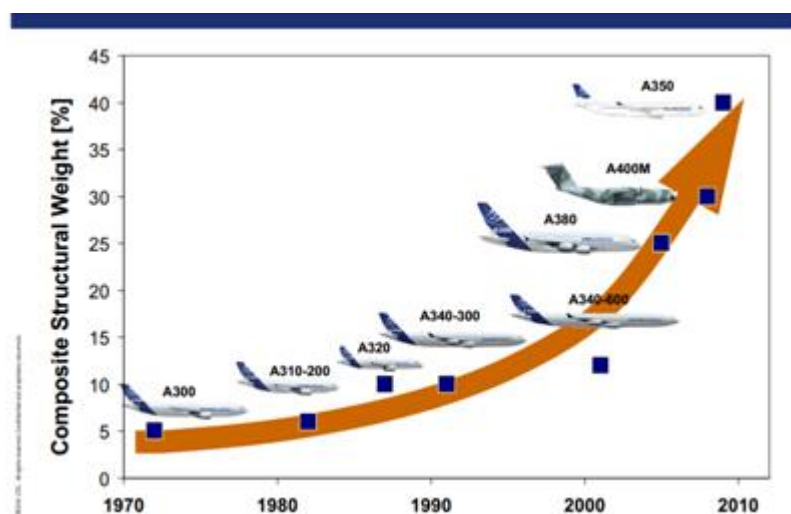


Figura 2-22. Aumento del uso de materiales compuestos en estructuras aeronáuticas

### 3 MODELOS DE REFERENCIA (REVISIÓN DE TRABAJOS ANTERIORES)

En el presente capítulo se presenta el estudio realizado de la bibliografía en el que presentamos modelos de referencia que hemos tomado para el cálculo de reparto de carga en las uniones y varias formulas empíricas para el cálculo de la flexibilidad de los remaches

#### 3.1 Cálculo de la flexibilidad de los remaches

Es importante hablar sobre la flexibilidad o rigidez (inversa) de los remaches ya que muchos modelos de cálculo de uniones remachadas introducen directamente el valor de flexibilidad a cortadura del remache, como es el caso de compañías como Boeing o Airbus.

El concepto de flexibilidad de los remaches fue introducido por Tate & Rosenfelt [5] en 1946, conocido como "perno o remache constante", debido a la necesidad de calcular el reparto de carga en las uniones remachadas con filas múltiples. Se define asumiendo una relación lineal entre el desplazamiento debido a la presencia del remache y la transferencia de carga. La flexibilidad del remache  $f$  se puede escribir como

$$f = \frac{1}{k} = \frac{\delta}{P_{LT}}$$

Donde  $k$  es la rigidez del remache,  $P_{LT}$  la carga transferida por el remache (definida en la figura siguiente), y  $\delta$  la contribución al desplazamiento total de la unión sin tener en cuenta el alargamiento  $PL / EA$  de las placas. Por lo tanto, la flexibilidad del remache incluye todos los fenómenos que afectan la flexibilidad de la unión (aparte de la flexibilidad de la placa) tales como la deformación del remache, la inclinación del remache y la deformación de los orificios de los remaches.

Para determinar la flexibilidad de los remaches de manera experimental, existen varios enfoques, de los cuales algunos se describen aquí.

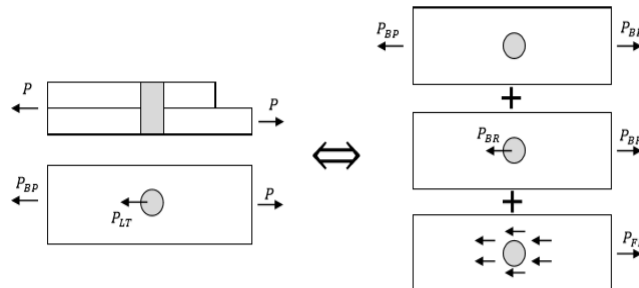


Figura 3-1. Fuerzas que actúan en una unión

Huth [2] realizó mediciones en el desplazamiento total  $\Delta l_{tot}$  entre los puntos A y B de un modelo de cortadura simple con dos elementos de fijación en la Figura siguiente, proporcionando valores promedio de  $\delta$

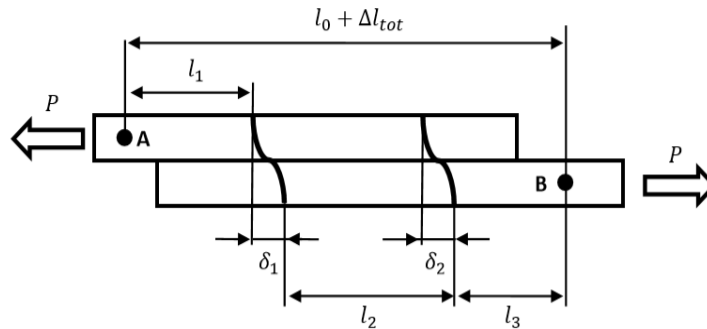


Figura 3-2. Encontrar la flexibilidad del remache (Huth, cortadura simple)

El desplazamiento total se puede escribir como

$$\Delta l_{tot} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3$$

A partir de esto  $\delta$  se convierte

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \Delta l_{tot} - \Delta l_{elast}$$

Donde, con el ancho de la placa  $w$ , el espesor  $t$ , y el módulo de Young  $E$

$$\Delta l_{elast} = \frac{P}{t_1 w E_1} \left( l_1 + \frac{l_2}{\left(\frac{t_2 E_2}{t_1 E_1}\right)} + \frac{l_3}{\left(1 + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1}\right)} \right)$$

Y la flexibilidad del remache sería:

$$f = \frac{1}{2} \frac{\delta_1 + \delta_2}{P/2} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{P}$$

Para el modelo de cortadura doble de la Figura siguiente, Huth [2] obtuvo la flexibilidad del remache midiendo el desplazamiento total entre los puntos A y B, que se escribe como

$$\Delta l_{tot} = \delta + \Delta l_1 + \Delta l_2$$



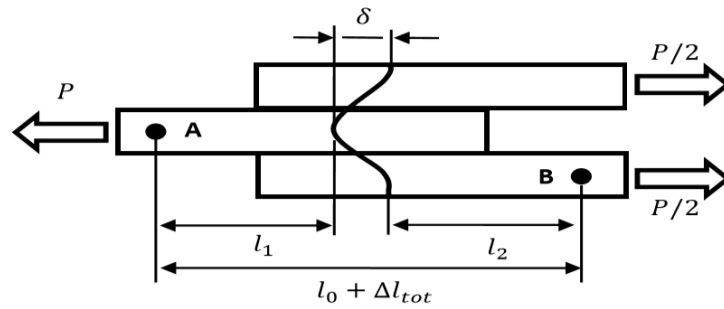


Figura 3-3. Modelo para encontrar la flexibilidad del remache (Huth, cortadura doble)

A partir de esto  $\delta$  se convierte

$$\delta = \Delta l_{tot} - (\Delta l_1 + \Delta l_2) = \Delta l_{tot} - \Delta l_{elast}$$

Donde

$$\Delta l_{elast} = \frac{P}{w} \left( \frac{l_1}{t_1 E_1} + \frac{l_2}{2t_2 E_2} \right)$$

Entonces encontramos que flexibilidad del remache es

$$f = \frac{\delta}{P}$$

La relación entre la fuerza y el desplazamiento es en realidad no lineal y, por lo tanto, hay varias formas de identificar la flexibilidad del remache (como una constante) a partir de datos experimentales. Jarfall describe algunos de estos métodos a fondo. La forma en que probablemente sea más representativa cuando se busca un modelo elástico para describir el comportamiento de una unión es la alternativa d de Jarfall, que también usó Huth. La figura siguiente muestra un boceto del comportamiento característico de una unión cuando se somete a una carga que aumenta cíclicamente, donde también se indica la flexibilidad del remache según lo obtenido por Huth.

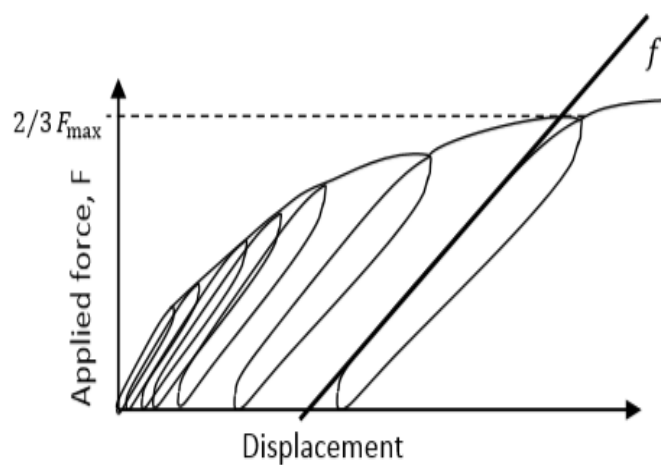


Figura 3-4. Gráfica relación fuerza-desplazamiento (Huth, cortadura doble)

### 3.2 Resumen de métodos para el cálculo de la flexibilidad de los remaches

Como se ve, hay varias maneras de encontrar la flexibilidad de los remaches a partir de las ecuaciones descritas (apartado 3.1) de forma experimental. Muchos han intentado, a través de pruebas con distintas geometrías y parámetros variables, crear métodos para describir el comportamiento de las uniones calculando la flexibilidad del remache como una función de estos parámetros. Estos incluyen fórmulas empíricas derivadas de tipos específicos de uniones y materiales por Grumman, Huth, Boeing, Tate & Rosenfeld (por mencionar algunos) y otros, utilizando un enfoque analítico. La gran variedad de métodos disponibles se debe al hecho de que han sido derivados usando diferentes simplificaciones y / o que se aplican a materiales específicos o tipos específicos de uniones

Los parámetros que afectan al comportamiento de las uniones incluyen tensión previa de remaches, ajuste del remache (holgura del taladro), calidad de la superficie del taladro, tipo de remache (avellanado, gota de sebo), calidad de la superficie incluyendo revestimientos o sellantes y más.

Dos configuraciones comunes ocurren cuando se hace referencia a las uniones y la flexibilidad de los remaches, es decir, los remaches en uniones de cortadura simple o cortadura doble, ilustrados en la Figura

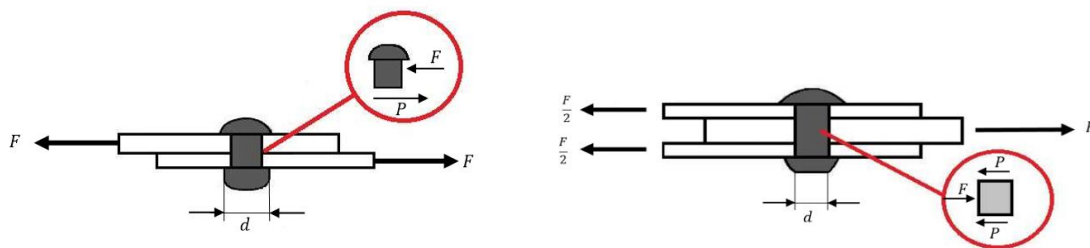


Figura 3-5. Remaches sometidos a cortadura simple y doble respectivamente.

En el caso de la cortadura simple, se presenta otro fenómeno físico debido a que el remache se inclina bajo ese tipo de carga, llamada flexión secundaria. Incluso con la carga externa libre del momento de flexión, la inclinación del cierre que se produce en la cortadura simple induce una flexión en la junta que tiene un alto impacto en la vida de fatiga de las juntas que ya hemos visto en el capítulo 2

Los métodos presentados por Grumman y Huth se usan con frecuencia en Saab Aerospace y además, los métodos de diseño de aeronaves del fabricante Airbus hacen uso también de la fórmula de Huth. Por otro lado, los métodos de Jarfall se utilizan en el diseño de aeronaves para el fabricante Boeing y también en Douglas Aerospace.

#### 3.2.1 Grumman

La ecuación de Grumman es una fórmula derivada empíricamente que fue presentada por Grumman Aerospace Corporation y fue utilizada durante el desarrollo de la aeronave Saab 37 Viggen.

$$f = \frac{(t_1 + t_2)^2}{E_r d} + 3,72 \left( \frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)$$

Donde  $E_r$  y  $d$  son el módulo de Young y el diámetro del remache respectivamente.

Las condiciones bajo las cuales se realizó la prueba, que eventualmente conducen a la fórmula de Grumman, no están claras. Nordin afirma que se derivó para materiales metálicos, para los cuales se pueden usar tanto pernos como remaches en las placas de unión. Sin embargo, se utilizó durante el desarrollo de un componente de material compuesto compuesto para el avión Viggen (cazabombardero sueco), que

generalmente no están unidos por remaches. Sin embargo, la fórmula no tiene en cuenta el apriete de los remaches, la holgura del orificio y si el remache está avellanado o no.

Esta fórmula solo se obtuvo para modelos de cortadura simple, quedando el uso restringido a modelos de cortadura simple.

### 3.2.2 Huth

La ecuación de Huth se basa en diferentes pruebas de tipos de juntas y materiales, y con ello ajustó una fórmula a las curvas de carga y desplazamiento para la flexibilidad de los remaches como

$$f = \left( \frac{t_1 + t_2}{2d} \right)^a \frac{b}{n} \left( \frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{nt_2 E_2} + \frac{1}{2t_1 E_r} + \frac{1}{2nt_2 E_r} \right)$$

donde **a**, **b** y **n** son parámetros definidos por el tipo de unión como se ve en la Tabla (x)

Cortadura simple	n=1
Cortadura doble	n=2
Uniones atornilladas	a=2/3 ; b=3.0
Uniones remachadas	a=2/5 ; b=2.2
Uniones grafito/epoxi	a=2/3 ; b=4.2

Tabla 3.1. Parámetros de la ecuación de Huth.

Esta fórmula es la que utiliza el fabricante de aviones Airbus para el diseño de uniones remachadas en estructuras aeronáuticas, la fórmula de Huth utiliza la suposición de un solo resorte para el cálculo de la flexibilidad de los remaches tanto en modelos de cortadura simple como cortadura doble.

Como es evidente, para el caso de cortadura doble, el remache está representado por dos elementos resorte, véase la Figura. Esto significa que, para utilizar los métodos de cálculo de flexibilidad con precisión, la flexibilidad resultante de los métodos debe escalarse por un factor de 2 de acuerdo con la ecuación(x) antes de ser insertado en el modelo (para el caso de doble cizallamiento).

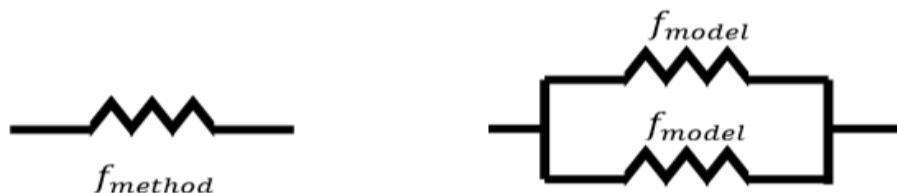


Figura 3-6. Representación de la flexibilidad del método y la flexibilidad del modelo

$$f_{modelo} = 2 \cdot f_{método} \leftrightarrow k_{modelo} = \frac{k_{método}}{2}$$

### 3.2.3 Boeing

Jarfall [4] desarrolló para Boeing dos ecuaciones, una de ellas de la cual se desconocen sus principios (Boeing 2) y otra (Boeing 1) en la que se introduce la flexión secundaria mediante una solución analítica de la que no se encuentra mucha información debido a la confidencialidad existente entre los grandes fabricantes de aeronaves.

Estas dos ecuaciones han sido utilizadas para el diseño uniones remachadas para aviones del mayor fabricante de EEUU (Boeing), y en general para cualquier diseño de uniones remachadas con el objetivo de la reparación, modificación o actualización marcada por manuales de mantenimiento de aeronaves y/o directivas de aeronavegabilidad.

#### Ecuación Boeing 1:

$$f = \frac{4(t_1 + t_2)}{5G_b A_b} + \frac{t_1^3 + 5t_1^2 t_2 + 5t_1 t_2^2 + t_2^3}{40E_b I_b} + \frac{t_1 + t_2}{t_1 t_2 E_b} + \frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{t_2 E_2}$$

#### Ecuación Boeing 2:

$$f = \frac{2\left(\frac{t_1}{d}\right)^{0.85}}{t_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{3}{8E_r} \right) + \frac{2\left(\frac{t_2}{d}\right)^{0.85}}{t_2} + \left( \frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_r} \right)$$

Donde  $E_r$  y  $d$  son el módulo de Young y el diámetro del remache respectivamente.

### 3.2.4 Comparación entre ecuaciones empíricas

Si miramos la Figura 3-7, está claro que estas ecuaciones predicen la flexibilidad del remache con una amplia variación de resultado. Esta variación puede deberse a características geométricas y físicas que se han descuidado las cuales normalmente se encuentran en los remaches, como pretensado de remaches, espaciado entre remaches, rugosidad superficial, uso de imprimador o sellante, etc. En algunos casos, la flexión secundaria, que es aplicable para remaches sometidos a cortadura simple, es contabilizado con factores empíricos, en otros casos no. Sin embargo, esto puede ser crucial en análisis posteriores para obtener resultados precisos en la aplicación que deseemos obtener y para limitar el uso de estas ecuaciones a modelos de cortadura doble o simple.

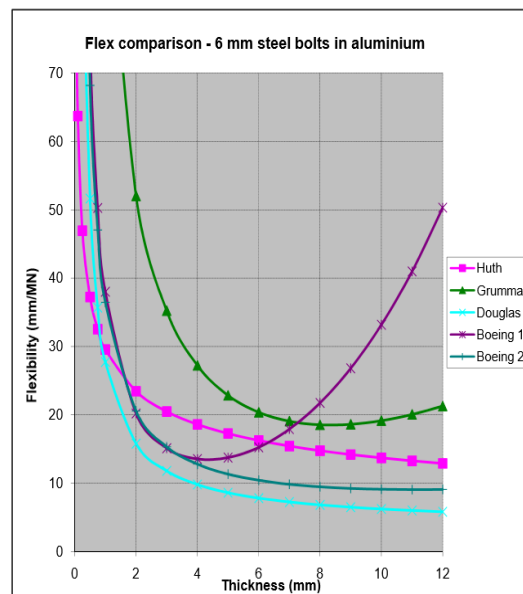


Figura 3-7. Comparación entre ecuaciones empíricas

### 3.3 Modelos de referencia para el cálculo del reparto de carga

En este apartado se exponen las consideraciones y resultados de los modelos de referencia escogidos para este proyecto. Se detalla el caso del modelo de Niu que ha sido nuestra referencia, y otros casos encontrados en la bibliografía que vienen a decir lo mismo que Niu.

#### 3.3.1 Métodos 1D

Los modelos 1D son métodos muy comúnmente utilizados para el modelado de uniones remachadas que incluyen varias filas de elementos de fijación, representando estos elementos y los componentes fijados como resortes. En este método la constante del resorte se identifica como la inversa de la flexibilidad del remache, es decir, la rigidez del remache.

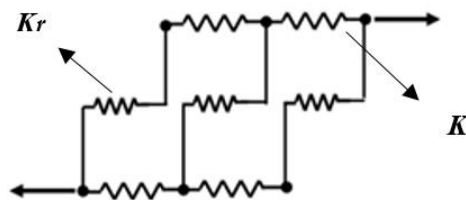


Figura 3-8. Modelo común 1D

En este modelo sólo se pueden tener en cuenta las variaciones en la dirección longitudinal, ya que la flexión se omite en este modelo. La aplicación del modelo a una unión completa supone que no hay variación entre las columnas de remaches y el resultado es el reparto de carga por fila de remaches. Esto nos permite realizar muchas simplificaciones como por ejemplo no incluir la flexión, haciendo muy atractivo el modelo debido a su simpleza y bajos costos de cálculo.

Además, es muy común que las uniones del fuselaje de un avión consistan en un conjunto de columnas de elementos de sujeción iguales, que en muchos casos están sujetos a fuerzas principalmente en la dirección longitudinal. Aun así, es muy común en enfoques de ingeniería asumir que las fuerzas cortantes tienen el mismo efecto en los repartos de carga que las fuerzas longitudinales. Por lo que, en muchas ocasiones el modelo 1D es una aproximación a menudo aplicable.

### 3.4 Modelo de Michael Chun-Yung Niu (1D)

Niu en su modelo considera que la mayoría del daño por fatiga en la unión ocurre bajo condiciones de carga para la cual, los remaches se comportan como miembros elásticos lineales, es decir, siguiendo una relación lineal entre tensión y deformación.

Incluso para estructuras muy simples, el tratamiento de los remaches como miembros flexibles da como resultado un cálculo bastante elaborado que justifican el uso del análisis de modelado de elementos finitos. Antes de simular el modelado estructural, se calcula la constante de resorte del remache que se puede convertir a un miembro de viga estructural equivalente mediante las siguientes ecuaciones hipotéticas derivadas del trabajo de Tate & Rosenfeld [5] en 1946:

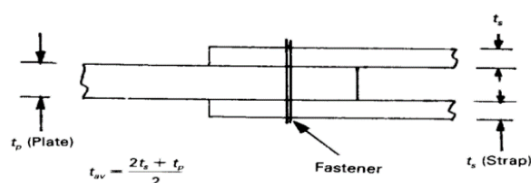


Figura 3-9. Cálculo del espesor medio en la unión

Dependiendo de qué tipo de materiales de chapa y remaches estemos utilizando en la unión calcularemos la flexibilidad del remache de una forma u otra:

- Para remaches y chapas de acero:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.12 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 1 \right\}$$

- Para remaches y chapas de aluminio es la misma ecuación que la anterior.
- Para remaches de acero y chapas de aluminio:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.12 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 1.87 \right\}$$

- Para remaches, adherentes exteriores de acero y adherente central de aluminio:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.12 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 1.43 \right\}$$

- Para remaches, adherente central de aluminio y adherente central de acero:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.12 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 0.84 \right\}$$

- Para remaches de titanio y chapas de aluminio:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.06 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 1.242 \right\}$$

- Para remaches, adherentes superiores de titanio y adherente central de aluminio:

$$f = \frac{8}{t_m E_r} \left\{ 0.13 \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \left[ 2.06 + \left( \frac{t_m}{d} \right)^2 \right] + 1.1125 \right\}$$

Donde  $t_m$  es el espesor medio que responde a la ecuación de la figura(x),  $E_r$  es el módulo de Young del remache y  $d$  es el diámetro del remache.

Por lo que con estas ecuaciones obtendríamos la flexibilidad del remache, y solo bastaría con transformarlo a rigidez (sabiendo que ésta es la inversa de la flexibilidad) para obtener la constante del resorte que aplica Niu en su modelo.

$$k = \frac{1}{f}$$

Niu en su trabajo expresa la necesidad de realizar un modelo simplificado de elementos finitos como el de la siguiente figura.

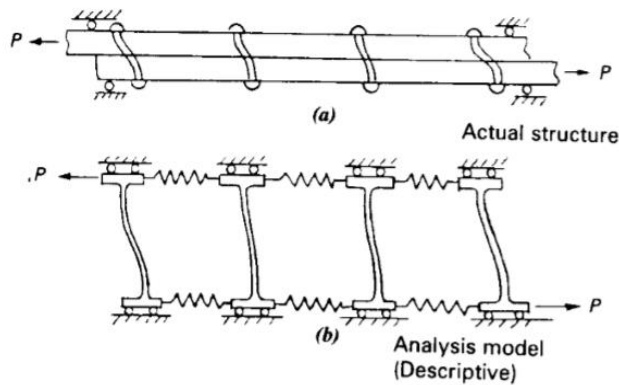


Figura 3-10. Modelo simplificado de elementos finitos de una unión remachada con filas de 4 remaches

Como vemos en este modelo simplificado 1D Niu sólo tiene en cuenta las fuerzas longitudinales (en los adherentes) a las que esté sometida la unión, y en el que se omite, por tanto, la flexión. Este aspecto está justificado según el ámbito de aplicación porque como hemos visto, en muchos casos las uniones del fuselaje de un avión están sujetas a un conjunto de fuerzas en la dirección longitudinal las cuales, en algunos casos son las más críticas. También se observa en el caso de uniones a solape doble que se soluciona el problema de la flexión secundaria, por lo que no se tendría que tener en cuenta la flexión secundaria. Además de que, cuando exista más de un remache en una fila (en la dirección axial o normal a la carga) las constantes de rigidez del resorte en esa fila pueden simplemente sumarse y considerarse como un único remache.

Sin embargo, en el caso de uniones en las que hay demasiadas filas de remaches para que cualquier análisis los incluya a todos es necesario agrupar dos o más filas juntas como una fila o remache. Es aconsejable, como los remaches exteriores son los más cargados, hacer la agrupación mínima en los extremos y la mayoría en la zona central como podemos ver en la figura 3-11

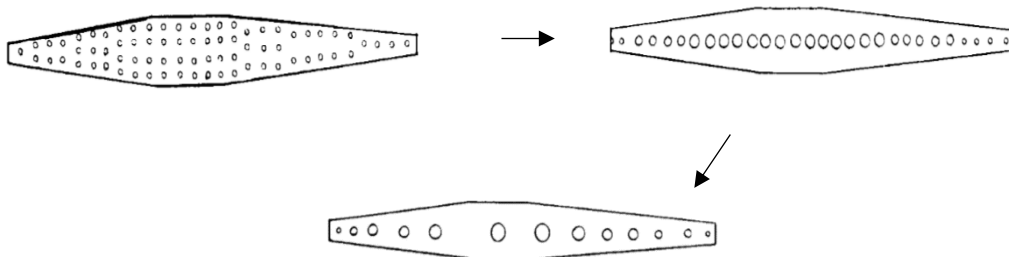


Figura 3-11. Unión inicial, conversión a una única fila de remaches y agrupación de los remaches para conseguir el propósito del modelo respectivamente

### 3.4.1 Uniones balanceadas

Se define una unión balanceada aquella en la que la relación entre espesor de adherentes y módulo de Young es la siguiente:

$$E_1 t_1 = E_2 t_2$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes

Es decir, la rigidez a tracción del adherente superior es igual a la rigidez a tracción del adherente inferior.

A través de las figuras siguientes, Niu[1] muestra el reparto de carga para distintos diseños de uniones típicas en la industria aeronáutica que pueden ser utilizados como guía con el propósito de realizar el diseño preliminar de uniones remachadas futuras.

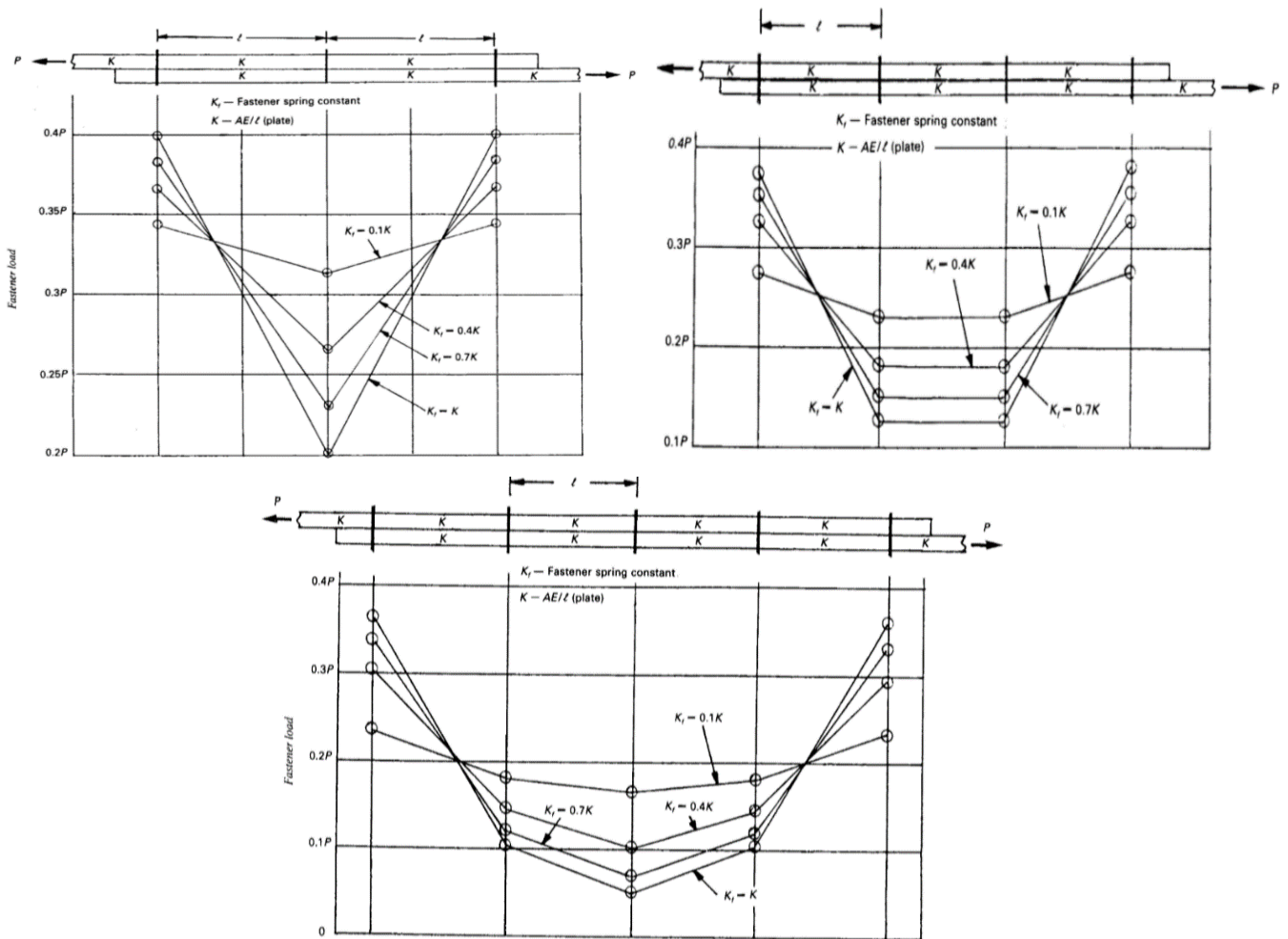


Figura 3-12. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones balanceadas de 3,4 y 5 remaches respectivamente

Se observa en las siguientes figuras la variación del reparto de carga por remache en uniones de 3,4 y 5 filas de remaches debido a la variación de la constante de resorte ( $K_f$  en la figura) que representan a estos en el modelo de análisis de estas uniones balanceadas, es decir, vemos cómo cambia el reparto de carga conforme varía de la rigidez del remache.

Si los condicionantes de rigidez global de la estructura lo permiten, la elección de remaches con valores de rigidez comparativamente menores que las de las piezas a unir, tiende a igualar la carga transferida por las diferentes filas de remaches. En cualquier caso, como se puede apreciar, la diferencia de valores de rigidez entre remaches y piezas a unir influye significativamente en la distribución de tensiones transferidas en cada remache.



También, se puede sacar una conclusión consistente en cuanto a lo expuesto en la motivación de este proyecto, donde veíamos que encontramos figuras afirmando que a medida que el remache se puede considerar infinitamente rígido observaremos un reparto de carga en el que dicha carga sólo será transferida por los remaches de los extremos de la unión y los remaches centrales no transferirán carga ninguna y, a medida que disminuye la rigidez de los remaches (haciéndose más flexibles) el reparto de carga por remache se vuelve uniforme (equitativo), manifestando de esta forma la dependencia del reparto de carga con la rigidez de los remaches en uniones balanceadas asumiendo todas las consideraciones y simplificaciones de este modelo propuesto por Niu.

### 3.4.2 Uniones no balanceadas

Se define una unión no balanceada aquella en la que la relación entre espesor de adherentes y módulo de Young es la siguiente:

$$E_1 t_1 \neq E_2 t_2$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes

Es decir, los valores de rigideces a tracción de los adherentes superior e inferior son distintos pero iguales en toda la unión y provocan cambios en el reparto de carga como se puede observar en la figura 3-13 y 3-14

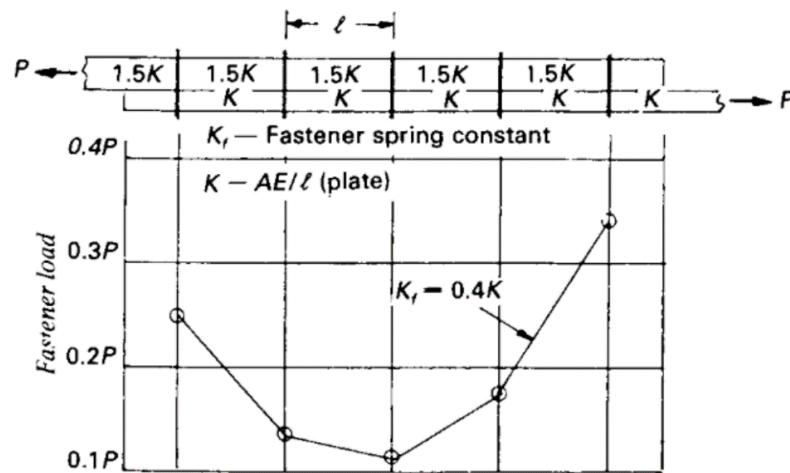


Figura 3-13. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones no balanceadas de 5 remaches

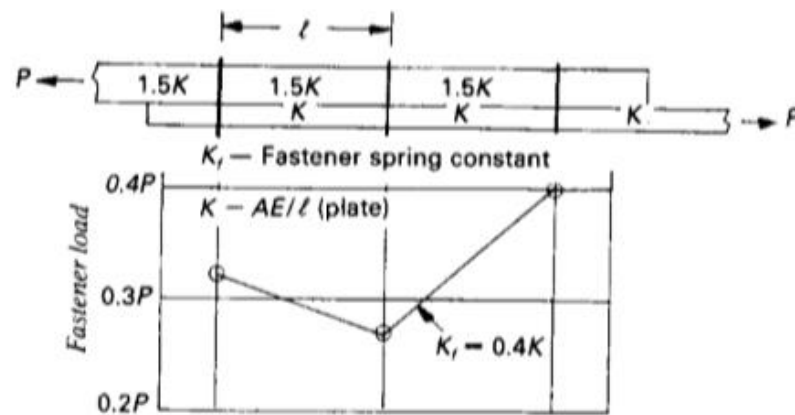


Figura 3-14. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones no balanceadas de 3 remaches

Se aprecia que a medida que aumenta la rigidez de las placas de unión (aumentan de espesor) provoca una disminución de la constante de resorte relativa que representa al remache respecto a estas (no se varía la rigidez del remache), lo cual no produce el mismo resultado que en las uniones balanceadas. Lo que ocurre es que, al disminuir la rigidez de los remaches, el remache nº 5 se comienza a sobrecargar respecto al resto de remaches convirtiéndose en el remache crítico de la unión, por el cual tendremos más probabilidades de que se pueda producir el fallo de este si el desbalanceo para una misma carga aplicada hace que este remache se sobrecargue por encima de su tensión admisible, provocando el fallo del remache y, por tanto, de la unión.

Entonces vemos, que de acuerdo con Niu, es importante tener en cuenta el grado desbalanceo de la unión ya que va a modificar el reparto de carga de manera considerable y, por tanto, puede ocurrir que a una tensión menor se produzca el fallo de la unión antes de lo que se preveía.

Destacar que, actualmente son frecuentes las uniones entre distintos tipos de metal o incluso entre metal-composite por lo que el grado de desbalanceo se debe tener muy en cuenta, ya que modificará el reparto de carga convirtiendo al remache más extremo de la zona de solape como el remache más crítico, pudiendo sobrecargarse por encima de su tensión admisible y por tanto provocando el fallo catastrófico de la unión.

### 3.4.3 Uniones escalonadas

Se define una unión escalonada como aquella en la que la rigidez a tracción de los adherentes varía a lo largo de toda la zona de solape, provocando cambios constantes en cuanto a rigidez y afectando al reparto de carga de manera que, se vuelve equitativo para cada remache independientemente del valor de rigidez a cortadura que tenga dicho remache.

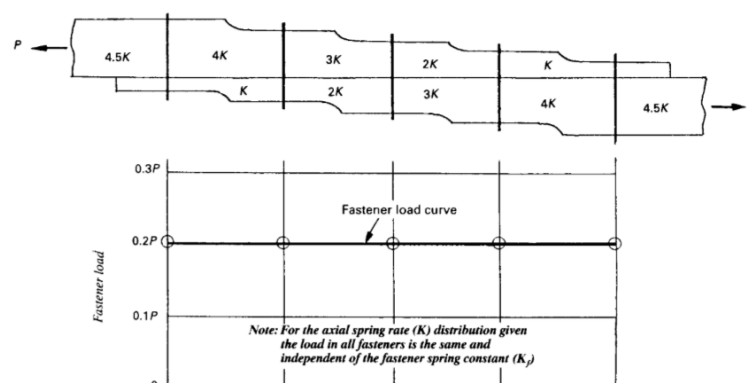


Figura 3-15. Repartos de carga según los modelos de Niu para uniones escalonadas de 5 remaches

Puesto que ya se ha entrado en detalles sobre este tipo de uniones en el capítulo 2, lo que podemos observar en la figura 3-15 es que un cuidadoso escalonado de las piezas a unir suponiendo en la práctica una reducción progresiva de la rigidez total de la pieza, puede generar una unión con más de cuatro filas de remaches en las que todos transmiten el mismo nivel de carga. Esta situación es deseable, puesto que todos los remaches están igualmente solicitados, pero lógicamente encarece la ejecución de la unión.

### 3.5 Efecto del espesor de placas en el reparto de carga (S. Sathiya Naarayan et al)

Para estudiar el efecto del espesor de la placa en la distribución de carga de remaches, S. Sathiya Naarayan et al realizó un estudio paramétrico para unión remachada metal-metal. En este estudio, el espesor de la placa y la longitud del remache y otras dimensiones se cambian. La carga fue la variable que se mantuvo. El resultado del estudio se muestra en la Fig. 3-16 en el que se observa la carga que pasa por cada fila de remaches (%) para los tres espesores de placa distintos.

Se puede observar que la no uniformidad de la distribución del reparto de carga en los remaches disminuye a medida que aumenta el espesor de la placa, esto es debido a que al aumentar el espesor de las placas provoca un aumento de la rigidez del material viéndose los remaches como más flexibles respecto a estos.

Esto concuerda con las observaciones en la literatura del mismo Niu[1] afirmando que a medida que disminuye la relación entre la rigidez del remache y la rigidez de la placa, se produce una distribución de carga de remaches casi uniforme

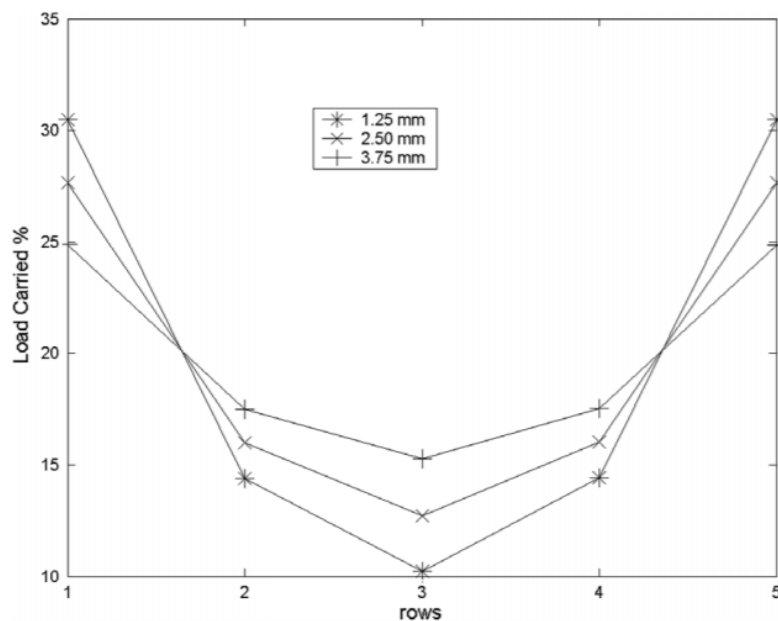


Figura 3-16. Reparto de carga (%) para distintos espesores de placas

En el caso de una unión composite-composite, la distribución de la carga de remaches depende de la rigidez efectiva del compuesto basándose en el esquema de laminación. La rigidez efectiva del laminado en la dirección de carga ( $E_x$ ) y perpendicular a la dirección de carga ( $E_y$ ) se encuentran usando las siguientes ecuaciones[9]:

$$E_x = \frac{1}{t A'_{11}} \quad E_y = \frac{1}{t A'_{22}}$$

donde 't' es el espesor del laminado,  $A'_{11}$  y  $A'_{22}$  son los primeros y segundos elementos diagonales de la inversa de la matriz de rigidez.

### 3.6 Efecto del escalonado en el reparto de carga

En este caso se muestra el estudio del reparto de carga en uniones remachadas de aleaciones ligeras por F.Vogt publicado en 1947 por The National Advisory Comitte For Aeronautics.

En este estudio se muestra la influencia del escalonamiento de la unión en relación con el reparto de carga, lo que viene a decir lo mismo que Niu afirmando de nuevo que un cuidadoso escalonado de las piezas a unir suponiendo en la práctica una reducción progresiva de la rigidez total de la pieza puede generar una unión con más de cuatro filas de remaches en las que todos transmiten el mismo nivel de carga.

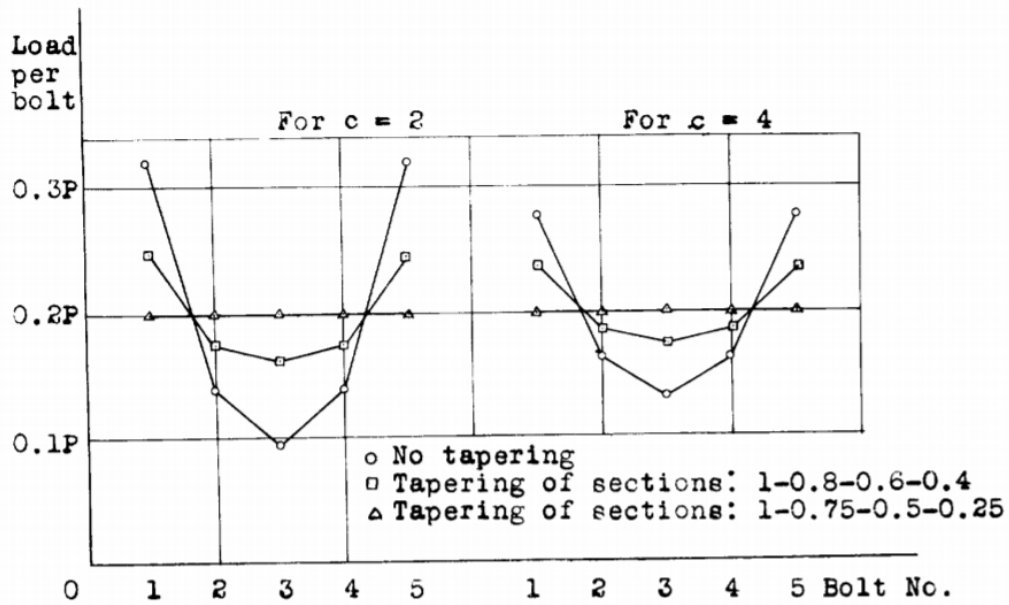


Figura 3-15. Influencia del aumento del escalonamiento uniones de 5 remaches

Se puede afirmar que esta situación es deseable, puesto que todos los remaches están igualmente solicitados, pero lógicamente como ya sabemos, encarece la ejecución de la unión.

## 4 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo vamos a describir el modelo de elementos finitos desarrollado, haciendo hincapié en las simplificaciones, la geometría, tipo de elementos utilizados, condiciones de carga y en general, todos aquellos factores que han influido en nuestro modelo

### 4.1 Introducción al método de elementos finitos.

Puesto que no es el objetivo de este proyecto no se va a explicar aquí con detenimiento el funcionamiento de este método, pero sí hacer hincapié en sus funciones principales, ya que hasta el presente trabajo fin de grado no había utilizado un programa de elementos finitos. El Método de los Elementos Finitos (FEM) es una de las herramientas más potentes usadas en la actualidad para la resolución numérica de un gran número de problemas de ingeniería. Este método es aplicable en una gran variedad de problemas, como pueden ser análisis estructurales, comportamiento mecánico, problemas de transferencia de calor, electromagnéticos, etc.

Mediante FEM se realiza una aproximación para obtener la solución de problemas continuos, basada en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. A esta transformación se le denomina discretización del modelo.

El continuo se divide en un número finito de partes denominados elementos. Las propiedades del material y sus ecuaciones constitutivas son consideradas sobre dichos elementos, los cuales poseen unos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las “funciones de interpolación” o “funciones de forma”. Estas funciones definen de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito, expresado en términos de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Es, por tanto, una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

La relación entre estos elementos, considerando debidamente las condiciones de contorno (cargas y restricciones), da lugar a un sistema de ecuaciones cuya solución va a permitir obtener resultados mediante los cuales se va a conocer el comportamiento aproximado del modelo continuo.

En resumen, para un problema mecánico continuo podemos ilustrar cómo funciona el método de elementos finitos en un ejemplo lineal. El problema puede describirse matemáticamente con ecuaciones diferenciales parciales que tienen un número infinito de grados de libertad. Un gran modelo se puede describir como una cantidad de ecuaciones diferenciales parciales, estas ecuaciones a menudo no se pueden resolver analíticamente y, por lo que, tienen que resolverse, por ejemplo, con el método de elementos finitos. El número de grados de libertad en el modelo se reduce al aplicar FEM al dividir el modelo en elementos finitos (discretización), conduciendo a una simplificación del modelo. Los elementos están conectados entre sí por una serie de puntos (nodos) y cada nodo en el modelo tiene propiedades elásticas conocidas. Esto conduce a un sistema lineal de ecuaciones que describe la relación de fuerza y desplazamiento que ahora se puede resolver de forma mucho más simple.

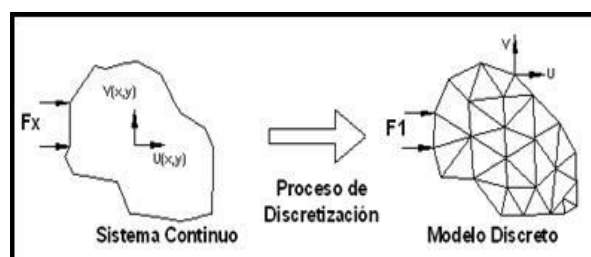


Figura 4-1. Descripción gráfica de la discretización en FEM

El método de elementos finitos del código ANSYS puede dividirse en tres etapas:

- Preproceso. Preparación del modelo para el cálculo. En esta etapa se realizan las operaciones de:
  - Representación de la geometría del modelo.
  - Selección de las propiedades de los materiales.
  - Aplicación de cargas exteriores y condiciones de contorno.
  - Discretización del modelo en elementos finitos.
- Resolución. Etapa en la que se realizan todos los cálculos y se generan las soluciones. En ella se realizan las operaciones de:
  - Selección del tipo de cálculo a realizar.
  - Configuración de los parámetros de cálculo, intervalos de tiempo y número de iteraciones.
  - Transferencia de las cargas al modelo, generación de funciones de forma, ensamblaje de la matriz de rigidez, resolución de sistemas de ecuaciones y obtención de la solución.
- Postproceso. En esta etapa se realizará la representación gráfica de los resultados, así como la obtención de resultados indirectos operando las soluciones del modelo.

## 4.2 Resumen de modelado de uniones en 2D y configuraciones analizadas.

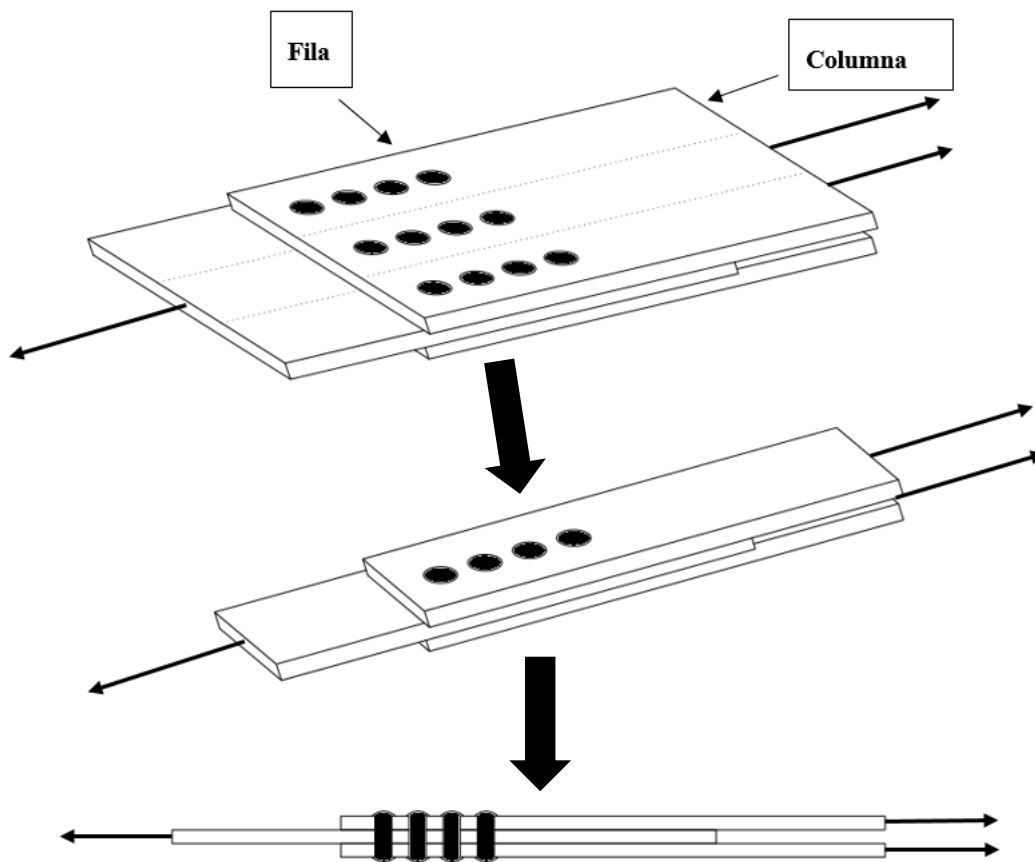
En este caso, se ha generado un modelo FEM con un nivel de detalle superior a nuestro modelo de referencia "Niu"[1], con el objetivo de reproducir sus resultados y obtener unos modelos capaces de determinar el reparto de carga de la unión con un bajo coste computacional, pero con la ventaja de poder considerar más factores que el modelo 1D y tener la posibilidad de reproducir los resultados presentados en los gráficos de los estudios de Niu[1] y otros presentados en la bibliografía, ya que no se pone a disposición del lector de una herramienta práctica para realizar el cálculo del reparto de carga. Se ha desarrollado una serie de configuraciones en la que ambas placas son del mismo material o distintos (variando la rigidez de unos de los adherentes) y en la zona del modelo que se configura como remaches, se varía el módulo de Young de estos (en algunos casos) provocando así cambios en la rigidez de los remaches, haciendo posible de esta manera la consideración de numerosos materiales como el material de los remaches, y por tanto pudiendo analizar por ejemplo, qué ocurre cuando varía la rigidez del remache.

Se va a realizar un análisis por FEM elástico-lineal, éste es el análisis más comúnmente utilizado cuando los desplazamientos son pequeños y las tensiones están por debajo del límite elástico de los materiales. Cuando se deben simular cargas de fallo, donde el material se deforma plásticamente, se deben usar datos de materiales no lineales en el análisis del modelo, lo que conduce a cálculos más complejos. El contacto es otro problema no lineal que hace que la simulación sea más compleja

En nuestro caso, se ha desarrollado un modelo 2D para reproducir como sabemos, los resultados mostrados por Niu[1] en su trabajo y tener una herramienta práctica para determinar el reparto de carga a la hora de realizar el diseño de uniones remachadas en estructuras aeronáuticas, además de otras aplicaciones como el diseño de utillaje para realizar ensayos experimentales como ensayos a fatiga de grandes componentes o piezas en general.

En contraste con un modelo 1D, un modelado 2D de una unión remachada permite tener en cuenta las variaciones en las propiedades de los remaches en las columnas, situaciones en las que un conjunto de uniones grandes se ha reforzado con otras placas (variación del espesor de la unión) añadiéndole remaches adicionales de diferentes dimensiones o analizar situaciones en las que tengamos distintos diámetros de remache simplemente.

Una descripción breve de la simplificación realizada para el modelado 2D se resume en la siguiente figura:



*Figura 4-2. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo 3D a un modelo 2D*

En resumen, se han realizado los siguientes modelos:

1. Modelo 2D de una unión a solape doble
  - 1.1 Para 3 remaches
  - 1.2 Para 4 remaches
  - 1.3 Para 5 remaches
2. Modelo 2D de una unión escalonada
  - 2.1 Para 5 remaches

Para el caso de la unión escalonada como ya veremos, sólo se modela para una unión general de 5 remaches, ya que obtendremos los mismos resultados para una unión de 3 y 4 remaches, por consiguiente, sólo habría que modificar el modelo que se incluye en el anexo para considerar uniones escalonadas con cualquier otro número de remaches.

Para mostrar lo que se representa en los distintos casos del estudio de Niu[1], en nuestras uniones se varía:

1. Variación de la rigidez del remache (en uniones balanceadas) únicamente variando su módulo de Young, sin entrar en cálculos de rigidez del remache mediante fórmulas empíricas.
2. Variación de la rigidez de un adherente ( $t_2$ ) modificando su espesor y provocando el desbalanceo de la unión.
3. Cálculos para 3, 4 y 5 filas de remaches teniendo en cuenta los anteriores puntos

### 4.3 Descripción del modelo de unión a solape doble

En este apartado vamos a describir las características geométricas, mallado, generales y tipo de estudio del modelo 2D de una unión a solape doble

#### 4.3.1 Descripción general

En total para cada modelo se han empleado los siguientes números de elementos, nodos y grados de libertad como se muestra en la siguiente tabla:

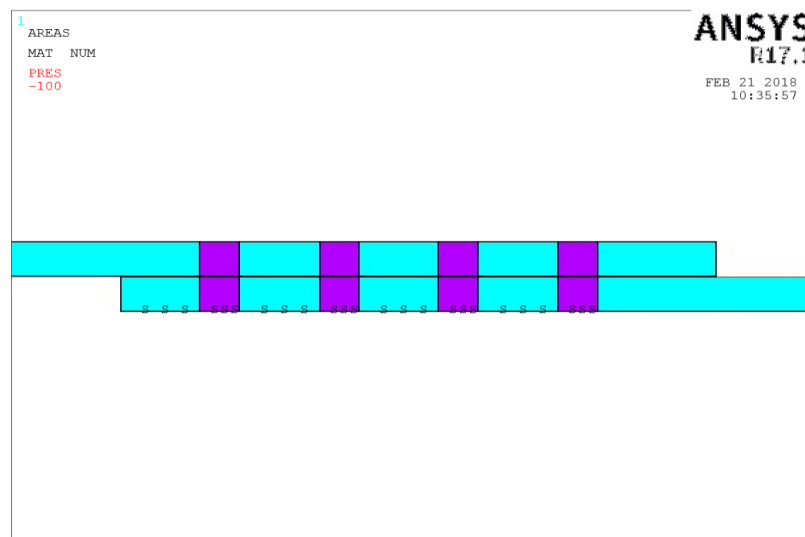
<i>Características generales modelo 2D unión solape doble</i>			
nº de remaches	nº de elementos	nº nodos	nº grados de libertad
3 Remaches	80600	82847	165694
4 Remaches	80800	83102	166204
5 Remaches	81000	83357	166714

*Tabla 4-1. Características generales de la unión a solape doble*

Se ha utilizado un tamaño de elemento de  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}$  dando lugar a un tiempo de resolución de 10 segundos en un pc convencional. Este tamaño de elemento es debido al tamaño de malla que se ha escogido, por lo que en el apartado de análisis de convergencia se detallará porque se ha escogido este tamaño de malla y se estará justificando el tamaño de elemento a su vez.

#### 4.3.2 Geometría y construcción del modelo

Es preciso detallar que, en un principio se realizó un modelo 2D como se presenta en la figura 4-3 en el que el remache cubría toda la longitud de los adherentes.



*Figura 4-3. Descripción gráfica modelo inicial 2D*

Surgieron dificultades a la hora del cálculo de los resultados, ya que no representaban lo que ocurre en la realidad, y por tanto este modelo era inconsistente. Este problema era debido a que al ser un modelo 2D la carga no circula por el adherente debido a que los remaches no son circulares comportándose en una vista 3D como un elemento que cubre todo el ancho del adherente impidiendo que la carga circule, lo cual, provocaba que al calcular la resultante de carga en cada remache el modelo no reflejaba lo que muestra la bibliografía.

Por esto se pasó a realizar un modelo aún más simplificado, que permite el paso de la carga a través de todo el adherente y de esta forma se consigue representar lo que ocurre en la realidad. Esto consiste en modelar los adherentes como un único material y considerar los remaches como una zona entre adherentes de espesor  $t_3$ , que tendrá un espesor aproximadamente 10 veces más pequeño que los adherentes.



Esto lo podemos observar en las figuras 4-4 y 4-5, donde vemos un esquema generalizado de la unión para 4 remaches y una figura de la estructura del modelo de FEM generado respectivamente. La estructura analizada se compone de 3 placas unidas a través de 3,4 y 5 remaches, pero únicamente se presentará gráficamente el de 4 remaches por simpleza, debido a que son prácticamente iguales los 3 modelos, cambiando sólo el número de remaches por los que están unidas las placas.

A continuación, se presenta para cada modelo en la tabla 4-1 sus medidas geométricas para conocer numéricamente las características geométricas de cada modelo y se define cada parámetro para identificarlos.

<i>Características geométricas unión solape doble 2D</i>			
Medidas (mm)	3 remaches	4 remaches	5 remaches
$l_1$	100	100	100
$l_2$	15	10	5
$l_3$	7,5	5	5
$l_s$	60	60	55
$t_1$	4	4	4
$t_2$	4	4	4
$t_3$	0,4	0,4	0,4
$d$	5	5	5

Tabla 4-2. Características geométricas de la unión a solape doble

Se define entonces cada parámetro:

- $l_1$  , longitud de los adherentes
- $l_2$  , distancia entre remaches a lo largo de la zona de solape
- $l_3$  , distancia remaches del extremo izquierdo al borde del adherente
- $l_s$  , longitud de la zona de solape
- $t_1$  , espesor de adherente superior e inferior
- $t_2$  , espesor de adherente central
- $t_3$  , espesor de la zona modelada como los remaches
- $d$  , diámetro de los remaches

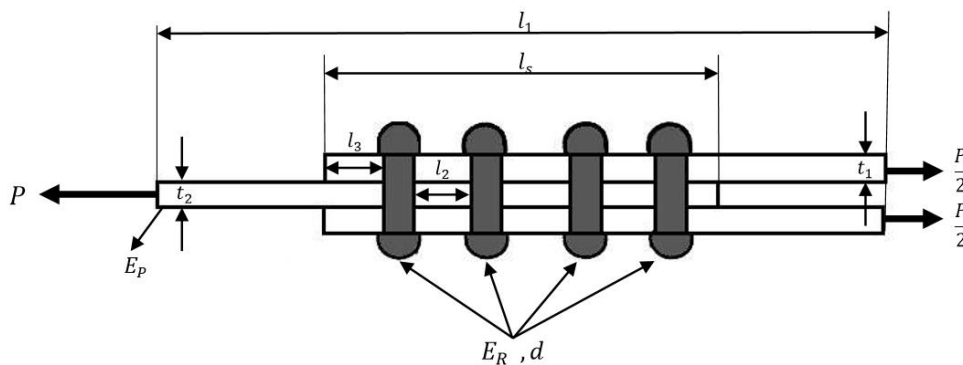


Figura 4-4. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo 3D a solape doble a un modelo 2D

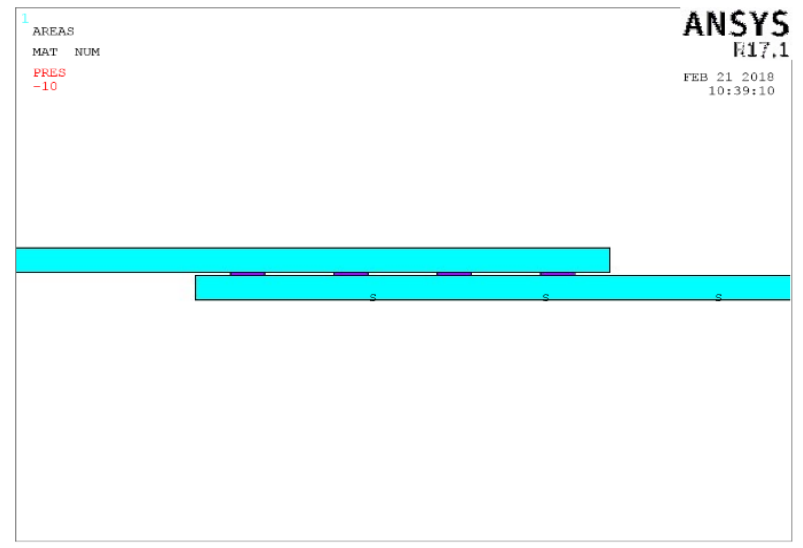


Figura 4-5. Modelo de FEM generado finalmente

Los códigos de ANSYS para realizar cada modelo se encuentran en el apartado 1.1 del Anexo I. Como vemos, se trata de un modelo bastante simplificado de una unión remachada dando la posibilidad de simular numerosos materiales como adherentes y remaches.

Destacar que en el modelo de FEM de la figura 4-5 tiene realizado un zoom para poder visualizar con claridad las zonas modeladas como los remaches (violeta) y no se visualiza la zona de los adherentes totalmente completa.

#### 4.3.3 Carga y condiciones de contorno

Se definen las condiciones de carga y contorno aplicada al modelo de elementos finitos que aparece en la figura 4-6. Como vemos, se aplica sobre 2 líneas un comando que genera simetría mediante un apoyo de bolas (empotrado deslizante) que permite el desplazamiento tangencial al plano e impidiendo el desplazamiento vertical a éste, dando lugar a lo que sería una unión a solape doble y disminuyendo el tiempo de generación del modelo geométrico. Se hablará sobre la simetría específicamente en el apartado 4.3.7 de ordenes especiales utilizadas.

Por último, la carga aplicada al modelo es de  $-10 \text{ MPa}$  (tracción en ANSYS) sobre el borde vertical derecho del adherente central (línea roja en la figura).

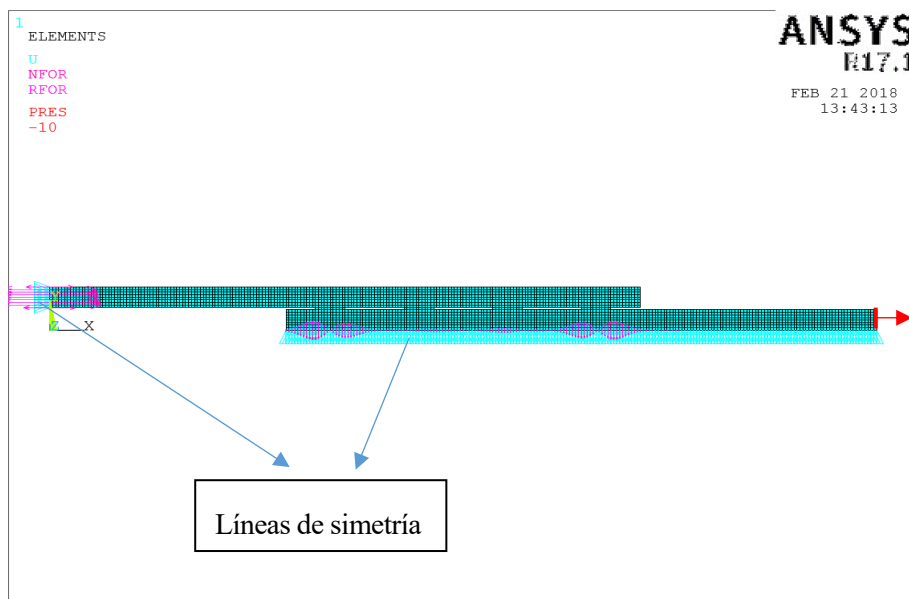


Figura 4-6. Modelo de FEM con condiciones de contorno

Es preciso reseñar que la malla utilizada para mostrar las condiciones de carga y contorno no es la utilizada para el análisis y resultados de este modelo, eligiéndose esta malla por la claridad de representación de la imagen.

#### 4.3.4 Mallado y Análisis de Convergencia del mallado

El mallado utilizado es de un tamaño de 0.1 mm en todo el modelo dando lugar a elementos cuadrados de tamaño 0,1 x 0,1 mm. En las siguientes figuras se muestra el mallado y un zoom del mallado sobre la zona de los remaches (color violeta).

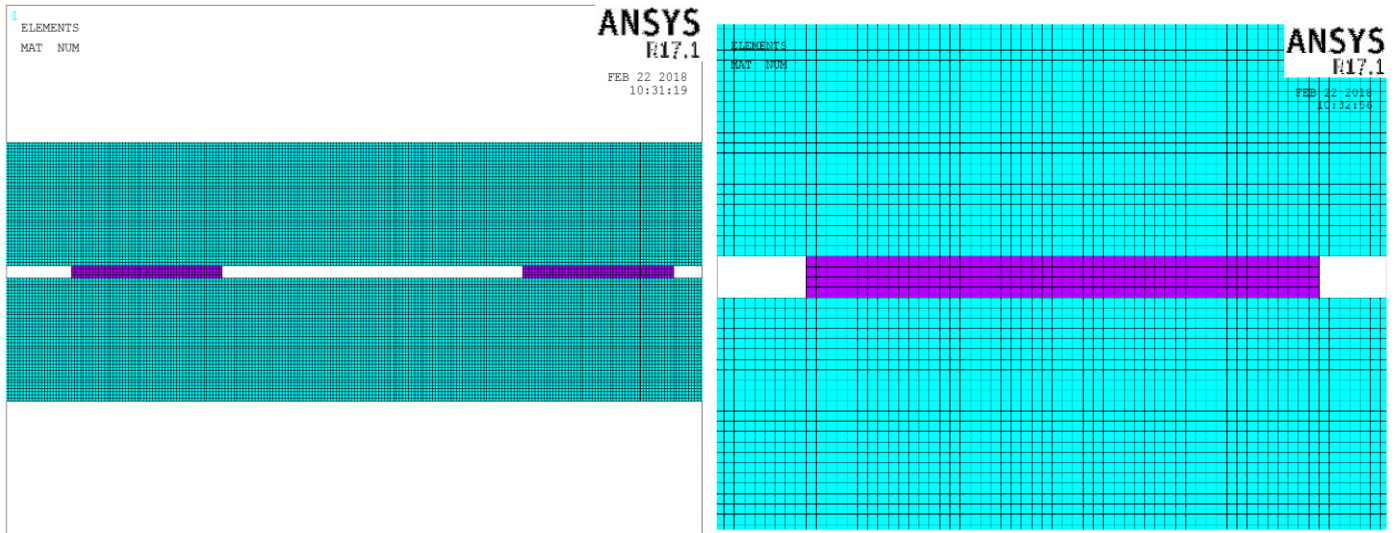


Figura 4-7. Mallado del modelo con diferentes grados de zoom

A la hora de hacer un correcto análisis de convergencia siempre se tiene en cuenta un equilibrio entre la precisión requerida y los tiempos de cálculo razonables al modelar con FEM. Para alcanzar la convergencia, se necesita una buena cantidad de elementos y un número suficiente de iteraciones.

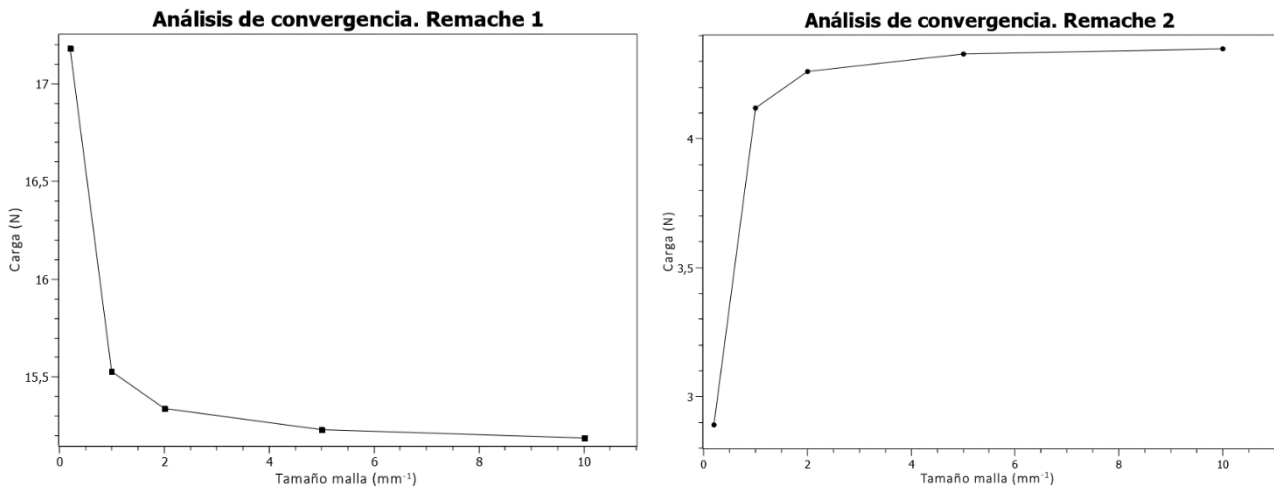
El número de elementos, iteraciones y sub-etapas se decide principalmente por la cantidad de cargas o tensiones que hay. Al resolver nuestros casos los cuales son problemas lineales, es decir, elástico puro, el número de iteraciones necesarias siempre es uno. Cuando se trata de modelos no lineales, por ej. modelos de contacto, se debe aumentar el número de sub-etapas para dividir el problema en pasos más cortos y fáciles. Importante tener siempre en cuenta es que FEM es un método de solución aproximado, por lo tanto, los cálculos que han convergido con altas demandas en el valor de convergencia aún pueden dar resultados incorrectos.

En nuestro caso se ha probado distintos tamaños de malla en el cálculo del reparto de carga en 2 remaches distintos del modelo como se muestra en la Tabla 4-3

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA		
Tamaño malla (mm)	Carga remache 1	Carga remache 2
5	17,18	2,89
1	15,53	4,12
0,5	15,34	4,26
0,2	15,23	4,33
0,1	15,19	4,35

Tabla 4-3. Carga en cada remache con distinto mallado para Análisis de convergencia

Como podemos observar entre el tamaño de malla 0,2 y 0,1 apenas existe diferencia. Esto se muestra de forma más visual en las siguientes gráficas 4-1.



Gráficas 4-1. Análisis de convergencia del mallado del modelo

El mallado para el cual se han obtenido todos los resultados es de tamaño 0.1 mm, con un tiempo de resolución de aprox. unos 10s. Con estos tiempos de cálculo no importa utilizar una malla más fina porque no son tantos casos a calcular, ni el programa tarda tanto tiempo en resolver para que unos segundos sean importantes, es decir, se podría haber utilizado una malla de 0.2 mm, pero se utiliza una malla de 0.1 mm por esto último que se ha mencionado y porque en concreto ese tamaño de malla se adapta mejor a la geometría del modelo permitiendo que para el diámetro de remache escogido estos están distribuidos equitativamente a lo largo de la zona de solape.

Cabe reseñar que, se observa que hay un exceso de elementos fuera de la zona de solape donde una simple flexotracción se puede solucionar con menos elementos, la única justificación es la simpleza y regularidad del mallado además de lo mencionado anteriormente.

#### 4.3.5 Tipo de estudio

Una vez realizado el modelado de la unión, se procede a definir el proceso de cálculo y obtención de resultados. Lo que se va a hacer en este caso, y en los otros modelos también, es lo que se llama un estudio paramétrico, que consiste en modificar alguna variable de entrada (Modulo de Young de remaches y espesor de uno de los adherentes) para observar los efectos en las variables de salida (% de carga que pasa por cada remache).

Cada uno de los casos de estudio generará unos resultados, estos son la carga que pasa por cada remache y que se analizarán por separado en el capítulo de resultados. Estos resultados se obtienen mediante un conjunto de órdenes que se detalla en el apartado 4.3.7 de ordenes especiales.

En la siguiente tabla se muestra los parámetros que se van a variar:

<i>Parámetros</i>	
<b><math>E_r</math> (N/mm<sup>2</sup>) ó (MPa)</b>	<b><math>t_2</math> (mm)</b>
210000	4
105000	2,66
52500	2
21000	1,66
10500	
2100	

Tabla 4-4. Parámetros del estudio paramétrico del modelo de unión a solape doble

Se variará el módulo de Young del remache ( $E_r$ ) y el espesor del adherente central ( $t_2$ ) dando una serie de características a las uniones que afectarán al reparto de carga, como por ejemplo el grado de balanceo/desbalanceo de la unión.

### 4.3.6 Tipo de elemento

El tipo elemento utilizado para el estudio es de la librería de ANSYS, en concreto el elemento PLANE182. Este elemento se utiliza para el modelado en 2-D de estructuras sólidas. El elemento se puede usar como un elemento plano (tensión plana o deformación plana) o como un elemento axisimétrico y está definido por cuatro nodos que tienen dos grados de libertad en cada nodo: translaciones en las direcciones nodales x e y. Este elemento tiene plasticidad, rigidez de esfuerzo, deflexión grande y grandes capacidades de deformación lo cual lo hizo muy adecuado para nuestro análisis.

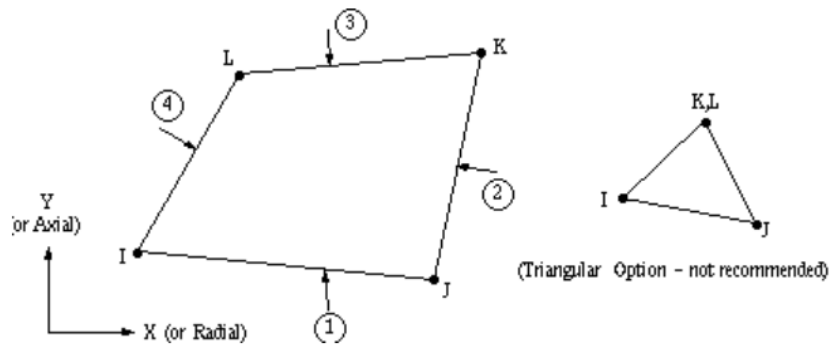


Figura 4-8. PLANE 182 – 2D geometría y localización de nodos

Los datos de entrada del elemento incluyen cuatro nodos, un grosor (solo para la opción de tensión plana) y las propiedades del material ortotrópico. El sistema de coordenadas del elemento predeterminado se encuentra en las direcciones globales. El usuario puede definir un sistema de coordenadas de elementos usando el comando ESYS, que forma la base de las indicaciones del material ortotrópico

La salida de solución asociada con el elemento tiene dos formas:

- Desplazamientos nodales incluidos en la solución nodal general
- Salida de elemento adicional como se muestra en la Figura 4-8

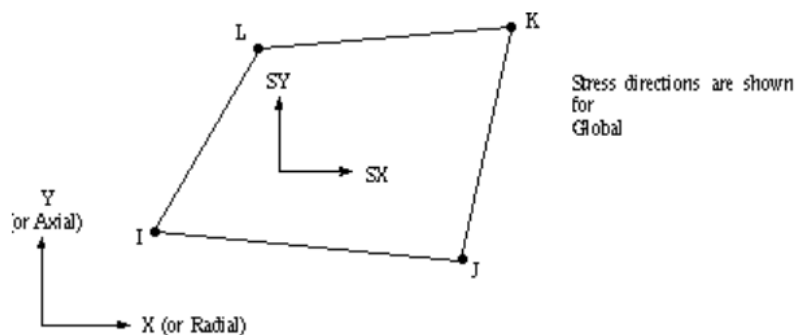


Figura 4-9. PLANE 182 – 2D Salida de tensiones

Este elemento tiene restricciones como:

- El área del elemento debe ser diferente de cero
- El elemento debe estar en un plano X-Y global como se muestra en la Figura 4.7

### 4.3.7 Órdenes especiales

En este apartado como su propio nombre indica, se describen los conjuntos de órdenes de carácter más especial que se han desarrollado para obtener los resultados y modelar correctamente el modelo de elementos finitos. Se van a presentar 2 órdenes es que se han utilizado en nuestro caso:

#### 1. Código APDL para orden de Simetría

Como podemos observar en la Figura 4-4 la unión que vamos a modelar es simétrica de geometría o forma, y además simétrica de cargas permitiendo aplicar la orden de simetría que aplica empotrados deslizantes que permiten el desplazamiento horizontal e impiden el desplazamiento vertical simplificando así el modelo geométrico. La orden se aplica de la siguiente forma:

```
=====
APLICAR SIMETRÍA EN LAS LÍNEAS ESCOGIDAS
=====
```

```
DL,N° DE LINEA,,SYMM ! Define restricciones DOF en líneas y aplica simetría
o antisimetría
```

#### 2. Código APDL para orden de cálculo de la resultante de carga en los remaches

Para el cálculo de la carga que pasa por cada remache se ha desarrollado una secuencia de órdenes que seleccionan los elementos de una fila y después seleccionan los nodos de superiores de esa fila para posteriormente calcular la resultante en cada remache. Consiste en la siguiente orden:

```
=====
CÁLCULAR RESULTANTE EN CADA REMACHE
=====
```

```
ESEL, S, ELEM, VALOR MÍNIMO N° ELEMENTO, VALOR MAX. N° ELEMENTO, INCREMENTO
ENTRE ELEMENTOS, ! Selecciona un conjunto de elementos mediante
incrementos del mismo valor
```

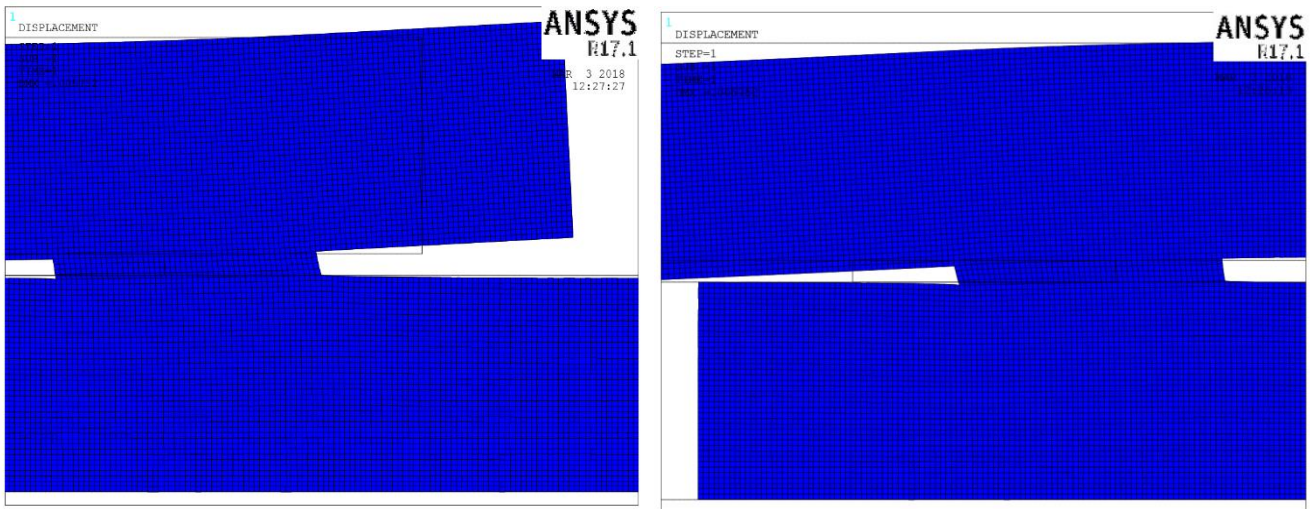
```
NSEL, S, NODE, VALOR MÍNIMO N° NODO, VALOR MÁXIMO N° NODO, INCREMENTO ENTRE
NODOS, ! Selecciona un conjunto de nodos mediante
incrementos del mismo valor
```

```
NSEL,A,NODE,,N° NODO, ! Selecciona el nodo y lo añade al conjunto
seleccionado
```

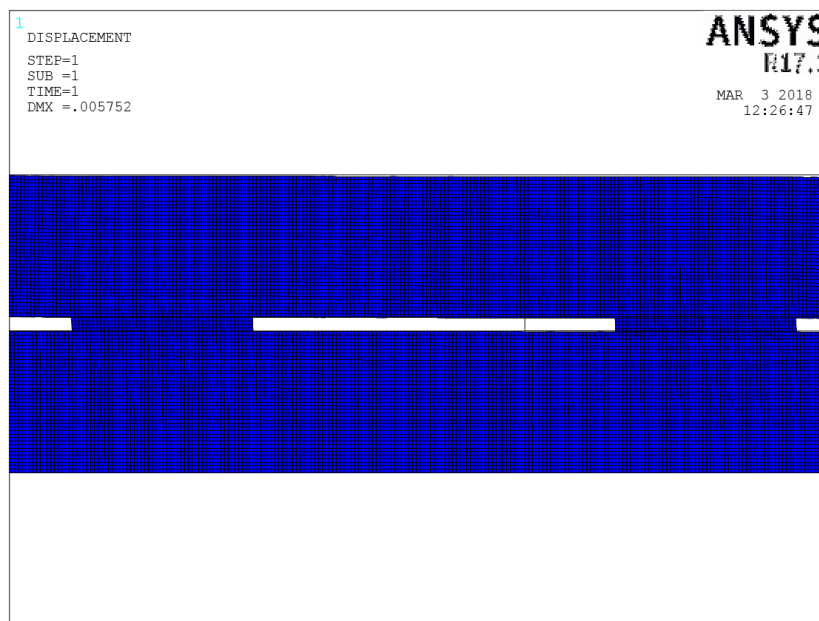
```
FSUM, , ! Calcula la resultante de carga en cada
remache
```

### 4.3.8 Representación de tensiones y deformada del modelo en ANSYS

Mediante las siguientes figuras que se muestran a continuación, en primer lugar, mostramos la geometría deformada con varios zooms en zonas de interés.



*Figura 4-10. Zoom de la geometría deformada del remache derecho e izquierdo respectivamente*



*Figura 4-11. Zoom de la geometría deformada de remaches centrales*

Como se observa en estas figuras, los remaches extremos son los que más se han deformado (la carga transferida es mayor) debido a que para obtener estas imágenes se ha utilizado un material para modelar los remaches que es la mitad de rígido que el de los adherentes haciendo que los remaches extremos soporten más carga en este caso y siendo, los que más deformación sufran. Por lo que, en este caso, definiríamos a los remaches extremos de la unión como los remaches críticos ya que, si aumenta la carga a la que está sometida la unión, aumentará notablemente en estos remaches pudiendo sobrepasar su tensión admisible, lo que provocaría su rotura y, por tanto, el fallo de la unión.

En la figura 4-12 que se muestra a continuación se observa la geometría deformada completa del modelo de 4 remaches, que es el que se ha representado.

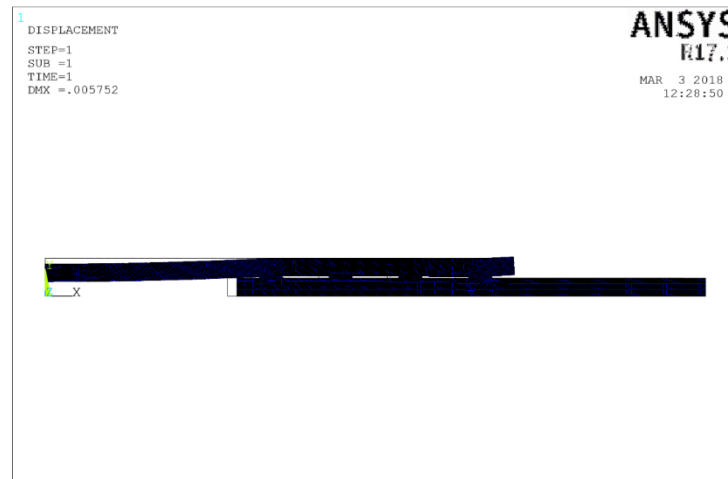


Figura 4-12. Geometría deformada unión de 4 remaches

A continuación, a modo informativo se muestra una figura representando las tensiones tangenciales y las tensiones de Von Mises.

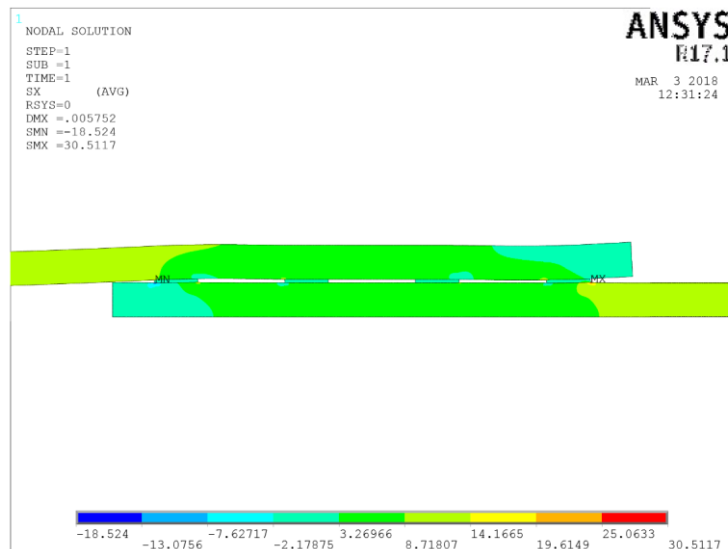


Figura 4-13. Tensiones tangenciales

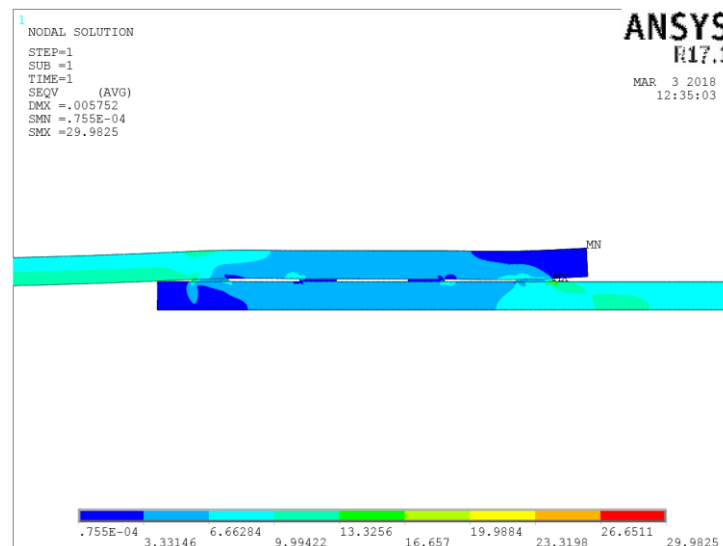


Figura 4-14. Tensiones de Von Mises



## 4.4 Descripción del modelo 2D de unión escalonada

En este apartado se describen las características geométricas, mallado, generales y tipo de estudio del modelo 2D de una unión escalonada.

### 4.4.1 Descripción general

En total para cada modelo se han empleado los siguientes números de elementos, nodos y grados de libertad como se muestra en la siguiente tabla:

<i>Características generales modelo 2D unión escalonada</i>			
n° de remaches	n° de elementos	n° nodos	n° grados de libertad
5 Remaches	24746	26063	52126

Tabla 4-5. Características generales de la unión escalonada

Se ha utilizado un tamaño de elemento de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}$  dando lugar a un tiempo de resolución de aproximadamente 6 segundos en un pc convencional. Este tamaño de elemento es debido al tamaño de malla escogido que queda justificado en el apartado de análisis de convergencia 4.3.4, ya que este modelo también es 2D. Por tanto, se justificará en el apartado 4.4.7 este tamaño de malla y tamaño de elemento.

### 4.4.2 Geometría y construcción del modelo

Se ha realizado un modelo 2D de una unión escalonada a solape doble que se puede ver en la siguiente figura simplificada a solape simple ya que por simplificación de la geometría se aplicará simetría simulando una unión escalonada a solape doble.

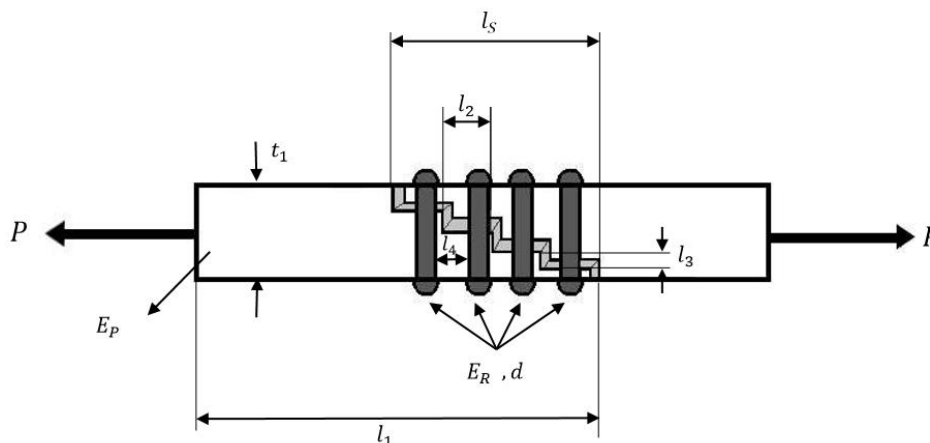


Figura 4-15. Descripción gráfica de la simplificación de un modelo de unión escalonada 3D a un modelo 2D

La estructura analizada se compone de 2 placas unidas a través de 4 remaches por simplificación del dibujo, pero únicamente presentaremos gráficamente el de 5 remaches ya que es el modelo desarrollado y las medidas son idénticas cambiando sólo el número de remaches por los que están unidas las placas además de que hay un escalón más. Por lo que todo esto habrá que tenerlo en cuenta a la hora de realizar/modificar el modelo, para no cometer errores a la hora de interpretar las medidas.

A continuación, se presenta para el modelo en la tabla 4-1 sus medidas geométricas para conocer numéricamente las características geométricas de cada modelo y se define cada parámetro para identificarlos.

<i>Características geométricas</i>	
Medidas (mm)	5 remaches
$l_1$	100
$l_2$ (longitud horizontal escalón)	10
$l_3$ (longitud vertical escalón)	1
$l_4$ (dist. entre remaches)	10
$l_s$	50,4
$t_1$	6
$t_3$	0,4
$d$	6

Tabla 4-6. Características geométricas de la unión escalonada

Se define entonces cada parámetro:

- $l_1$  , longitud de los adherentes
- $l_2$  , longitud horizontal del escalón de la unión
- $l_3$  , longitud vertical del escalón de la unión
- $l_4$  , distancia entre los remaches de la unión
- $l_s$  , longitud de la zona de solape
- $t_1$  , espesor de adherente izquierdo y derecho
- $t_3$  , espesor de la zona modelada como los remaches
- $d$  , diámetro de los remaches

En la figura siguiente se muestra el modelo de FEM generado para modelar la unión escalonada.

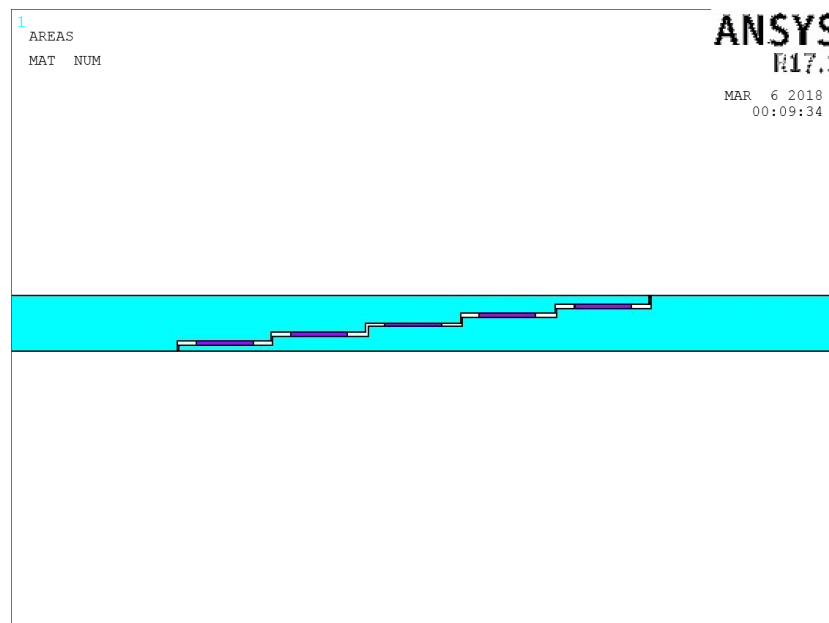


Figura 4-16. Modelo de FEM generado para la unión escalonada

El código de ANSYS para realizar modelo se encuentra en el apartado 1.2 del Anexo I. Podemos observar que se trata de un modelo bastante simplificado de una unión escalonada dando la posibilidad de simular numerosos materiales como adherentes y remaches, además de tener en cuenta otros parámetros como diámetros de remache.

Es preciso reseñar que en el modelo de FEM de la figura 4-5 tiene realizado un zoom para poder visualizar con claridad las zonas modeladas como los remaches (violeta) y no se visualiza la zona de los adherentes totalmente completa. Además, se puede apreciar que en el modelo hay una pequeña separación entre adherentes (0,2 mm) para evitar problemas de contacto y de mallado, por ello la longitud de solape es de 50,4 mm.

#### 4.4.3 Carga y condiciones de contorno

Se definen las condiciones de carga y contorno aplicada modelo de elementos finitos que aparece en la figura 4-6. Como vemos, se aplica sobre 3 líneas un comando que genera simetría de bolas (empotrado deslizante) que permite el desplazamiento horizontal e impidiendo el desplazamiento vertical, dando lugar a lo que sería una unión escalonada a solape doble y disminuyendo el tiempo de generación del modelo geométrico. Ya se ha explicado en detalle la simetría específicamente en el apartado 4.3.7 de ordenes especiales utilizadas.

Por último, la carga aplicada al modelo es de  $-10 \text{ MPa}$  (tracción en ANSYS) sobre el borde vertical derecho del adherente derecho (línea roja en la figura).

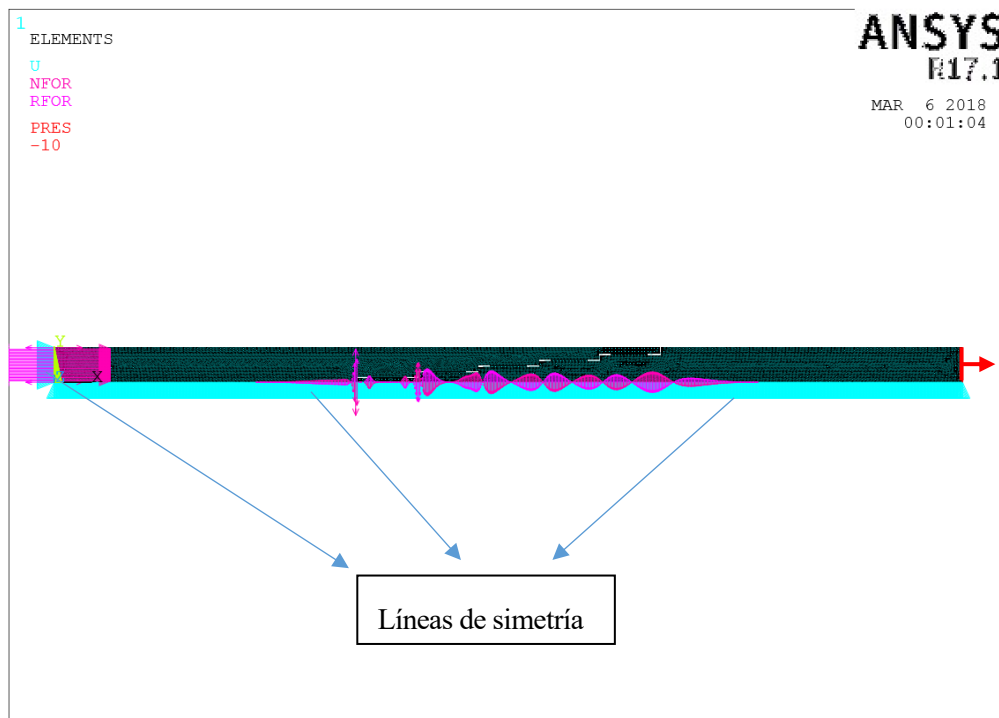


Figura 4-17. Modelo de FEM con condiciones de contorno

#### 4.4.4 Mallado y Análisis de Convergencia del mallado

El mallado utilizado es de un tamaño de 0.2 mm en todo el modelo dando lugar a elementos cuadrados de tamaño  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}$ . En las siguientes figuras se muestra el mallado y un zoom del mallado sobre la zona de los remaches (color violeta).

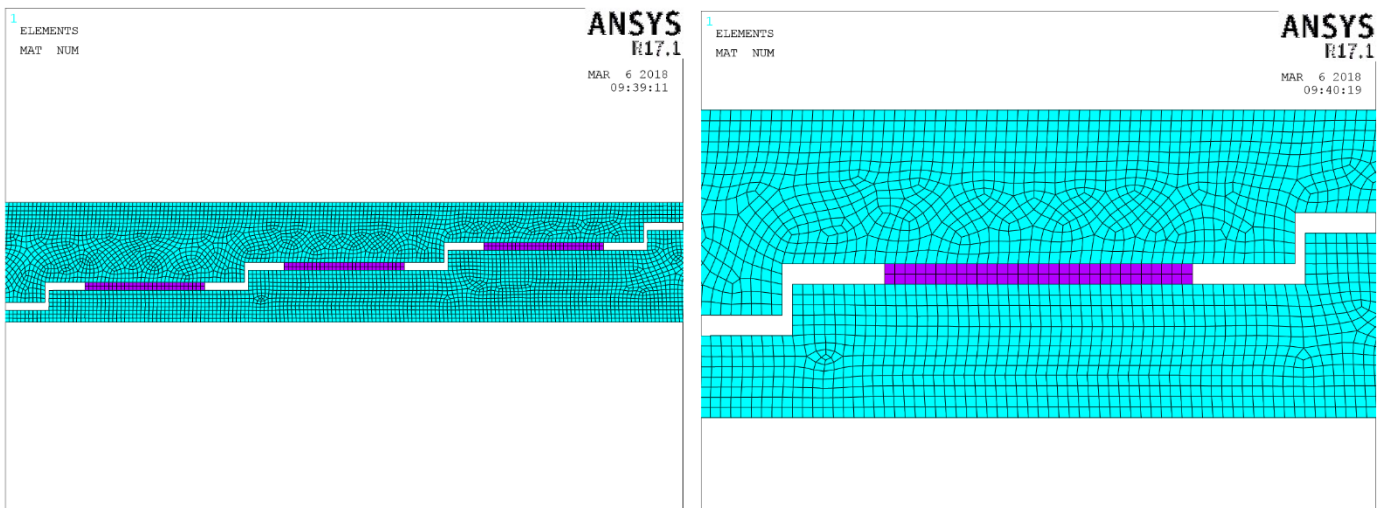


Figura 4-18. Mallado del modelo escalonado con diferentes grados de zoom

El análisis de convergencia del apartado 4.3.4 es similar al de este modelo ya que son modelos 2D, pero con distinta geometría. Como podemos observar en el apartado 4.3.4 entre el tamaño de malla 0,2 y 0,1 apenas existe diferencia. Esto se muestra de forma más visual en las gráficas 4-1.

El mallado para el cual hemos obtenido todos los resultados es de tamaño 0.2 mm, con un tiempo de resolución de aprox. unos 6s. Con estos tiempos de cálculo no importaría utilizar una malla más fina porque no son tantos casos los que se calculan, ni tarda tanto tiempo en resolver para que unos segundos sean importantes, es decir, se podría haber utilizado una malla de 0.1 mm como en el otro caso, pero se utiliza una malla de 0.2 mm porque en concreto ese tamaño de malla se adapta mejor a la geometría del modelo permitiendo que para el diámetro de remache escogido estos están distribuidos equitativamente a lo largo de la zona de solape y además hace que los nodos converjan en todos los puntos, haciendo consistente al modelo.

Cabe reseñar que, se observa que como en el caso anterior hay un exceso de elementos fuera de la zona de solape donde una simple flexo-tracción se puede solucionar con menos elementos, la única justificación es la simpleza y regularidad del mallado además de lo mencionado anteriormente.

#### 4.4.5 Tipo de estudio

Lo que se va a realizar es lo mismo que se definió en el apartado 4.3.5, un estudio de tipo paramétrico en el que en este caso únicamente se varía el módulo de Young de los remaches ( $E_r$ )

Cada uno de los casos de estudio generará unos resultados, estos son la carga que pasa por cada remache y que se analizarán por separado en el capítulo de resultados. Estos resultados se obtienen mediante un conjunto de órdenes que se detalla en el apartado 4.3.7 de ordenes especiales.

En la siguiente tabla se muestra el parámetro que se varía:

<i>Parámetros</i>
$E_r$ (N/mm <sup>2</sup> ) ó (MPa)
210000
105000
52500
21000
10500
2100

*Tabla 4-7. Parámetros del estudio paramétrico del modelo de unión escalonada*

Se variará el módulo de Young del remache ( $E_r$ ) que afectará a la rigidez global de los remaches y dará una serie de características a la unión que afectarán o no en este caso al reparto de carga, como por ejemplo cuanto de rígido o flexibles son los remaches.

#### 4.4.6 Tipo de elemento

El tipo de elemento es el PLANE182, el mismo que ya se ha definido en el apartado 4.3.6

#### 4.4.7 Órdenes especiales

Las órdenes "especiales" utilizadas en este modelo son las mismas que en el anterior, por tanto, quedan definidas en el apartado 4.3.7

#### 4.4.8 Representación de tensiones y geometría deformada del modelo en ANSYS

Mediante las siguientes figuras que se muestran a continuación, en primer lugar, se muestra la geometría deformada con varios zooms en zonas de interés

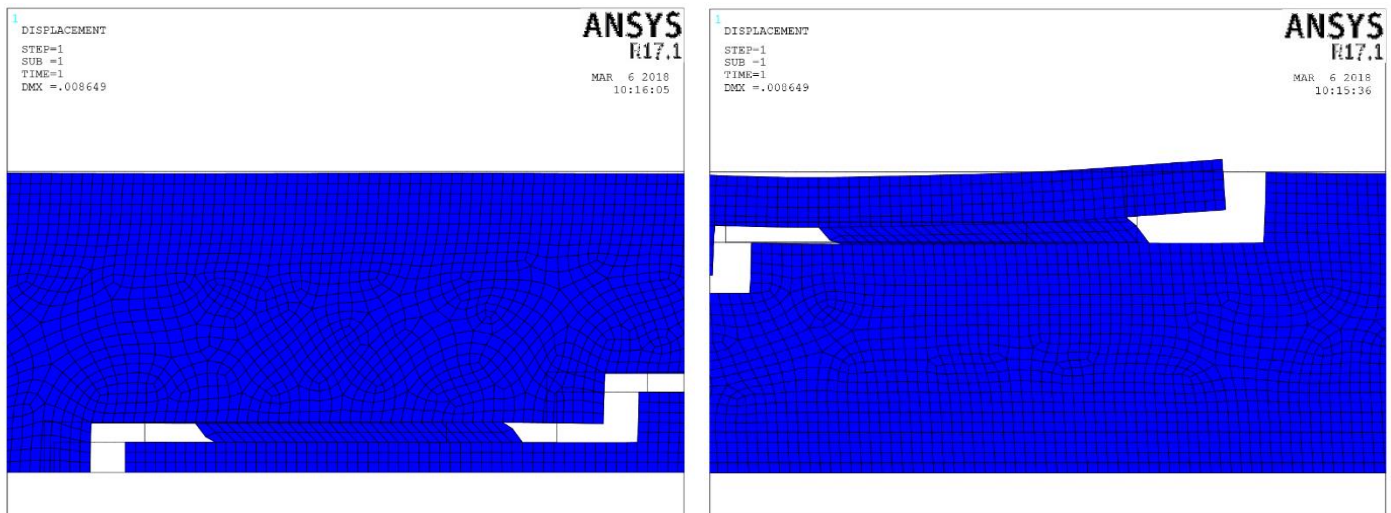


Figura 4-19. Zoom de la geometría deformada del remache izquierdo y derecho respectivamente

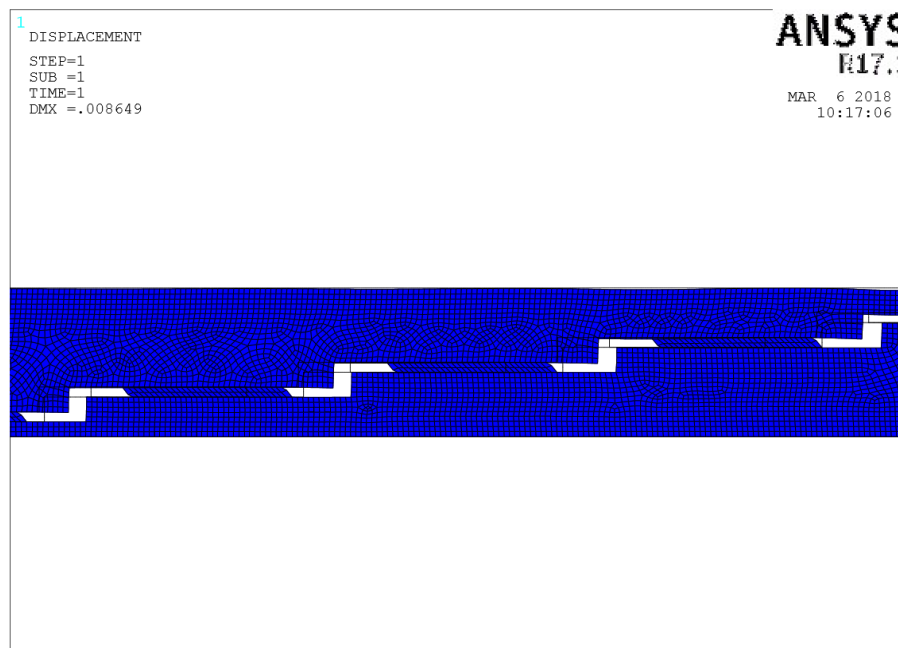


Figura 4-20. Zoom de la geometría deformada de remaches centrales

Como podemos observar en estas figuras, todos los remaches de la unión se han deformado por igual, por lo cual podemos decir que la carga transferida es la misma en cada remache, esto dará lugar a un reparto de carga equitativo. Como es conocido en este tipo de unión, la disminución progresiva de la rigidez total de la pieza hace que cada remache transmita el mismo nivel de carga independientemente de su valor de rigidez. Esta situación es deseable ya que de la no uniformidad del reparto de carga pasamos a un reparto de carga uniforme, en el que todos los remaches están solicitados por igual. En este tipo de unión no tendríamos un remache ni remaches críticos, puesto que todos transfieren la misma carga serán todos igual de críticos. Se observa que la zona donde se encuentra el remache derecho se levanta, esto es debido a que esta zona no tiene un momento en sentido contrario del otro adherente que contrarreste el giro que provoca la pequeña excentricidad al aplicar la carga.

El único inconveniente que presenta este tipo de unión es que debido a su geometría encarece la ejecución de la unión.

En la figura 4-18 que se muestra a continuación se muestra la geometría deformada completa del modelo de 4 remaches, que es el que se ha representado.

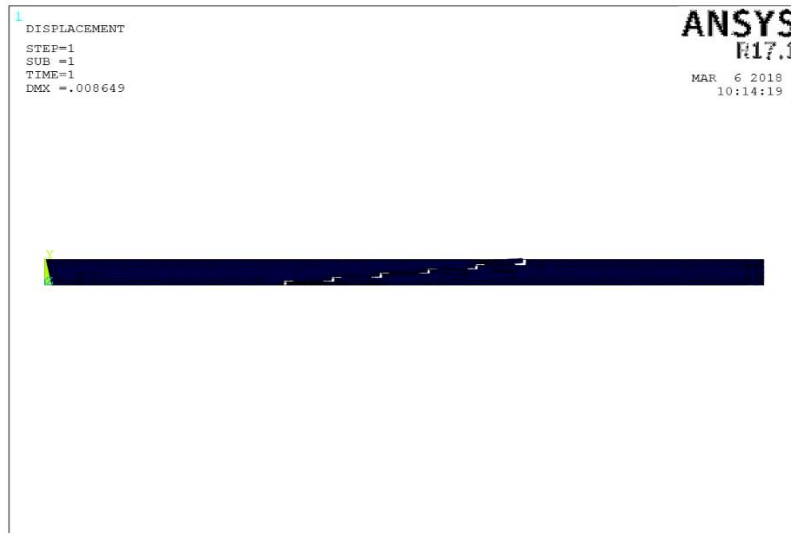


Figura 4-21. Geometría deformada unión escalonada

A continuación, a modo informativo se muestra una figura representando las tensiones tangenciales y las tensiones de Von mises

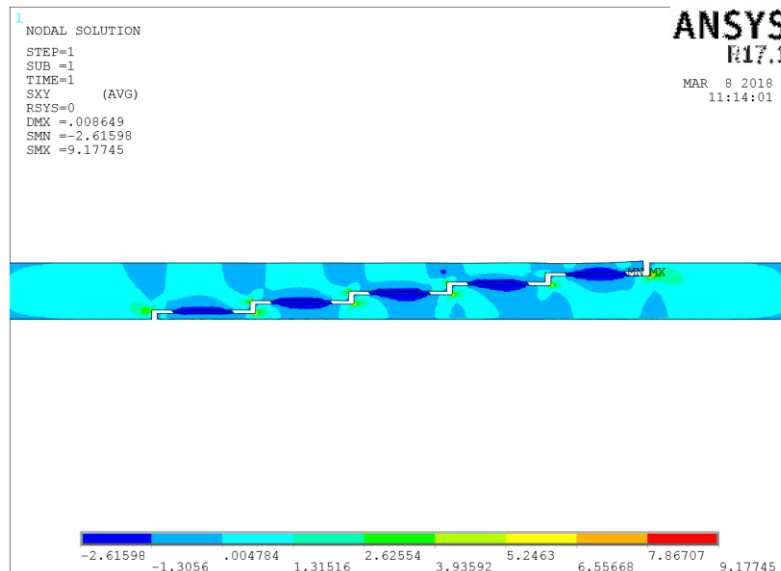


Figura 4-22. Tensiones tangenciales

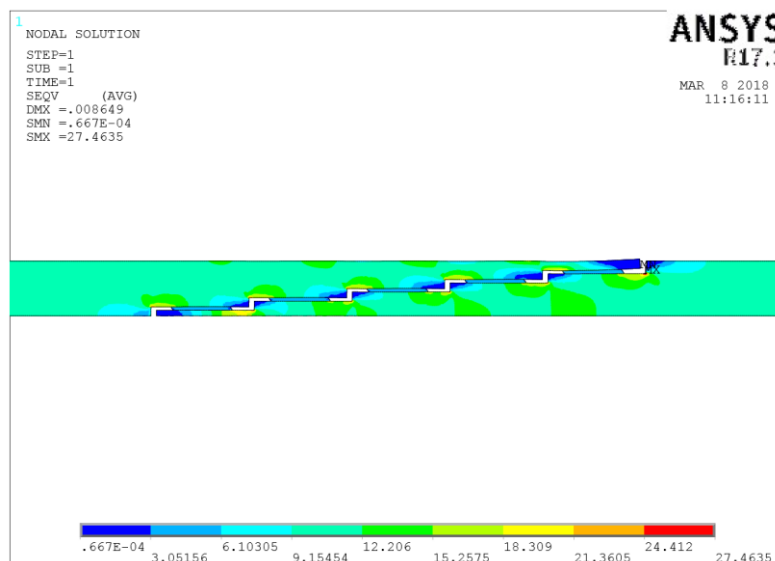


Figura 4-23. Tensiones de Von Mises

## 5 RESULTADOS

**E**n este capítulo se exponen los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos 2D de uniones a solape doble y escalonadas desarrollados en este proyecto mediante el programa de elementos finitos ANSYS comparando también con resultados que se presentan en la bibliografía.

### 5.1 Rigidez de adherentes y remaches

Es importante antes de representar los resultados definir los siguientes conceptos de lo que sería una unión remachada real:

1. Es conocido que la rigidez estructural a tracción de los adherentes tiene la forma del siguiente producto:

$$K = EA = Etb$$

Donde  $E$  es el módulo de Young con unidades en MPa,  $b$  es el ancho del adherente y  $t$  es el espesor con unidades en mm.

2. Es conocido que la rigidez estructural a tracción de los remaches es similar al producto que se presenta en el caso anterior:

$$Kr = nGA = n \frac{E}{2(1 + \nu)} \pi R^2$$

Donde  $G$  es el módulo de cortadura con unidades en MPa,  $E$  es el módulo de Young con unidades en MPa,  $n$  es el número de remaches en la misma línea de acción y  $\pi R^2$  es el área del remache.

Por lo que en nuestra simplificación a una geometría 2D ocurre lo siguiente

1. Al pasar de una geometría 3D a 2D el ancho ( $b$ ) de los adherentes toma el valor de la unidad y por tanto la rigidez estructural a tracción queda definida como el siguiente producto:

$$K = E t$$

Donde  $E$  es el módulo de Young con unidades en MPa y  $t$  es el espesor de adherentes con unidades en mm.

2. En el caso de los remaches no está tan claro debido a que la zona modelada como los remaches no tiene una relación directa como en el caso de los adherentes, lo que sí se conoce es que el módulo de Young ( $E$ ) tiene una relación directa con el módulo de cortadura ( $G$ ) y que a su vez la rigidez estará condicionada por una dimensión característica (ancho o espesor). Lo que sí se puede afirmar es que tanto la rigidez de los remaches como de los adherentes van a tener las mismas unidades de MPa mm

Por tanto, queda justificado la variación del módulo de Young con el objetivo de modificar la rigidez del remache para ver cómo afecta ello al reparto de carga. Esto se muestra de forma más visible en la figura siguiente:

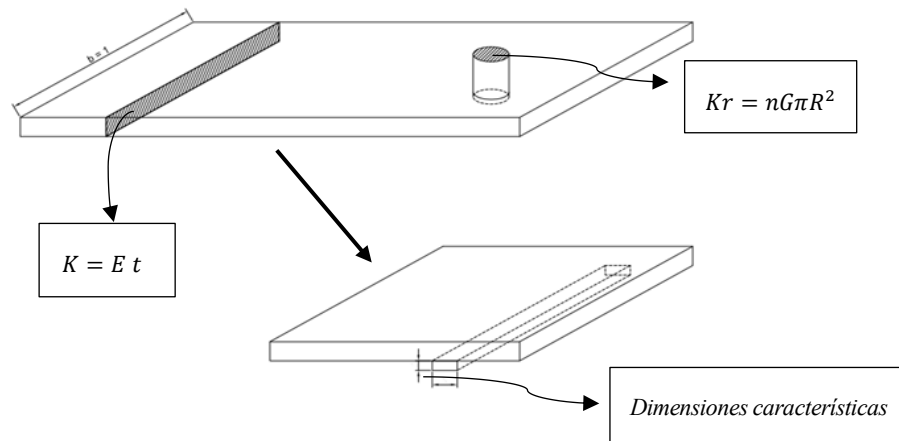


Figura 5-1. Valores de rigidez a tracción de adherentes y remaches

Es preciso reseñar que, el módulo de Young afecta local y globalmente a la rigidez del material y el espesor afecta globalmente pero no localmente por lo que habrá que tener en cuenta que si aumentamos el espesor el doble la rigidez global aumenta el doble pero localmente tendríamos el mismo material.

Como podemos observar en el capítulo 4, nuestro problema tiene más influencia a nivel local que global debido a que hemos definido los remaches como una pequeña zona central que se puede observar en la figura 4-7 que no ocupa todo el espesor, sino que está en contacto con una parte del adherente que podríamos definirla como una parte "local" del adherente. Por lo cual habrá que tener en cuenta que en nuestro modelo influirá en mayor cantidad los cambios en el módulo de Young ( $E$ ) que los cambios en el espesor ( $t$ ).

## 5.2 Uniones balanceadas

Como ya sabemos, se define una unión balanceada aquella en la que el valor de rigidez a tracción de los adherentes es la misma, es decir, la relación entre espesor de adherentes y módulo de Young es la siguiente:

$$E_1 t_1 = E_2 t_2$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes

En nuestro caso, para uniones balanceadas se trata de una unión a solape doble (cortadura doble) en el que el material de los adherentes es considerado de un material fijo y el material de los remaches es la variable (rigidez de estos) que vamos a ir modificando cambiando su módulo de Young para ver de qué forma afecta sobre el reparto de carga.

### 5.2.1 Uniones balanceadas de 5 filas de remaches.

En este caso, recordamos que tenemos un espesor de adherentes  $t_1$  y  $t_2$  de 4 mm y una zona central modelada como los remaches donde calculamos la carga con un espesor  $t_3$  de 0,4 mm suponiendo ello una diferencia de 10 veces entre los 2 espesores. Aplicamos una carga de 10 MPa, lo que serían 40 MPa porque se aplica sobre una línea de 4mm.

Se comienza modelando los materiales de los remaches con un módulo de Young de un material muy rígido como es el acero (2100000 MPa) igual al de los adherentes, y se obtienen los resultados realizando un estudio paramétrico definido en el apartado 4.3.5 en el que la variable de entrada que vamos a modificar será la rigidez del remache variando únicamente su módulo de Young y manteniendo fija la rigidez de los adherentes.



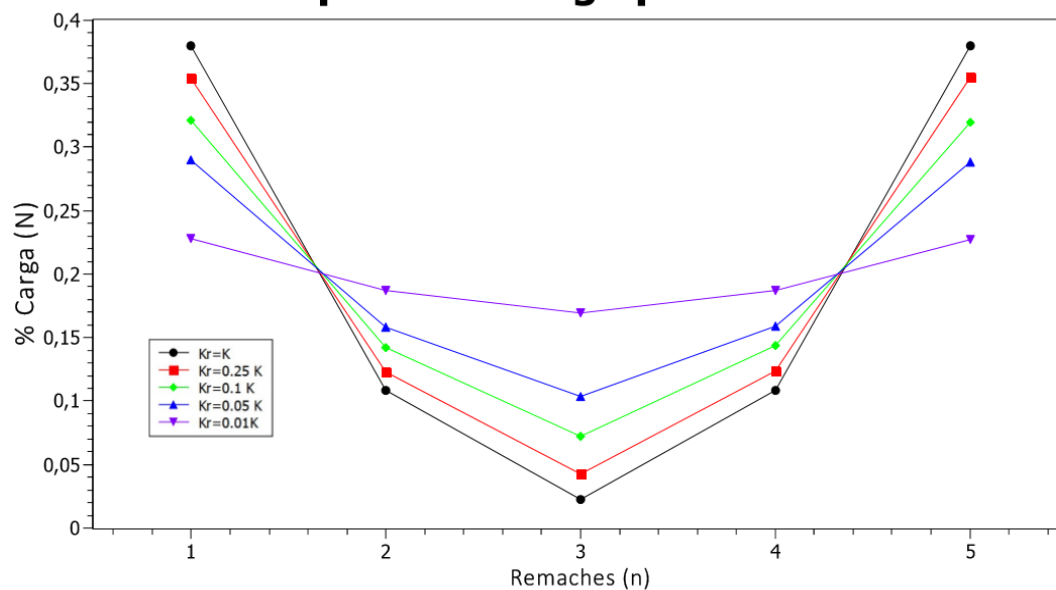
En la siguiente Tabla 5-1 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que disminuye la rigidez de estos o lo que es lo mismo, a medida que aumenta la flexibilidad de los remaches.

<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Rigidez remaches</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k=kr</i>	0,380	0,108	0,023	0,109	0,380
<i>0,5k=kr</i>	0,370	0,115	0,030	0,115	0,369
<i>0,25k=kr</i>	0,355	0,123	0,043	0,124	0,355
<i>0,1k=kr</i>	0,322	0,142	0,072	0,144	0,320
<i>0,05k=kr</i>	0,290	0,158	0,104	0,159	0,288
<i>0,01k=kr</i>	0,229	0,187	0,170	0,187	0,227

Tabla 5-1. %Carga por remache a medida que varía la rigidez del remache

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 5 remaches

### Reparto de carga por remache



Gráfica 5-1. Reparto de carga por remache en una unión balanceada con 5 filas de remaches

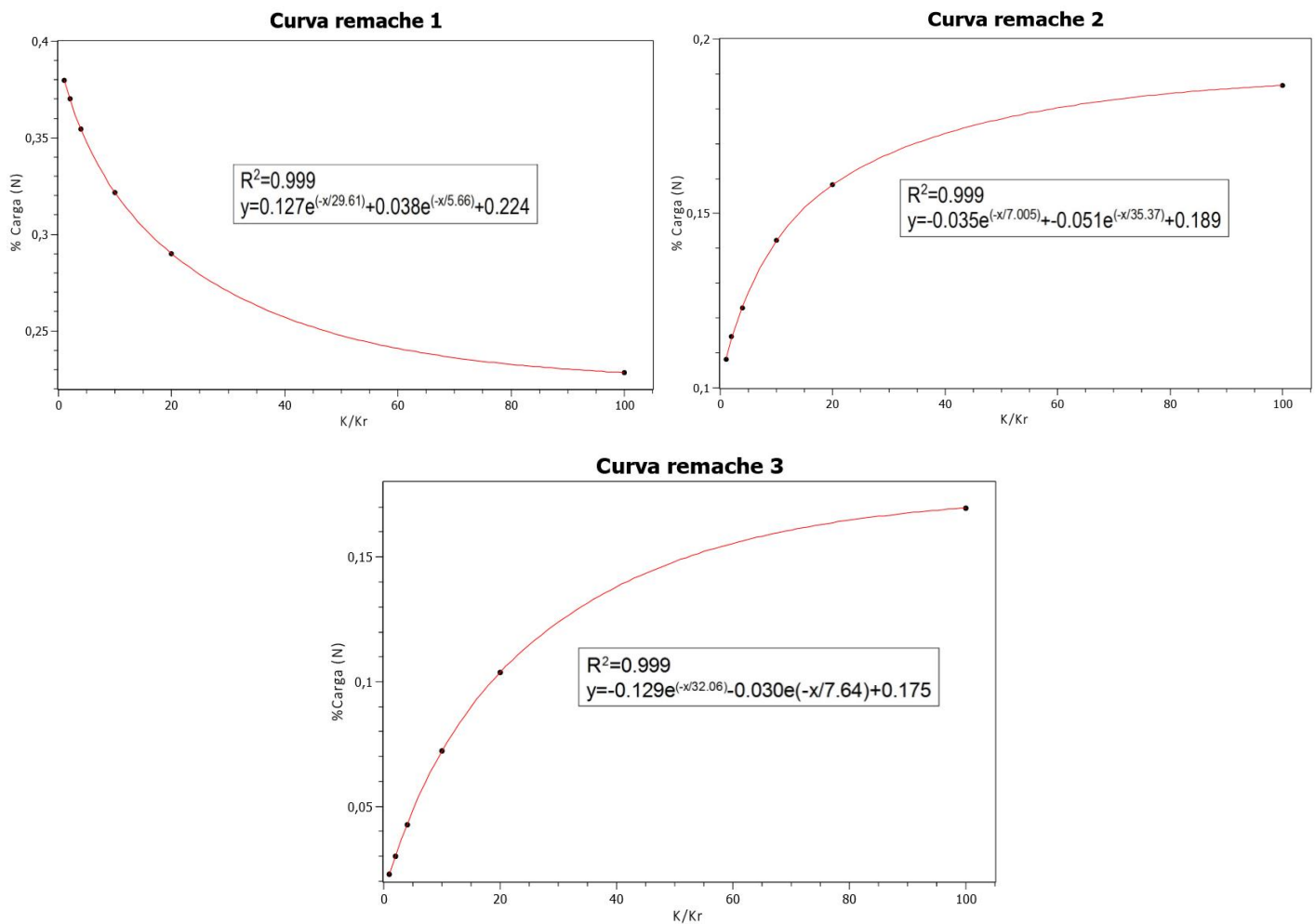
Como se observa tanto en la Gráfica 5-1 como en la Tabla 5-1, comparando con los resultados obtenidos por Niu (ver apartado 3.3) nuestro modelo resulta consistente con este modelo de referencia, ya que a medida que la rigidez de los remaches disminuye (aumenta la flexibilidad) variando únicamente el módulo de Young (E) del material de estos ya que se conoce su efecto directo sobre la rigidez del remache, el reparto de carga en la unión comienza a aumentar en los remaches de la zona central y disminuye en la zona de los remaches extremos hasta que casi para valores en los que los remaches se pueden considerar infinitamente flexibles el reparto de carga por remache se vuelve uniforme (equitativo), es decir, cada remache soporta aproximadamente el mismo porcentaje de carga.

Esto muestra que para un mismo nivel de carga la tensión soportada por los remaches extremos de la unión cuando disminuye su rigidez provoque que se aleje aún más de la tensión admisible evitando así, el fallo del remache y, por consiguiente, de la unión.

También favorece a la unión de cara a la seguridad si para ese nivel de carga no se produce el fallo de la misma y alejándose de la tensión admisible evitando así, el fallo del remache y, por consiguiente, de la unión.

Estas observaciones reflejan la consistencia del modelo respecto a lo expuesto en los modelos de referencia (3.2), y que, por ejemplo, observamos en afirmaciones que encontramos en la Figura 1-2, donde se muestra que para remaches infinitamente rígidos la carga se transfiere prácticamente por los remaches externos y en remaches infinitamente flexibles la carga se reparte equitativamente por cada remache de la unión.

En las siguientes gráficas se muestra la curva de carga para cada remache de la unión, solo representamos el 1,2 y 3, ya que el 4 y 5 por simetría son iguales al 1 y 3.



Graficas 5.2. Curva para cada remache en unión balanceada de 5 remaches

Como se observa, en estas gráficas queda reflejada la dependencia exponencial de la carga que pasa por cada remache cuando se disminuye la rigidez de estos.

Con estas curvas obtenemos la ecuación para cada remache, con la que dependiendo del valor de la relación de rigideces  $\frac{K}{K_r}$  podremos calcular la carga que está soportando cada remache para la carga aplicada en la unión, y evaluar para cada "hipotético" material si ese nivel de carga provocaría superar la tensión admisible del remache, lo que como sabemos, provocaría el fallo de la unión.

### 5.2.2 Uniones balanceadas de 4 filas de remaches.

Para este caso se ha realizado el mismo estudio que para la unión con 5 filas de remaches variando únicamente el número de remaches.

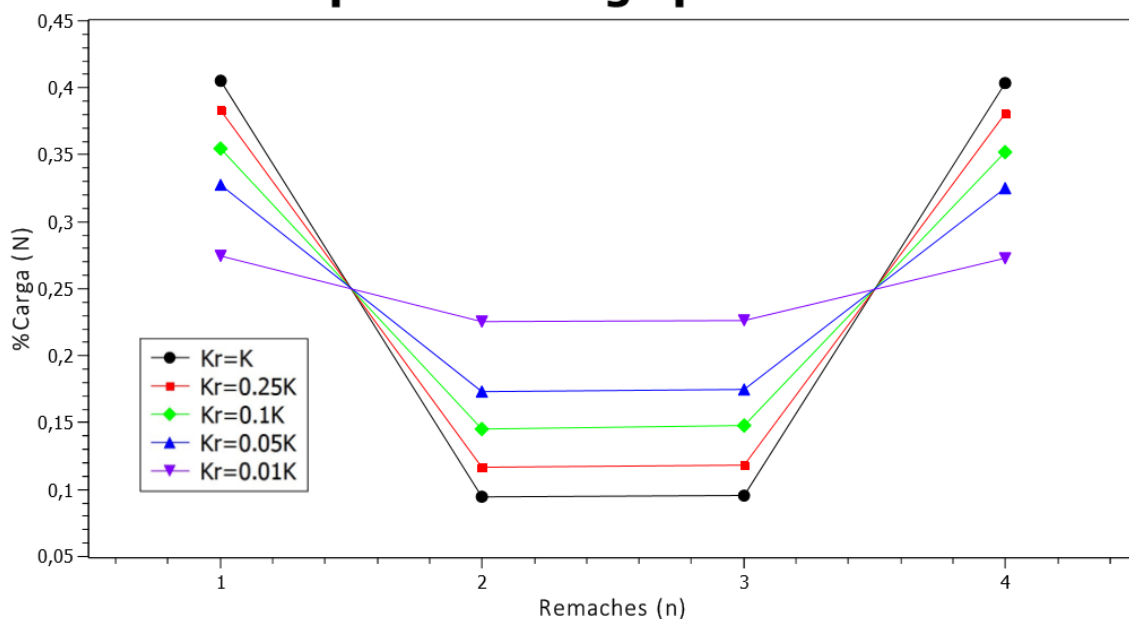
En la siguiente Tabla 5-2 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que disminuye la rigidez de estos o lo que es lo mismo, a medida que aumenta la flexibilidad de los remaches

<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Rigidez remaches</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k=kr</i>	0,405	0,095	0,096	0,404
<i>0,5k=kr</i>	0,397	0,103	0,105	0,395
<i>0,25k=kr</i>	0,383	0,117	0,119	0,381
<i>0,1k=kr</i>	0,355	0,146	0,148	0,352
<i>0,05k=kr</i>	0,327	0,173	0,175	0,325
<i>0,01k=kr</i>	0,275	0,226	0,227	0,273

Tabla 5-2. %Carga por remache a medida que varía la rigidez del remache

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 4 remaches

### Reparto de carga por remache

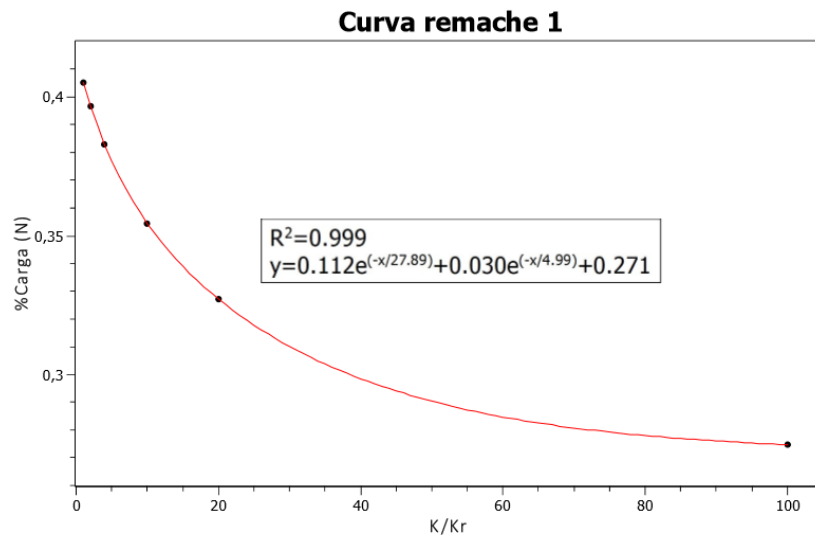


Grafica 5-3. Reparto de carga por remache en una unión balanceada con 4 filas de remaches

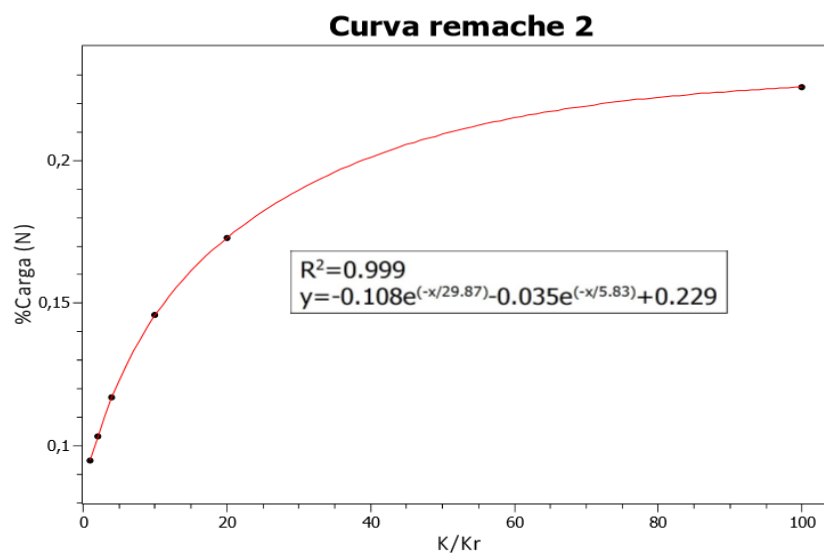
En este caso, la observación es idéntica a la de la unión de 5 filas de remaches. A medida que la rigidez de los remaches disminuye (aumenta la flexibilidad) variando únicamente el módulo de Young (E) del material de estos ya que se conoce su efecto directo sobre la rigidez del remache, el reparto de carga en la unión comienza a aumentar en los remaches de la zona central y disminuye en la zona de los remaches extremos hasta que casi para valores en los que los remaches se pueden considerar infinitamente flexibles el reparto de carga por remache se vuelve uniforme (equitativo), es decir, cada remache soporta aproximadamente el mismo porcentaje de carga. Esto muestra que para un mismo nivel de carga la tensión soportada por los remaches extremos de la unión cuando disminuye su rigidez provoque que se aleje aún más de su tensión admisible favoreciendo a la unión de

cara a la seguridad y alejándose de la tensión admisible evitando así, el fallo del remache y, por consiguiente, de la unión.

En las siguientes gráficas se muestra la curva de carga para cada remache de la unión, solo representamos el 1 y 2, ya que el 1 y 2 por simetría son iguales al 3 y 4



Graficas 5.4. Curva para remache 1 en unión balanceada de 4 remaches



Graficas 5.5. Curva para remache 2 en unión balanceada de 4 remaches

Como se observa, en estas gráficas queda reflejada la dependencia exponencial de la carga que pasa por cada remache cuando se disminuye la rigidez de estos.

Con estas curvas obtenemos la ecuación para cada remache, con la que dependiendo del valor de la relación  $\frac{K}{K_r}$  podremos calcular la carga que está soportando cada remache para la carga aplicada en la unión, y evaluar para cada "hipotético" material si ese nivel de carga provocaría superar la tensión admisible del remache, lo que como sabemos, provocaría el fallo de la unión.

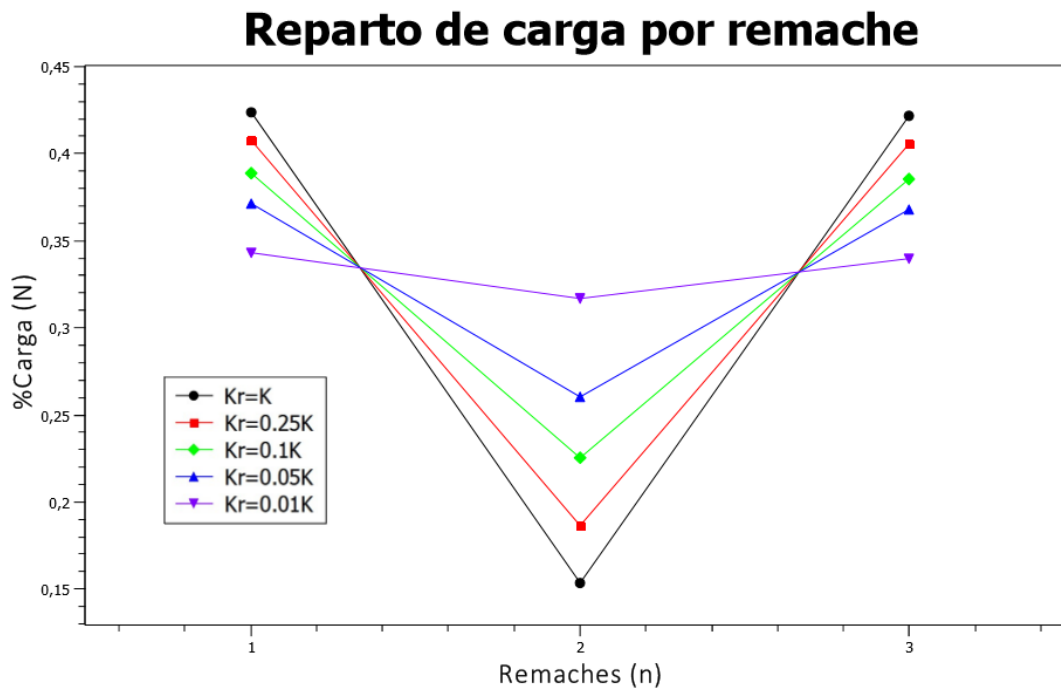
### 5.2.3 Uniones balanceadas de 3 filas de remaches.

Para este caso se ha realizado el mismo estudio que para la unión con 5 y 4 filas de remaches variando únicamente el número de remaches. En la siguiente Tabla 5-3 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que disminuye la rigidez de estos o lo que es lo mismo, a medida que aumenta la flexibilidad de los remaches

<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Rigidez remaches</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k=kr</i>	0,424	0,154	0,422
<i>0,5k=kr</i>	0,418	0,166	0,416
<i>0,25k=kr</i>	0,408	0,186	0,406
<i>0,1k=kr</i>	0,389	0,226	0,386
<i>0,05k=kr</i>	0,371	0,261	0,368
<i>0,01k=kr</i>	0,343	0,317	0,340

Tabla 5-3. %Carga por remache a medida que varía la rigidez del remache

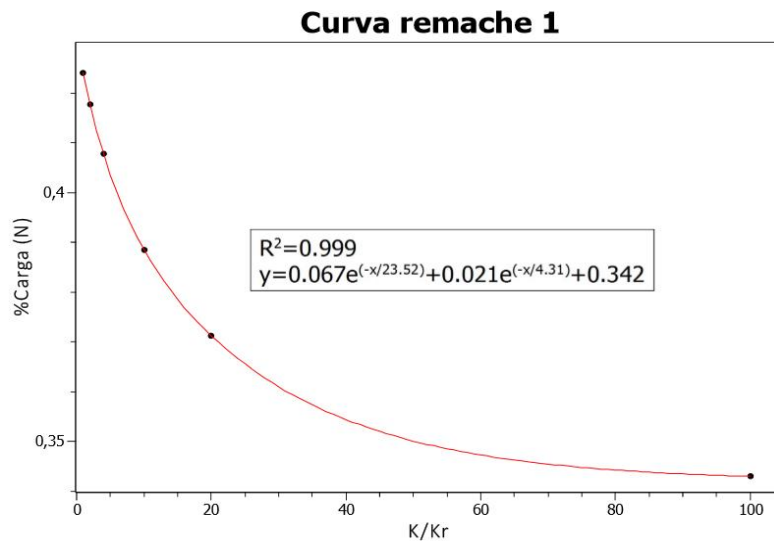
En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 3 remaches:



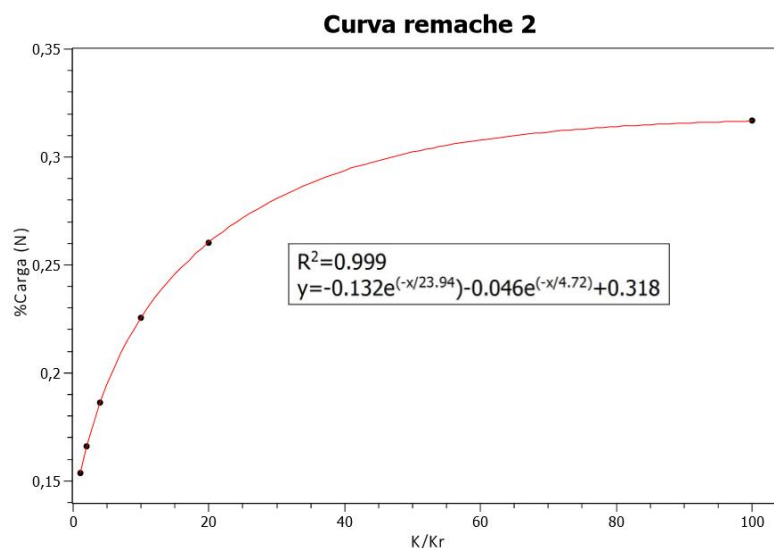
Gráfica 5-6. Reparto de carga por remache en una unión balanceada con 3 filas de remaches

En este caso, la observación es idéntica a la de las anteriores uniones. A medida que la rigidez de los remaches disminuye (aumenta la flexibilidad) variando únicamente el módulo de Young (E) del material de estos, el reparto de carga en la unión comienza a aumentar en los remaches de la zona central y disminuye en la zona de los remaches extremos hasta que casi para valores en los que los remaches se pueden considerar infinitamente flexibles el reparto de carga por remache se vuelve uniforme (equitativo), es decir, cada remache soporta aproximadamente el mismo porcentaje de carga. Esto muestra que para un mismo nivel de carga la tensión soportada por los remaches extremos de la unión cuando disminuye su rigidez provoque que se aleje aún más de su tensión admisible favoreciendo a la unión de cara a la seguridad y alejándose de la tensión admisible evitando así, el fallo del remache y, por consiguiente, de la unión.

En las siguientes gráficas se muestra la curva de carga para cada remache de la unión, solo representamos el 1,2, ya que el 1 por simetría es iguales al 1



*Graficas 5.7. Curva para remache 1 en unión balanceada de 4 remaches*



*Graficas 5.8. Curva para remache 2 en unión balanceada de 4 remaches*

Como se observa, en estas gráficas queda reflejada la dependencia exponencial de la carga que pasa por cada remache cuando se disminuye la rigidez de estos.

Con estas curvas obtenemos la ecuación para cada remache, con la que dependiendo del valor de la relación  $\frac{K}{K_r}$  podremos calcular la carga que está soportando cada remache para la carga aplicada en la unión, y evaluar para cada "hipotético" material si ese nivel de carga provocaría superar la tensión admisible del remache, lo que como sabemos, provocaría el fallo de la unión.

## 5.2.4 Efecto del espesor de adherentes sobre el reparto de carga

Para estudiar el efecto del espesor de la placa en la distribución de carga de remaches, se realiza un estudio paramétrico para una unión remachada al igual que S. Sathiya Naarayan et al. En este estudio, el espesor de la

placa es la variable que se cambian. La carga, diámetro de remaches y materiales fue la variable que se mantuvo. El estudio como vemos es similar al de los casos anteriores, simplemente la variable a modificar es el espesor de las placas a unir.

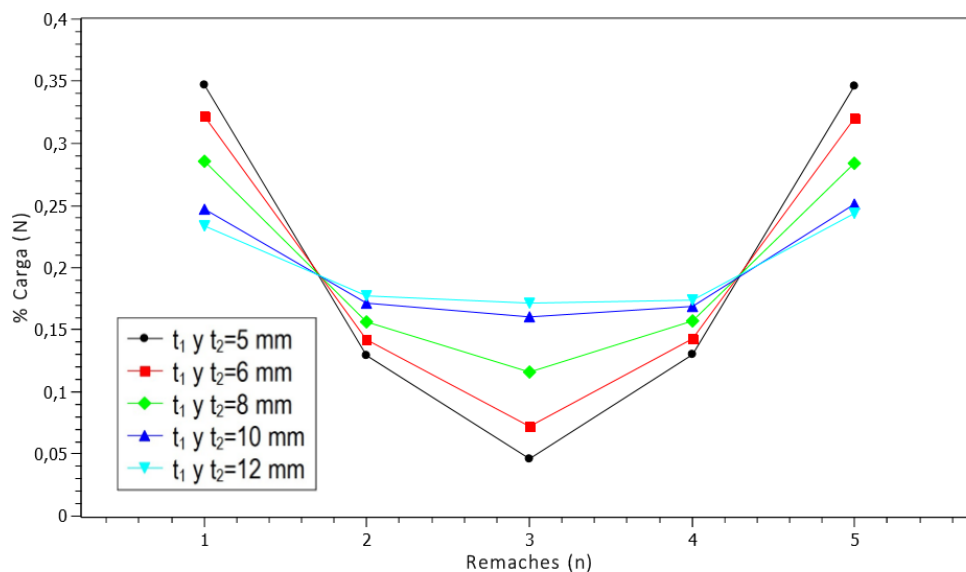
En la siguiente Tabla 5-4 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que disminuye la rigidez relativa de estos o lo que es lo mismo, a medida que aumenta el espesor de las placas de unión:

<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Rigidez remaches</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<b>5 mm</b>	0,347	0,130	0,046	0,130	0,346
<b>6 mm</b>	0,322	0,142	0,072	0,143	0,321
<b>8 mm</b>	0,285	0,157	0,116	0,157	0,284
<b>12 mm</b>	0,247	0,172	0,160	0,169	0,252
<b>15 mm</b>	0,233	0,177	0,172	0,174	0,244
<b>20 mm</b>	0,222	0,180	0,177	0,180	0,241

Tabla 5-4. %Carga por remache a medida que aumenta el espesor de placas de unión

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 5 remaches:

### Reparto de carga por remache



Gráfica 5-9. Reparto de carga por remache en una unión balanceada con 5 filas de remaches aumentando espesor de las placas a unir.

Es necesario reseñar que el espesor de las placas afecta directamente al valor de la rigidez de los adherentes como vimos en el apartado 5.1. Por lo que, se puede observar que la no uniformidad de la distribución del reparto de carga en los remaches disminuye a medida que aumenta el espesor de la placa, esto es debido a que al aumentar el espesor de las placas provoca un aumento de la rigidez del material viéndose los remaches como más flexibles respecto a estos. Esto concuerda con las observaciones en la literatura del mismo Niu[1] afirmando que a medida que disminuye la relación entre la rigidez del remache y la rigidez de la placa, se produce una distribución de carga de remaches casi uniforme.

Por lo cual, se podría optar por el aumento de espesor de las placas de unión en un diseño de una unión remachada en el caso de que el aumento de peso por el espesor no supusiese un problema.

### 5.3 Uniones no balanceadas

Como ya sabemos, se define una unión no balanceada aquella en la que la relación entre espesor de adherentes y módulo de Young es la siguiente:

$$E_1 t_1 \neq E_2 t_2$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes

Es decir, los valores de rigideces de los adherentes superior e inferior son distintos pero iguales en toda la unión y provocan cambios en el reparto de carga.

Es preciso reseñar que, para el cálculo del desbalanceo entre adherentes se ha tenido en cuenta la siguiente ecuación:

$$k = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2}$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes

En nuestro caso, para uniones balanceadas se trata de una unión a solape doble (cortadura doble) en el que tanto el material de los adherentes como de los remaches se mantiene fijo y el espesor de adherente  $t_2$  es el parámetro que vamos a ir modificando para ver de qué forma afecta sobre el reparto de carga.

#### 5.3.1 Uniones no balanceadas de 5 filas de remaches.

En este caso, recordamos que tenemos un espesor de adherentes  $t_1$  y  $t_2$  de 4 mm y una zona central modelada como los remaches donde calculamos la carga con un espesor  $t_3$  de 0,4 mm suponiendo ello una diferencia de 10 veces entre los 2 espesores. Aplicamos sobre una línea vertical del adherente central ( $t_2$ ) una carga de 10 MPa, lo que serían 40 MPa porque se aplica sobre una línea de 4mm inicialmente pero en este caso variará ya que este espesor será el parámetro que se varía.

Se modelan los remaches con un módulo de Young de un material muy rígido como es el acero (2100000 MPa) igual al de los adherentes, y se obtienen los resultados realizando un estudio paramétrico definido en el apartado 4.3.5 en el que la variable de entrada que vamos a modificar será el espesor del adherente central ( $t_2$ ) manteniendo fija la rigidez de los adherentes y remaches.

En la siguiente Tabla 5-5 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que aumenta la rigidez de uno de los adherentes, es decir, a medida que aumenta el desbalanceo de la unión.

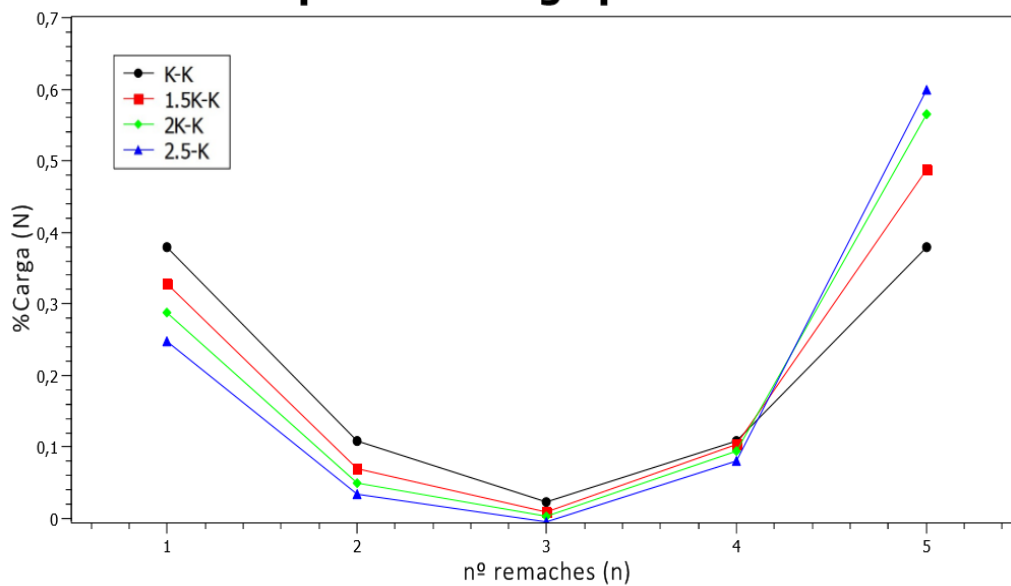
<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Relación rigidez entre adherentes</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k - k</i>	0,380	0,108	0,023	0,109	0,380
<i>1,5k - k</i>	0,328	0,070	0,010	0,104	0,488
<i>2k - k</i>	0,289	0,049	0,005	0,095	0,565
<i>2,5 k - k</i>	0,257	0,036	0,003	0,084	0,623

Tabla 5-5. %Carga por remache a medida que aumenta el desbalanceo de la unión

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 5 remaches:



## Reparto de carga por remache



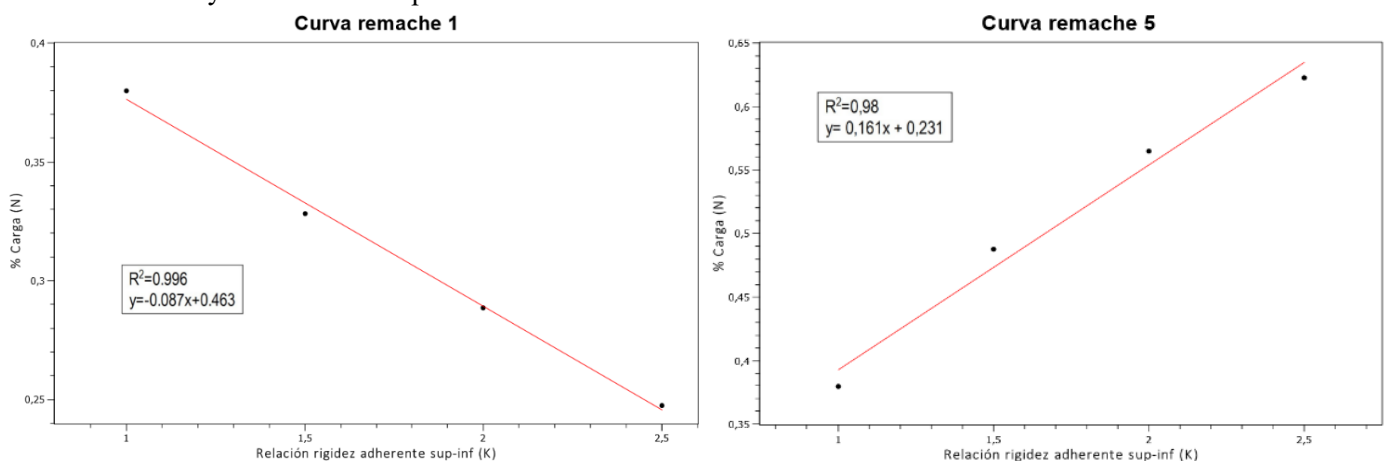
Grafica 5-10. Reparto de carga por remache en una no unión balanceada con 5 filas de remaches

Se aprecia en la Tabla 5-5 y en la Figura 5-10, que a medida que disminuye el espesor del adherente central ( $t_2$ ) la carga en los remaches 1-4 disminuye y en el remache 5 aumenta. Lo que ocurre es que, al aumentar el desbalanceo de la unión el remache nº 5 se comienza a sobrecargar respecto al resto de remaches convirtiéndose en el remache crítico de la unión, por el cual tendremos más probabilidades de que se pueda producir el fallo de este si el desbalanceo para una misma carga aplicada hace que este remache se sobrecargue por encima de su tensión admisible, provocando el fallo del remache y, por tanto, de la unión.

Es preciso reseñar que de acuerdo con Niu, es importante tener en cuenta el grado desbalanceo de la unión ya que va a modificar el reparto de carga de manera considerable y, por tanto, puede ocurrir que a una tensión menor se produzca el fallo de la unión antes de lo que se preveía.

Destacar que, actualmente son frecuentes las uniones entre distintos tipos de metal o incluso entre metal-composite los cuáles tienen distintos valores de rigidez provocando un grado de desbalanceo. Por lo que el grado de desbalanceo se debe tener muy en cuenta, ya que hemos comprobado que modificará el reparto de carga convirtiendo al remache más extremo de la zona de solape como el remache más crítico, pudiendo sobrecargarse por encima de su tensión admisible y por tanto provocando el fallo catastrófico de la unión.

En las siguientes gráficas se muestra la curva de carga para el remache 1 y 5, los cuales son el remache más favorable y desfavorable respectivamente.

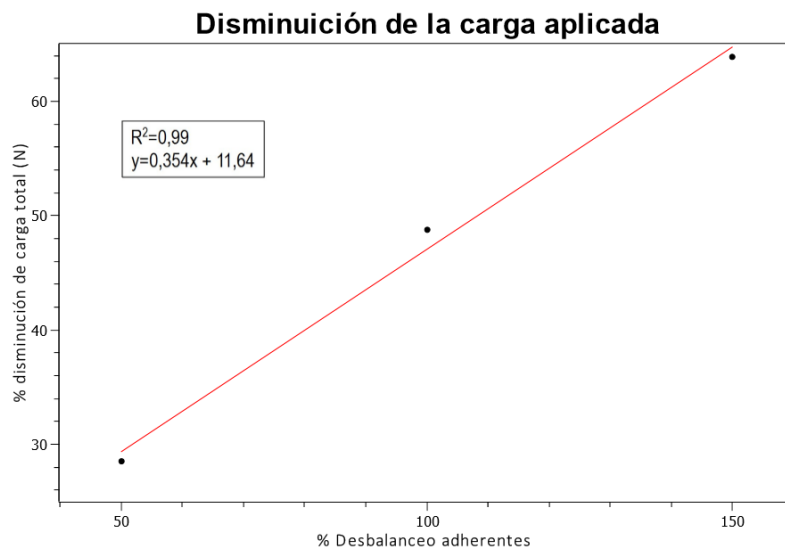


Graficas 5.11. Curva para remache favorable y desfavorable respectivamente

Como se observa, en estas gráficas queda reflejada la dependencia lineal de la carga que pasa por estos remaches (favorable y desfavorable) cuando aumenta el desbalanceo entre adherentes.

Con estas curvas obtenemos la ecuación para cada remache, con la que dependiendo del valor de la relación de rigidez entre el adherente superior e inferior (desbalanceo) podremos calcular la carga que está soportando cada remache para la carga aplicada en la unión, y evaluar para cada "hipotético" material si ese nivel de carga provocaría superar la tensión admisible del remache, lo que como sabemos, provocaría el fallo del remache y, por tanto, de la unión.

En la siguiente gráfica se muestra la curva de disminución de carga aplicada en la que se ha tenido en cuenta el remache más crítico y desfavorable (remache nº 5).



*Graficas 5-12. Disminución de la carga aplicada*

Es preciso reseñar que sería adecuado limitar la carga que se aplica a la unión de acuerdo a la carga que pasa por el remache 5 siendo el que más carga soporta conforme aumenta el desbalanceo como se observa en la Gráfica 5-9, ya que la carga se va del lado del material más flexible y al tratarse de un problema elástico-lineal un aumento del 20% en la carga que pasa por el remache provocaría el fallo de este a un 20% de carga antes.

Esto supone que para mantener el mismo nivel de carga y no superar la tensión admisible se tendría que disminuir la carga total aplicada a la unión en un 20% debido a que el problema es elástico-lineal.

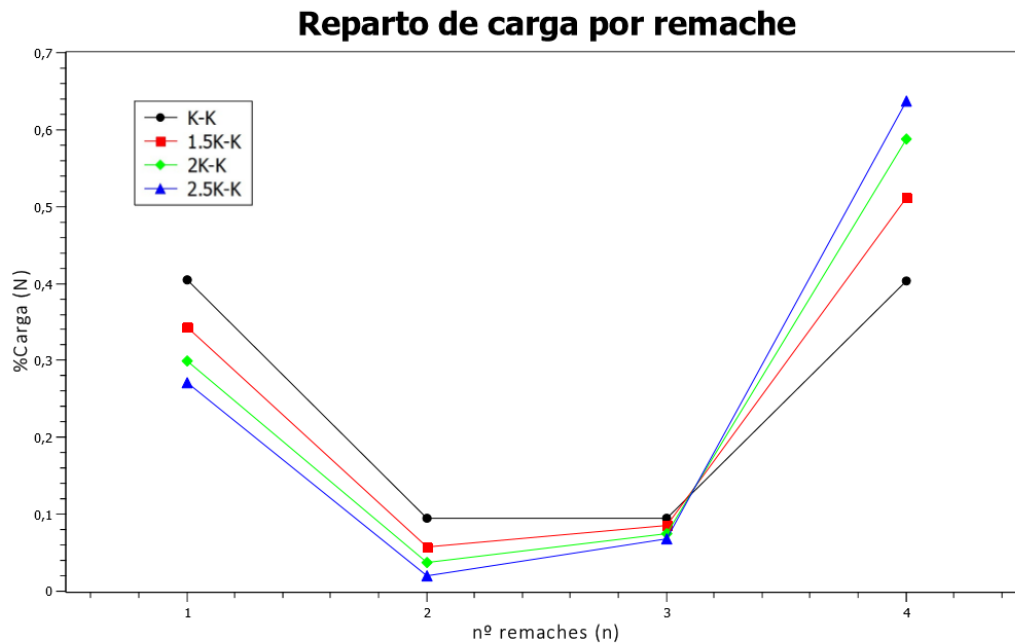
### 5.3.2 Uniones no balanceadas de 4 filas de remaches.

Para este caso se ha realizado el mismo estudio que para la unión con 5 filas de remaches variando únicamente el número de remaches. En la siguiente Tabla 5-6 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que aumenta la rigidez de uno de los adherentes, es decir, a medida que aumenta el desbalanceo de la unión.

<i>nº remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Rigidez adherentes</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k - k</i>	0,405	0,095	0,096	0,404
<i>1,5k - k</i>	0,344	0,058	0,086	0,512
<i>2k - k</i>	0,299	0,038	0,075	0,588
<i>2,5 k - k</i>	0,281	0,021	0,070	0,661

*Tabla 5-6. %Carga por remache a medida que aumenta el desbalanceo de la unión*

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 4 remaches:

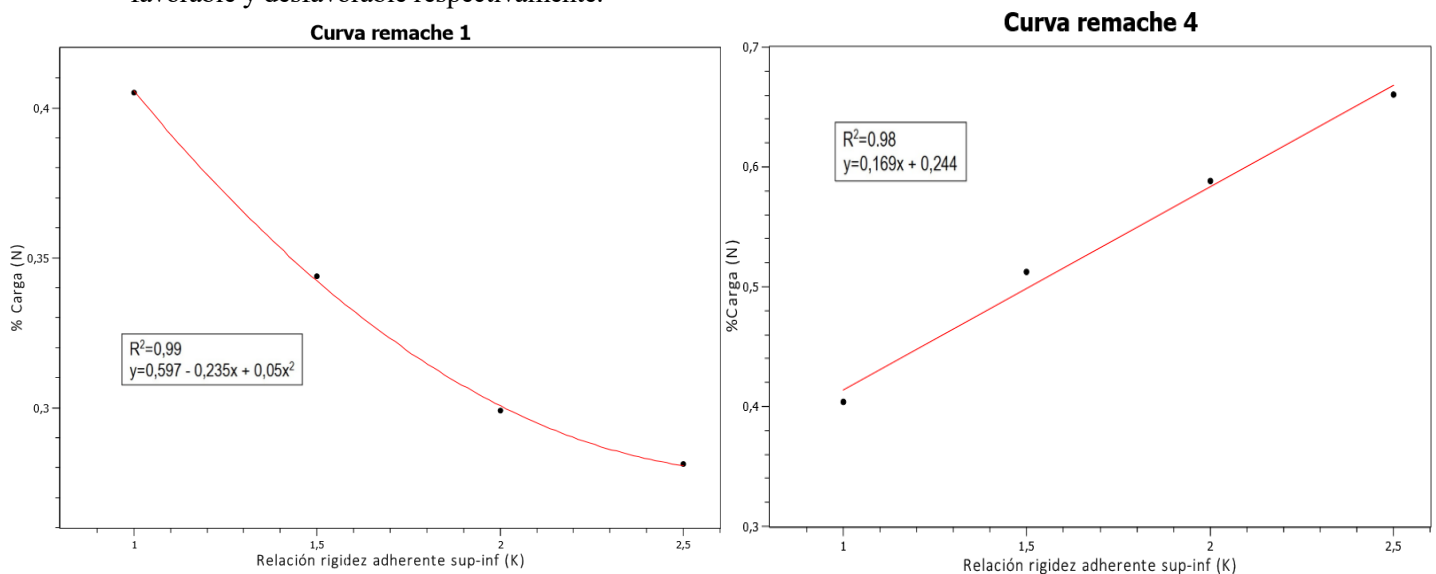


Grafica 5-13. Reparto de carga por remache en una no unión balanceada con 4 filas de remaches

Se aprecia en la Tabla 5-6 y en la Figura 5-13, que a medida que disminuye el espesor del adherente central ( $t_2$ ) la carga en los remaches 1-3 disminuye y en el remache 4 aumenta. Lo que ocurre es que, al aumentar el desbalanceo de la unión el remache nº 4 se comienza a sobrecargar respecto al resto de remaches convirtiéndose en el remache crítico de la unión, por el cual tendremos más probabilidades de que se pueda producir el fallo de este si el desbalanceo para una misma carga aplicada hace que este remache se sobrecargue por encima de su tensión admisible, provocando el fallo del remache y, por tanto, de la unión.

En este caso, la observación es idéntica a la de la unión de 5 filas de remaches. Lo único que ocurre es que ahora el remache más desfavorable va a ser el remache nº 4 siendo preciso reseñar que de acuerdo con Niu, es importante tener en cuenta el grado desbalanceo de la unión ya que va a modificar el reparto de carga de manera considerable y, por tanto, puede ocurrir que a una tensión menor se produzca el fallo de la unión antes de lo que se preveía.

En las siguientes gráficas se muestra la curva de carga para el remache 1 y 4, los cuales son el remache más favorable y desfavorable respectivamente.

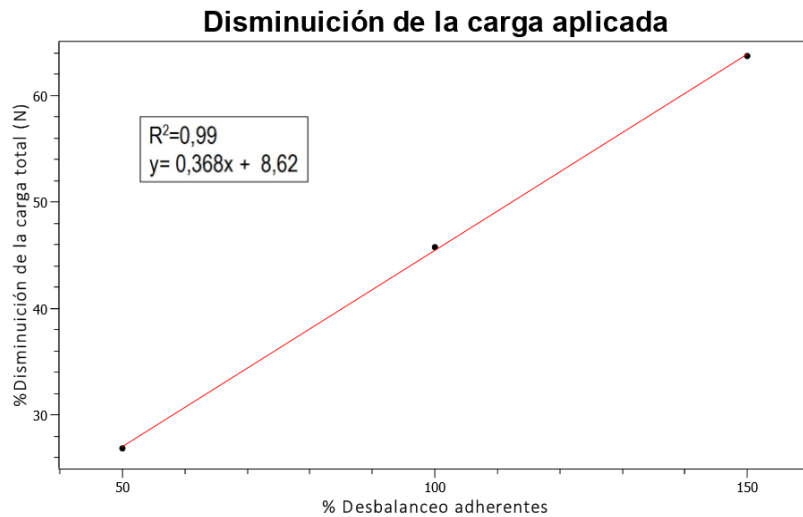


Graficas 5.14. Curva para remache favorable y desfavorable respectivamente

Como se observa, en estas gráficas queda reflejada la dependencia polinómica del remache favorable y lineal del remache desfavorable sobre la carga que pasa por estos remaches cuando aumenta el desbalanceo entre adherentes.

Con estas curvas obtenemos la ecuación para cada remache, con la que dependiendo del valor de la relación de rigidez entre el adherente superior e inferior (desbalanceo) podremos calcular la carga que está soportando cada remache para la carga aplicada en la unión, y evaluar para cada "hipotético" material si ese nivel de carga provocaría superar la tensión admisible del remache, lo que como sabemos, provocaría el fallo del remache y, por tanto, de la unión.

En la siguiente gráfica se muestra la curva de disminución de carga aplicada en la que se ha tenido en cuenta el remache más crítico y desfavorable (remache nº 4).



Grafica 5-15. Disminución de la carga aplicada

Es preciso volver a reseñar como en el caso de la unión de 5 remaches que sería adecuado limitar la carga que se aplica a la unión de acuerdo a la carga que pasa por el remache 4 siendo el que más carga soporta conforme aumenta el desbalanceo ya que la carga se va del lado del material más flexible, por lo que al tratarse de un problema elástico-lineal un aumento del 20% en la carga que pasa por el remache provocaría el fallo de este a un 20% de carga antes.

Esto supone que para mantener el mismo nivel de carga y no superar la tensión admisible se tendría que disminuir la carga total aplicada a la unión en un 20% debido a que el problema es elástico-lineal.

### 5.3.3 Uniones no balanceadas de 3 filas de remaches.

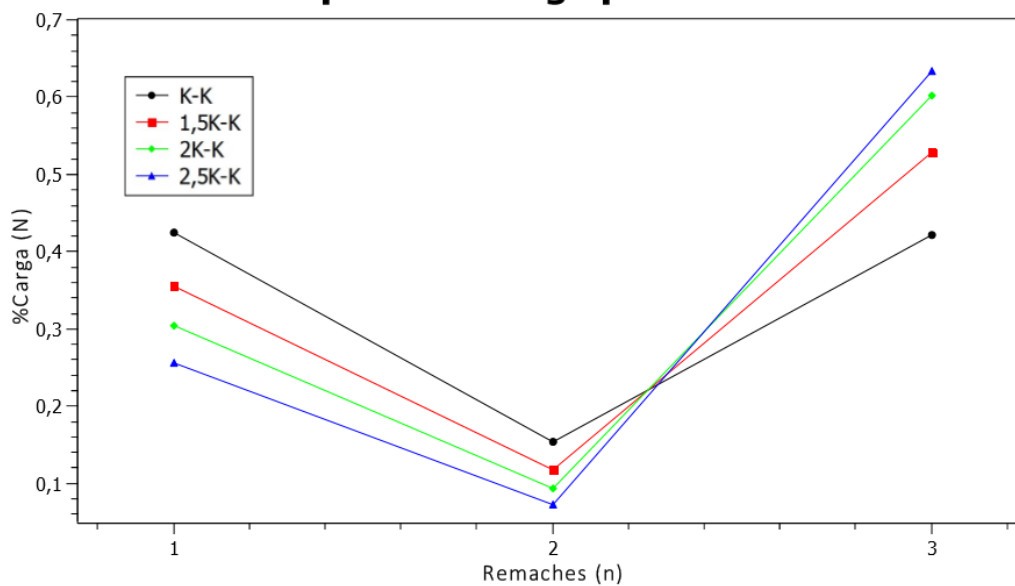
Para este caso se ha realizado el mismo estudio que para la unión con 5 filas de remaches variando únicamente el número de remaches. En la siguiente Tabla 5-7 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que aumenta la rigidez de uno de los adherentes, es decir, a medida que aumenta el desbalanceo de la unión.

<i>nº remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Rigidez adherentes</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k - k</i>	0,424	0,154	0,422
<i>1,5k - k</i>	0,355	0,118	0,528
<i>2k - k</i>	0,305	0,094	0,602
<i>2,5 k - k</i>	0,266	0,076	0,657

Tabla 5-7. %Carga por remache a medida que aumenta el desbalanceo de la unión

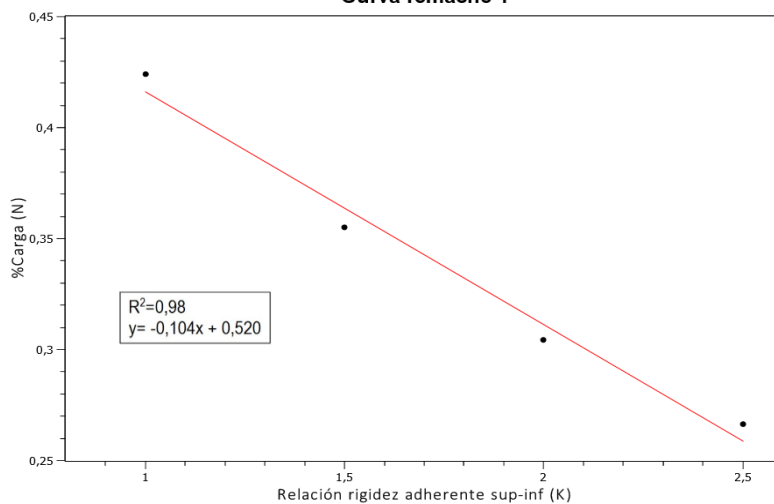
En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión de 3 remaches:

### Reparto de carga por remache

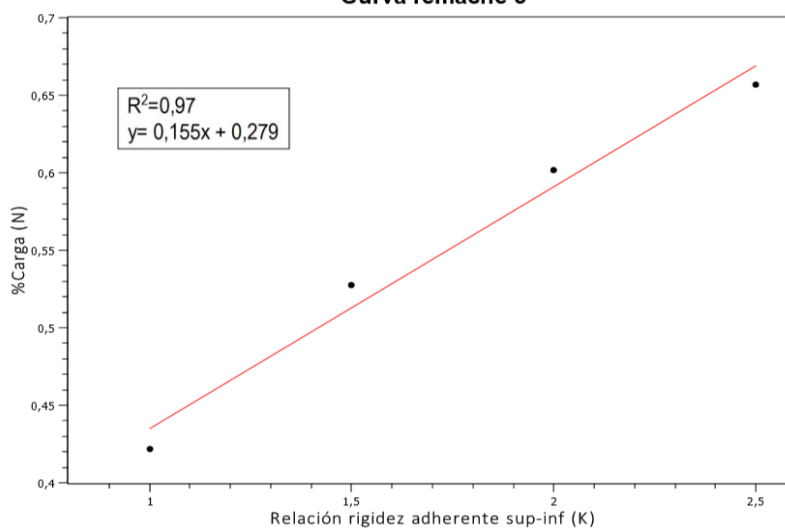


Grafica 5-16. Reparto de carga por remache en una no unión balanceada con 3 filas de remaches

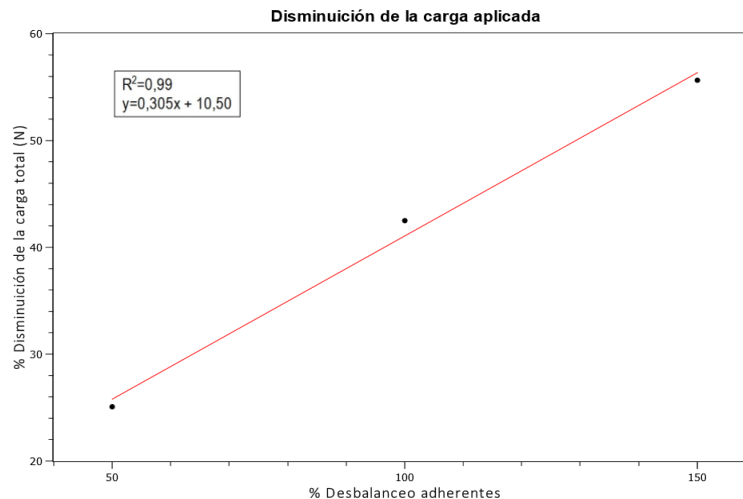
#### Curva remache 1



#### Curva remache 5



Graficas 5.17. Curva para remache favorable y desfavorable respectivamente



Graficas 5.18. Curva para remache favorable y desfavorable respectivamente

En este caso las observaciones de esta unión son idénticas a los casos de los apartados 5.3.2 y 5.3.1

## 5.4 Uniones escalonadas

Como ya sabemos, se define una unión escalonada como aquella en la que la rigidez a tracción de los adherentes varía a lo largo de toda la zona de solape, es decir, la relación entre espesor de adherentes y módulo de Young es la siguiente:

$$E_1 t_1 \neq E_2 t_2$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young de los adherentes y  $t_1$  y  $t_2$  son el espesor de adherentes el cual va variando a lo largo de la longitud de solape debido al escalonamiento como vemos en el apartado 4.4.2 del Capítulo 4 y que, inicialmente  $t_1 = t_2$ .

Es decir, los valores de rigideces de los adherentes izquierdo y derecho son distintos en toda la unión y provocan cambios constantes en cuanto a rigidez y afecta significativamente como ya veremos al reparto de carga.

### 5.4.1 Uniones escalonadas de 5 filas de remaches.

En este caso, recordamos que tenemos un espesor de adherentes  $t_1$  y  $t_2$  de 6 mm y una zona modelada como los remaches donde calculamos la carga con un espesor  $t_3$  de 0,4 mm suponiendo ello una diferencia de 15 veces entre los 2 espesores. Aplicamos sobre una línea vertical del adherente derecho una carga de 10 MPa, lo que serían 60 MPa porque se aplica sobre una línea de 6mm.

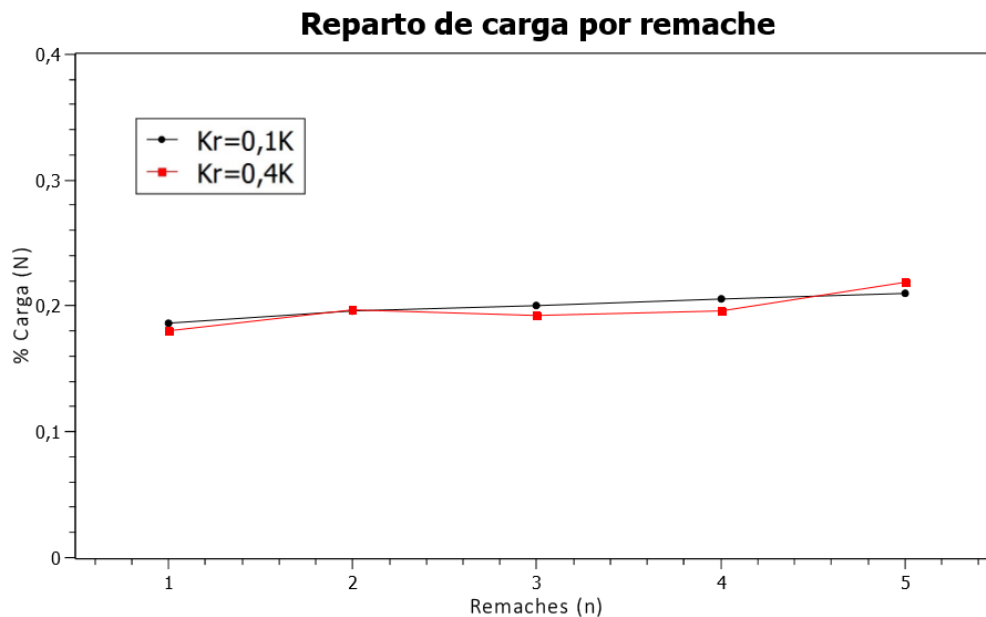
Se comienza modelando los materiales de los remaches con un módulo de Young de un material muy rígido como es el acero (2100000 MPa) igual al de los adherentes, y se obtienen los resultados realizando un estudio paramétrico definido en el apartado 4.4.5 en el que la variable de entrada que vamos a modificar será la rigidez del remache variando únicamente su módulo de Young, ya que sabemos que afecta directamente sobre la rigidez del remache y manteniendo fija la rigidez de los adherentes.

En la siguiente Tabla 5-8 se muestra el reparto de carga que pasa por cada remache a medida que disminuye la rigidez de estos o lo que es lo mismo, a medida que aumenta la flexibilidad de los remaches.

<i>n° remache (n)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Rigidez remaches</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>	<i>% de carga</i>
<i>k=kr</i>	10,870	11,700	11,240	11,520	14,650
<i>0,4k=kr</i>	0,176	0,197	0,193	0,196	0,237
<i>0,1k=kr</i>	0,187	0,196	0,193	0,196	0,237

Tabla 5-8. %Carga por remache a medida que varía la rigidez del remache

En la siguiente gráfica observamos el reparto de carga por remache para la unión escalonada de 5 remaches:



Grafica 5-19. Reparto de carga por remache en una unión escalonada

Como sabemos, en este tipo de uniones la rigidez a tracción de los adherentes varía a lo largo de toda la zona de solape, provocando cambios constantes en cuanto a rigidez de los adherentes y afectando al reparto de carga de manera que, se pasa de una no uniformidad en el reparto carga a un reparto de carga uniforme (equitativo) en toda la longitud de solape independientemente del valor de rigidez a cortadura del remache.

Entonces, se puede afirmar que un cuidadoso escalonado de las placas a unir suponiendo en la práctica una reducción progresiva de la rigidez total de la pieza, puede generar una unión con más de cuatro filas de remaches en las que todos transmiten el mismo nivel de carga. Por lo cual esta situación es deseable, puesto que todos los remaches están igualmente solicitados, pero lógicamente encarece la ejecución de la unión.

Por tanto, este diseño de uniones se escogerá en caso de que el diseño y ejecución de la unión no sean un problema económicamente hablando.

Es preciso reseñar que, no se han presentado ecuaciones ni gráficas para cada remache ya que al estar igualmente solicitados independientemente del valor de rigidez a cortadura de los mismos las gráficas y ecuaciones consisten en una línea horizontal.

## 6 ENSAYO EXPERIMENTAL PARA MEDIDA DE RIGIDEZ A CORTADURA DE REMACHES

En este capítulo vamos a describir el ensayo experimental realizado para determinar la rigidez a cortadura de una unión a solape doble con materiales de aluminio 2024 T3 para placas y remaches inclusive.

### 6.1 Objetivo

Con este ensayo experimental se pretende encontrar una relación entre el módulo de elasticidad real que tienen los materiales con el módulo de elasticidad analítico que se introduce en el programa de elementos finitos.

### 6.2 Probeta a tracción

Se ha fabricado una probeta de una unión a solape doble unida mediante 2 remaches en la que tanto los adherentes como los remaches son de Aluminio 2024-T3, en el apartado 2.5.1.1 quedan definidas las características de este material.

A continuación, se presenta en la tabla 7-1 sus medidas geométricas para conocer numéricamente las características geométricas de la probeta y se define cada parámetro para identificarlos.

<i>Características geométricas</i>	
<b>Medidas (mm)</b>	<b>mm</b>
$l_1$	260
$l_2$	15
$l_3$	15
$l_s$	45
$t_1$	5
$t_2$	10
$d$	6

Tabla 6-1. Características geométricas de la unión a solape doble

Se define entonces cada parámetro:

- $l_1$ , longitud de los adherentes
- $l_2$ , distancia entre remaches a lo largo de la zona de solape
- $l_3$ , distancia remaches del extremo izquierdo al borde del adherente
- $l_s$ , longitud de la zona de solape
- $t_1$ , espesor de adherente superior e inferior
- $t_2$ , espesor de adherente central
- $t_3$ , espesor de la zona modelada como los remaches
- $d$ , diámetro de los remaches



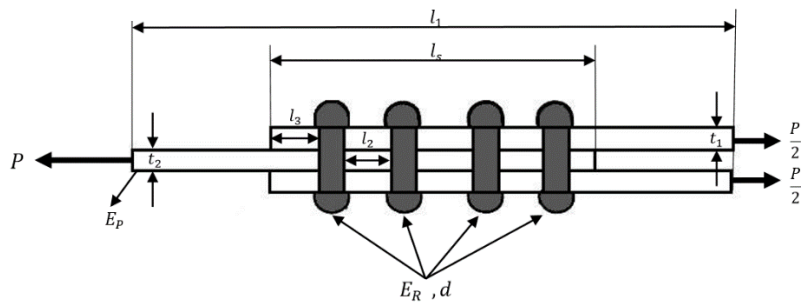


Figura 6-1. Parámetros geométricos de la probeta a tracción

En las siguientes figuras vemos la probeta finalizada y sus materiales por separado:

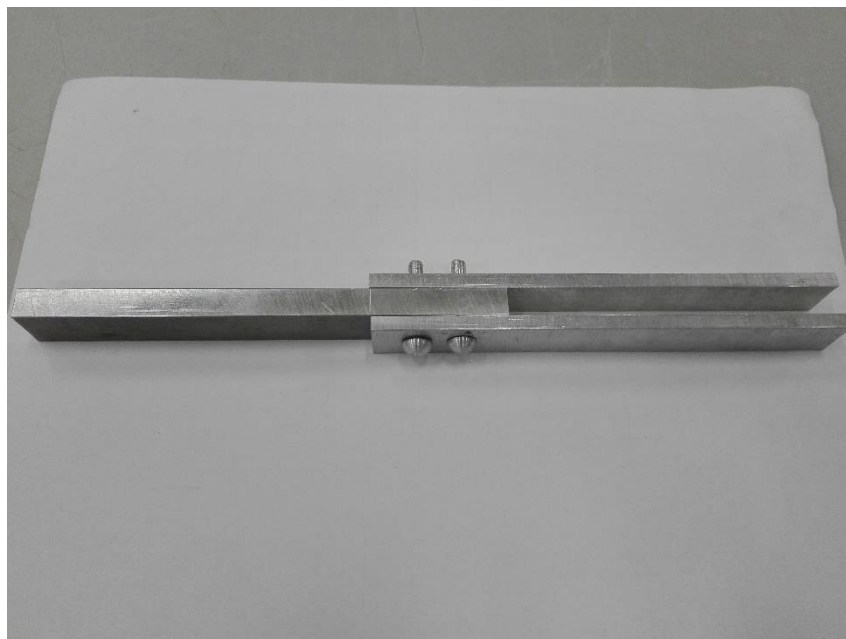


Figura 6-2. Aspecto general de la probeta

### 6.3 Procedimiento del ensayo

La probeta se coloca en una máquina de ensayos INSTRON 4482 la cual tiene un útil para realizar el ensayo a cortadura de una unión. Dicho útil lo que tiene es un adaptador sujetado por las mordazas, que mediante un pequeño bulón que se introduce en un taladro que se realiza en uno de los lados de la unión mientras que la otra parte se sujeta directamente con las mordazas de la máquina de ensayos. Este montaje lo vemos en la figura siguiente:

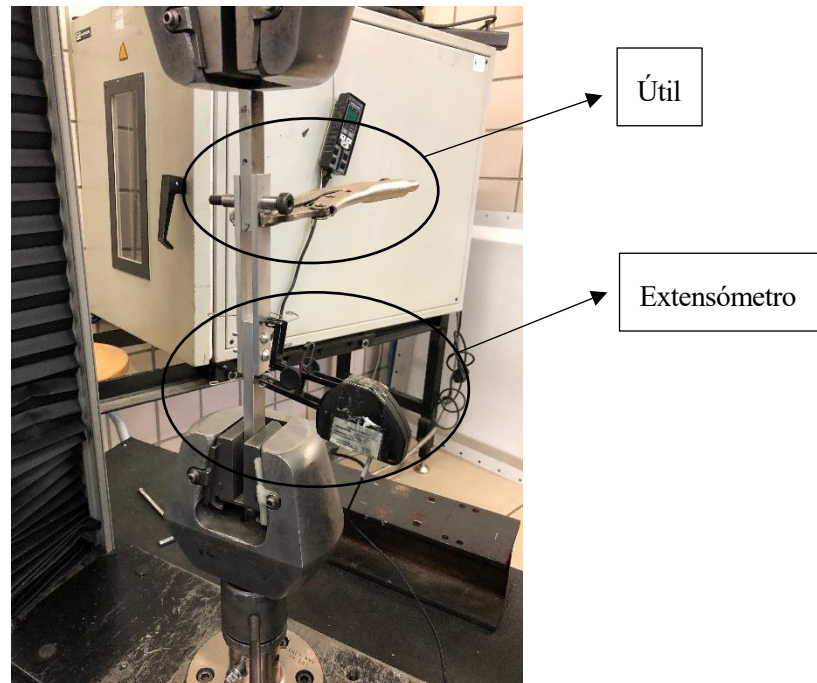


Figura 6-3. Montaje de la probeta en la máquina de ensayos

Además, se coloca un extensómetro a 2.5 mm de cada lado del solape para medir el desplazamiento entre 2 puntos para una determinada carga dada.

Lo que se realiza entonces es un ensayo de cortadura, en el que vamos aplicando carga poco a poco y midiendo los desplazamientos con el extensómetro obteniendo así una nube de puntos (Carga-Extensión) de la cual seleccionaremos una carga-extensión para analizarlo mediante MEF.

### 6.4 Resultados

Una vez que tenemos la nube de puntos, seleccionamos el punto para el cual se aplicó una carga de 16991 N y teníamos un desplazamiento de 2 mm entre los dos puntos.

Para obtener la carga que hay que aplicar en el modelo de elementos finitos hay que pasarla a fuerza por unidad de superficie (MPa) para lo que necesitamos el ancho y espesor de la placa real. Calculándose de la siguiente forma:

$$Tensión (MPa) = \frac{Carga\ aplicada}{Ancho\ x\ espesor} = \frac{20000\ N}{20\ mm\ x\ 10\ mm} = 100\ MPa$$

Una vez que tenemos esto, utilizamos el modelo de elementos finitos para la unión a solape doble modificado para 2 remaches y con las mismas medidas que tenemos en la probeta de ensayo, dentro del programa mediante una secuencia de órdenes que se adjunta en el anexo I (apartado 1.3) se realiza lo siguiente:

1. Aplicamos la carga y solucionamos.
2. Medimos el desplazamiento entre estos nodos

3. Se vuelve a realizar los 2 pasos anteriores cambiando el módulo de Young de los remaches hasta encontrar el mismo desplazamiento que se produce en la realidad para esta carga dada.

En nuestro caso el módulo de Young que necesitamos poner para producir un desplazamiento de 2 mm. Entre 2 nodos del modelo es de 19 MPa frente a los 73000 MPa que tiene el aluminio en la realidad, esto último lo analizamos en detalle en el apartado 6.5 de conclusiones.

## 6.5 Conclusiones

Como observamos, para la carga de 16991 N se obtiene un desplazamiento de 2 mm. en el ensayo experimental, pero hay que tener en cuenta que por ejemplo en el modelo de Ansys no se ha podido tener en cuenta factores como holguras entre remache y agujero, también que los remaches en nuestro caso no estaban cerrados.

Todo esto da lugar a errores que se van arrastrando y por tanto el desplazamiento no sería 2mm. para ese nivel de carga lo que conllevaría probablemente a un aumento en el módulo de Young que deberíamos introducir en el programa.

## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

A continuación, se van a presentar las conclusiones, en base a los objetivos marcados en un principio:

-Se ha comprendido y aplicado la metodología de trabajo necesaria para realizar simulaciones en elementos finitos, particularmente con el software Ansys, utilizando lenguaje de programación APDL.

-Se ha conseguido modelar satisfactoriamente 2 tipos de uniones remachadas en geometría 2D en un programa en elementos finitos, algo a priori complejo debido a las simplificaciones que se tienen que realizar. Gracias a un estudio en profundidad de las capacidades que ofrecía Ansys y su aplicación para el modelado de uniones remachadas, se ha llegado a un modelo robusto, que puede suponer una base para trabajos futuros.

-La programación en lenguaje APDL y su parametrización permiten un fácil acceso y comprensión del modelo.

-Estos modelos permiten tener en cuenta tanto materiales convencionales como materiales compuestos de manera robusta.

-Las simulaciones llevadas a cabo han permitido obtener parámetros importantes como la influencia de la rigidez de los remaches y el espesor de adherentes en el reparto de carga de los 2 tipos de uniones que se han modelado reproduciendo los resultados que se muestran en la bibliografía de referencia [1].

-Se pone a disposición un modelo que permite conocer el porcentaje de carga que pasa por cada fila de remaches en una unión remachada, y que a su vez permite tanto el diseño de uniones remachadas en estructuras aeronáuticas como el diseño de utillaje que tiene una unión remachada.

-Se ha realizado una parametrización con curvas de ajuste para calcular la carga que pasa por cada remache.

-Como trabajo futuro se propone conseguir una correlación de la rigidez real con la rigidez analítica que hay que introducir en el programa de elementos finitos para reproducir lo que ocurre en la realidad.

# ANEXO 1. CÓDIGOS APDL DE LOS MODELOS DE FEM

## 1.1 Código APDL para el modelo de uniones a solape doble

Como sabemos tenemos uniones de 3,4 y 5 remaches por lo que a continuación presentaremos sus códigos de Ansys

### 1.1.1 Código APDL para el modelo de unión a solape doble de 5 remaches

```

/PREP7                                ! PREPROCESSOR
=====
!Todas las dimensiones en mm y cargas en MPa (tensiones en N)
=====
L1=100                                ! Definición de longitudes características de la unión
L2=55
L3=2*L1-L2
L4=45
L5=50
L6=55
L7=60
L8=65
L9=70
L10=75
L11=80
L12=85
L13=90
L14=95
T1=4
T2=4
T3=0.4

!TIPO DE ELEMENTO                     ! Definición de elemento de las placas y remaches
ET,1,PLANE182
MP,EX,1,210000                         ! Definición del material de las placas
MP,PRXY,1,0.3
MP,EX,2,210000                         ! Definición del material de los remaches
MP,PRXY,2,0.3

RECTNG,L4,L3,0,T2                      ! Geometría
RECTNG,0,L1,T2+T3,T1+T2+T3
RECTNG,L5,L6,T2,T2+T3
RECTNG,L7,L8,T2,T2+T3

```

```
RECTNG,L9,L10, T2,T2+T3
RECTNG,L11,L12, T2,T2+T3
RECTNG,L13,L14, T2,T2+T3
```

```
esize,0.1 ! Tamaño de malla
```

```
MAT,2 ! Mallado de los remaches
AMESH,3,7,1
```

```
MAT,1 ! Mallado de los adherentes
AMESH,1,2
```

```
NUMMRG,NODE ! Aproxima los nodos para que coincidan en el mallado
```

```
DL,1,,SYMM ! Condiciones de contorno (simetría)
DL,8,,SYMM
SFL,2,PRES,-10 ! Cargas
ALLSEL
```

```
/SOL ! Obtener la solución
```

```
/STATUS,SOLU
```

```
SOLVE,
```

```
/POST1 ! Obtener resultados
```

```
=====
!Obtener la resultante de carga en cada remache
=====
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 1
```

```
ESEL,S,ELEM,,51,100,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,107,254,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,54,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 2
```

```
ESEL,S,ELEM,,251,300,1,
```

NSEL,S,NODE,,362,509,3,

NSEL,A,NODE,,309,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 3

ESEL,S,ELEM,,451,500,1,

NSEL,S,NODE,,617,764,3,

NSEL,A,NODE,,564,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 4

ESEL,S,ELEM,,651,700,1,

NSEL,S,NODE,,872,1019,3,

NSEL,A,NODE,,819,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 5

ESEL,S,ELEM,,851,900,1,

NSEL,S,NODE,,1127,1274,3,

NSEL,A,NODE,,1074,

FSUM,,

**1.1.2 Código APDL para el modelo de unión a solape doble de 4 remaches**

```

/PREP7                                ! PREPROCESSOR

=====

!Todas las dimensiones en mm y cargas en MPa (tensiones en N)
=====

L1=100                                ! Definición de longitudes características de la unión
L2=60
L3=2*L1-L2
L4=40
L5=45
L6=50
L7=60
L8=65
L9=75
L10=80
L11=90
L12=95

T1=4
T2=4
T3=0.4

!TIPO DE ELEMENTO                    ! Definición de elemento de las placas y remaches
ET,1,PLANE182
MP,EX,1,210000                       ! Definición del material de las placas
MP,PRXY,1,0.3
MP,EX,2,210000                       ! Definición del material de los remaches
MP,PRXY,2,0.3

RECTNG,L4,L3,0,T2                    ! Geometría
RECTNG,0,L1,T2+T3,T1+T2+T3
RECTNG,L5,L6,T2,T2+T3
RECTNG,L7,L8,T2,T2+T3
RECTNG,L9,L10,T2,T2+T3
RECTNG,L11,L12,T2,T2+T3

esize,0.1                            ! Tamaño de malla

MAT,2                                 ! Mallado de los remaches
AMESH,3,7,1

MAT,1                                 ! Mallado de los adherentes
AMESH,1,2

```



```
NUMMRG,NODE          ! Aproxima los nodos para que coincidan en el mallado

DL,1,,SYMM           ! Condiciones de contorno (simetría)
DL,8,,SYMM
SFL,2,PRES,-10      ! Cargas
ALLSEL

/SOL                 ! Obtener la solución

/STATUS,SOLU

SOLVE,
/POST1              ! Obtener resultados
=====
!Obtener la resultante de carga en cada remache
=====

!SACAR RESULTANTE REMACHE 1

ESEL,S,ELEM,,51,100,1,

NSEL,S,NODE,,107,254,3,
NSEL,A,NODE,,54,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 2

ESEL,S,ELEM,,251,300,1,

NSEL,S,NODE,,362,509,3,
NSEL,A,NODE,,309,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 3

ESEL,S,ELEM,,451,500,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,617,764,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,564,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 4
```

```
ESEL,S,ELEM,,651,700,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,872,1019,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,819,
```

```
FSUM,,
```

### 1.1.3 Código APDL para el modelo de unión a solape doble de 3 remaches

```
/PREP7
```

```
! PREPROCESSOR
```

```
=====
```

```
!Todas las dimensiones en mm y cargas en MPa (tensiones en N)
```

```
=====
```

```
L1=100
```

```
! Definición de longitudes características de la unión
```

```
L2=60
```

```
L3=2*L1-L2
```

```
L4=40
```

```
L5=47.5
```

```
L6=52.5
```

```
L7=67.5
```

```
L8=72.5
```

```
L9=87.5
```

```
L10=92.5
```

```
T1=4
```

```
T2=4
```

```
T3=0.4
```

```

!TIPO DE ELEMENTO           ! Definición de elemento de las placas y remaches
ET,1,PLANE182
MP,EX,1,210000             ! Definición del material de las placas
MP,PRXY,1,0.3
MP,EX,2,210000             ! Definición del material de los remaches
MP,PRXY,2,0.3

RECTNG,L4,L3,0,T2         ! Geometría
RECTNG,0,L1,T2+T3,T1+T2+T3
RECTNG,L5,L6,T2,T2+T3
RECTNG,L7,L8,T2,T2+T3
RECTNG,L9,L10,T2,T2+T3

esize,0.1                 ! Tamaño de malla

MAT,2                      ! Mallado de los remaches
AMESH,3,7,1

MAT,1                      ! Mallado de los adherentes
AMESH,1,2

NUMMRG,NODE               ! Aproxima los nodos para que coincidan en el mallado

DL,1,,SYMM                ! Condiciones de contorno (simetría)
DL,8,,SYMM
SFL,2,PRES,-10           ! Cargas
ALLSEL

/SOL                       ! Obtener la solución

/STATUS,SOLU

SOLVE,
/POST1                     ! Obtener resultados
=====
!Obtener la resultante de carga en cada remache
=====

!SACAR RESULTANTE REMACHE 1

ESEL,S,ELEM,,51,100,1,

NSEL,S,NODE,,107,254,3,
NSEL,A,NODE,,54,

FSUM,,

```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 2
```

```
ESEL,S,ELEM,,251,300,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,362,509,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,309,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 3
```

```
ESEL,S,ELEM,,451,500,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,617,764,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,564,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 4
```

```
ESEL,S,ELEM,,651,700,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,872,1019,3,
```

```
NSEL,A,NODE,,819,
```

```
FSUM,,
```

## 1.2 Código APDL para el modelo de unión escalonada

/PREP7

! PREPROCESSOR

=====

!Todas las dimensiones en mm y cargas en MPa (tensiones en N)

=====

L1=100

*! Definición de longitudes características de la unión*

L2=90

L3=80

L4=70

L5=60

L6=50

L7=2\*L1-L6

L8=52

L9=58

L10=62

L11=68

L12=72

L13=78

L14=82

L15=88

L16=92

L17=98

T1=12

T2=1

T3=0.6

!TIPO DE ELEMENTO

*! Definición de elemento de las placas y remaches*

ET,1,PLANE182

MP,EX,1,210000

*! Definición del material de las placas*

MP,PRXY,1,0.3

MP,EX,2,210000

*! Definición del material de los remaches*

MP,PRXY,2,0.3

!CREACIÓN ADHERENTE IZQUIERDO

K,1,0,0,0

*! Geometría adherente izquierdo*

K,2,L6,0,0

K,3,L6,T2,0

K,4,L5,T2,0

K,5,L5,2\*T2,0

K, 6, L4, 2\*T2, 0  
 K, 7, L4, 3\*T2, 0  
 K, 8, L3, 3\*T2, 0  
 K, 9, L3, 4\*T2, 0  
 K, 10, L2, 4\*T2, 0  
 K, 11, L2, 5\*T2, 0  
 K, 12, L1, 5\*T2, 0  
 K, 13, L1, 6\*T2, 0  
 K, 14, 0, 6\*T2, 0  
 A, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 1

!CREACIÓN ADHERENTE DERECHO

K, 15, L7, 0, 0 *! Geometría adherente derecho*  
 K, 16, L6+ 0.2, 0, 0  
 K, 17, L6+ 0.2, T3, 0  
 K, 18, L5+ 0.2, T3, 0  
 K, 19, L5+ 0.2, 1+T3, 0  
 K, 20, L4+ 0.2, 1+T3, 0  
 K, 21, L4+ 0.2, 2+T3, 0  
 K, 22, L3+ 0.2, 2+T3, 0  
 K, 23, L3+ 0.2, 3+T3, 0  
 K, 24, L2+ 0.2, 3+T3, 0  
 K, 25, L2+ 0.2, 4+T3, 0  
 K, 26, L1+ 0.2, 4+T3, 0  
 K, 27, L1+ 0.2, 6\*T2, 0  
 K, 28, L7, 6\*T2, 0  
 A, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 15

!CREACIÓN REMACHES

RECTNG, L8, L9, T3, 1 *! Geometría remaches*  
 RECTNG, L10, L11, 1+T3, 2  
 RECTNG, L12, L13, 2+T3, 3  
 RECTNG, L14, L15, 3+T3, 4  
 RECTNG, L16, L17, 4+T3, 5

esize, 0.2 *! Tamaño de malla*

MAT, 2 *! Mallado de los remaches*

AMESH, 3, 7, 1

MAT, 1 *! Mallado de los adherentes*

AMESH, 1, 2

NUMMRG, NODE *! Aproxima los nodos para que coincidan en el mallado*

```
DL,14,,SYMM           ! Condiciones de contorno (simetría)
DL,15,,SYMM
DL,1,,SYMM
SFL,28,PRES,-10      ! Cargas
ALLSEL

/SOL                 ! Obtener la solución

/STATUS,SOLU

SOLVE,
/POST1              ! Obtener resultados
=====
!Obtener la resultante de carga en cada remache
=====

!SACAR RESULTANTE REMACHE 1

ESEL,S,ELEM,,1,30,1

NSEL,S,NODE,,64,93,1,
NSEL,A,NODE,,33,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 2

ESEL,S,ELEM,,61,90,1,

NSEL,S,NODE,,157,186,1,
NSEL,A,NODE,,126,

FSUM,,

!SACAR RESULTANTE REMACHE 3

ESEL,S,ELEM,,121,150,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,250,279,1,
```

```
NSEL,A,NODE,,219,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 4
```

```
ESEL,S,ELEM,,181,210,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,343,372,1,
```

```
NSEL,A,NODE,,312,
```

```
FSUM,,
```

```
!SACAR RESULTANTE REMACHE 5
```

```
ESEL,S,ELEM,,241,270,1,
```

```
NSEL,S,NODE,,436,465,1,
```

```
NSEL,A,NODE,,405,
```

```
FSUM,,
```



### 1.3 Código APDL para el ensayo experimental

```

/PREP7                                !PREPROCESSOR

=====
!Todas las dimensiones en mm y cargas en MPa (tensiones en N)
=====

L1=100                                !Definición de longitudes características de la unión

L2=45
L3=2*L1-L2
L4=55
L5=69.5
L6=70.5
L7=87
L8=88

T1=4
T2=4
T3=0.4

!TIPO DE ELEMENTO                    !Definición de elemento de las placas y remaches
ET,1,PLANE182
MP,EX,1,73000                        !Definición del material de las placas
MP,PRXY,1,0.3
MP,EX,2,73000                        !Definición del material de los remaches
MP,PRXY,2,0.3

RECTNG,L4,L3,0,T2                    !Geometría
RECTNG,0,L1,T2+T3,T1+T2+T3
RECTNG,L5,L6,T2,T2+T3
RECTNG,L7,L8,T2,T2+T3

esize,0.1                            !Tamaño de malla

MAT,2                                !Mallado de los remaches
AMESH,3,7,1

MAT,1                                !Mallado de los adherentes
AMESH,1,2

NUMMRG,NODE                          !Aproxima los nodos para que coincidan en el mallado

DL,1,,SYMM                          !Condiciones de contorno (simetría)
DL,8,,SYMM
SFL,2,PRES,-100                      !Cargas

```

```
ALLSEL
```

```
/SOL ! Obtener la solución
```

```
/STATUS,SOLU
```

```
SOLVE,
```

```
/POST1 ! Obtener resultados
```

```
=====  
!Obtener el desplazamiento de cada nodo seleccionado  
=====
```

```
!SACAR DESPLAZAMIENTO NODO ZONA IZQUIERDA
```

```
ESEL,S,ELEM,,60926,
```

```
NSEL,S,NODE,,64087,
```

```
PRNSOL,U,X
```

```
!SACAR DESPLAZAMIENTO NODO ZONA DERECHA
```

```
ESEL,S,ELEM,,20876,
```

```
NSEL,S,NODE,,21096,
```

```
PRNSOL,U,X
```

# REFERENCIAS

---

- [1] Michael C.Y. Niu, «Airframe Structural Design» *Libro técnico*, 1995
- [2] H. Huth. «Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints». *Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints*, ASTM STP927, pag.221–250, 1986.
- [3] H. Huth. «Experimental determination of fastener flexibilities». Darmstadt, 1983.
- [4] L. Jarfall. «Shear loaded fastener installations». Saab-Scania, 1983
- [5] M. B. Tate and S. J. Rosenfeld. Preliminary investigation on loads carried by individual bolts in bolted joints. Technical Report TN-1051, National Advisory Committee for Aeronautics, 1946.
- [6] A. Skorupa and M. Skopura. «Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage».
- [7] J.L. Clarke. Chapman & Hall. *Structural Design of Polymer Composites*. Eurocomp Design Code and Handbook. 1996.
- [8] A. Barroso and J. Cañas. *Apuntes de uniones adhesivas y remachadas*. Sevilla, 2017.
- [9] Sun CT. *Mechanics of aircraft structures*. New York: John Wiley and Sons; 2006
- [10] National Advisory Committee for Aeronautics. *The load distribution for bolted or riveted joints in light alloy structures*. Washington, April 1947
- [11] P. Ariza, *Método de los elementos finitos*. Introducción a ANSYS. 1999.

