



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE SUJECCIÓN PARA VÍAS DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA



Autor: Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

**Directores: Federico Gutiérrez-Solana Salcedo
Juan Antonio Polanco Madrazo**

Santander, Mayo 2006

CAPÍTULO 8

CONTROL DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

1. GENERALIDADES

Optimizado el sistema de sujeción y analizado el comportamiento individual de los componentes del sistema de sujeción, ahora corresponde realizar un exhaustivo examen para conocer el comportamiento del conjunto completo.

En este capítulo, se intenta conocer el comportamiento global del sistema, para lo cual se analizan los resultados obtenidos en ensayos realizados sobre conjuntos íntegros, comprobando la influencia que, sobre las variables medidas, pueden tener los diferentes parámetros de la sujeción.

También se han realizado montajes conjuntos de diferentes componentes que simulan el sistema completo para poder estudiar posibles interrelaciones entre dos o más elementos del sistema, o la influencia que sobre ellos pudiera tener algún agente externo, como puede ser la humedad o el par de apriete.

Para el estudio global del conjunto, se parte de los resultados obtenidos con las configuraciones 3, 4 y 7 (apartados 4.3, 4.4 y 4.7 del capítulo 5, respectivamente). En las tres configuraciones se emplean los elementos optimizados en el capítulo 6, salvo la placa acodada híbrida de la configuración 4 y la placa de asiento modelo C1 de la configuración 7. La configuración 4 se mantiene en el análisis, en el que sólo intervienen componentes optimizados, ya que la envolvente exterior de la placa acodada híbrida es similar a la de la ligera y a priori no debería existir diferencias entre sus comportamientos. Por otro lado, en el capítulo 6 se comprobó la influencia de la rigidez inicial de la placa de asiento en su propio deterioro, por tanto, se ha querido comprobar este hecho introduciendo en el análisis una placa de menor rigidez que las elegidas para la sujeción óptima.

El análisis, se completa con los resultados obtenidos con otras siete nuevas configuraciones (números del 10 al 16) en las que se mantuvo el anclaje tipo VAPE y se fueron variando los suministradores de las placas acodadas ligeras A2, placas de asiento, traviesas y clips.

2. CARACTERIZACIÓN DE NUEVAS CONFIGURACIONES CON COMPONENTES OPTIMIZADOS

La caracterización de las diferentes configuraciones, se realizó empleando la metodología descrita en el capítulo 4.

La selección de los diferentes componentes que integran cada una de las configuraciones se realizó en base a dos criterios. El primero de ellos consistió en intentar englobar la totalidad de variantes existentes para cada uno de los elementos, ya fueran modelos o fabricantes diferentes, mientras que el segundo obedeció al intento de aclarar algún resultado anómalo obtenido por la configuración precedente. Este segundo criterio obligó a definir la composición de cada una de las configuraciones una vez caracterizada la anterior.

2.1. CONFIGURACIÓN N° 10

En esta primera configuración se decidió colocar la placa de asiento modelo A, ya que no se había probado en los ensayos previos con el anclaje VAPE. Además, como novedad, también, se introdujo la placa acodada del fabricante D.

En la Tabla 8.1, se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 10.

Tabla 8.1.- Componentes de la configuración n° 10

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante D, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con esta configuración son los siguientes [117]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^o/3^{er}$ ensayo): 20.64 kN/ 20.47 kN/ 20.01 kN
 - Fuerza de apriete media: 20.37 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 91.54 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^o/3^{er}/4^o$ ensayo): 9.17 kN/ 10.03 kN/ 10.05 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 9.75 kN

- Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): 1.55 mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): 1.55 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): 0.08 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): 0.19 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): 0.71 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): 0.79 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 1.5 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son superiores a 1 mm, mientras que los del patín horizontal superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0)
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 16.93 kN/ 17.10 kN/ 17.24 kN
 - Fuerza de apriete media: 17.09 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 16.10 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F'):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 7.50 kN/ 8.22 kN/ 8.60 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 8.10 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 16.92 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

En la Tabla 8.2. aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 10.

Tabla 8.2.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 10

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=20.37$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} prev.	$k_s= 91.54$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=9.69$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{max}^c=1.55$; $D_{min}^c=1.55$ $D_{max}^{pv}=0.08$; $D_{min}^{pv}=0.19$ $D_{max}^{ph}=0.71$; $D_{min}^{ph}=0.79$ Perdida de espesor: 1.50 mm	Resultado incorrecto
F. apriete post.	$P'_0=17.09$ kN (16.10 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=8.10$ kN (16.92 %)	Resultado correcto

El hecho de que los desplazamientos remanentes tras el ensayo de carga inclinada superan los valores establecidos en la especificación, unido a que la rigidez P_0/P_{0+75} de la placa había descendido un 12.2 % respecto a los primeros ensayos realizados sobre la placa de asiento Modelo A en la configuración 2 (apartado 4.2 del capítulo 5), estableció la composición de la siguiente configuración, en la que se repitió la placa de asiento, intercambiando la placa acodada para asegurar que el posible fallo no era atribuible a la misma.

2.2. CONFIGURACIÓN Nº 11

En la segunda configuración se pretende evaluar de nuevo el comportamiento a fatiga de la placa Modelo A, introduciendo únicamente un cambio respecto a la anterior: la placa acodada, que fue inyectada por el fabricante B. En la Tabla 8.3 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 11.

Tabla 8.3.- Componentes de la configuración nº 11

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV

Componente	Descripción
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	Al-99, fabricante I
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [118]:

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 89.29 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: 88.86 kN/mm
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo permitido por la especificación de 150 kN/mm

- Dinámico de carga inclinada:
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D_{m\acute{a}x}^c$): 1.00 mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D_{m\acute{i}n}^c$): 1.08 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D_{m\acute{a}x}^{pv}$): 0.08 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D_{m\acute{i}n}^{pv}$): 0.11 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D_{m\acute{a}x}^{ph}$): 0.46 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D_{m\acute{i}n}^{ph}$): 0.42 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 1.50 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza superan la cota de 1 mm, mientras que los del patín son inferiores a los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: 108.27 kN/mm

- Aumento respecto al resultado original: 21.25 %
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.
- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
- Resultado: 94.87 kN/mm
 - Aumento respecto al resultado original: 6.76 %
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

En la Tabla 8.4. aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 11.

Tabla 8.4.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 11

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete previa	$P_0=18$ kN	impuesto
Rig. P_0/P_0+75 previa	$k_s= 89.29$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 previa	$k=88.86$ kN/mm	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{max}^c=1.00$; $D_{min}^c=1.08$ $D_{max}^{pv}=0.08$; $D_{min}^{pv}=0.11$ $D_{max}^{ph}=0.46$; $D_{min}^{ph}=0.42$ Pérdida de espesor: 1.50 mm	Resultado incorrecto
Rig. P_0/P_0+75 post.	$k'_s=95.04$ (5.75%)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$k'=108.27$ (21.84 %)	Resultado correcto

Los resultados obtenidos confirmaron la idea de que el descenso de rigidez sufrido por la placa de asiento perjudicaba su comportamiento en fatiga hasta el punto de no cumplir con los valores especificados en la especificación.

2.3. CONFIGURACIÓN Nº 12

A tenor de los resultados incorrectos obtenidos en el comportamiento dinámico con las dos últimas configuraciones, en las que se había colocado una placa de rigidez

en torno a 90 kN/mm, se decidió, conservando su geometría, modificar la rigidez de la placa para que se incrementase un 10 %, aproximadamente, hasta colocarla en un valor de rigidez próximo a los 100 kN/mm.

En la Tabla 8.5 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 12, donde puede apreciarse, que el único cambio respecto a la configuración anterior es la traviesa junto con el comentado de la rigidez de la placa de asiento

Tabla 8.5.- Componentes de la configuración nº 12

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante L
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [119]:

- ❑ Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^{o}/3^{er}$ ensayo): 18.52 kN/ 18.26 kN/ 18.15 kN
 - Fuerza de apriete media: 18.31 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN

- ❑ Rigidez vertical secante P_0/P_0+75 , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 101.02 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- ❑ Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: 97.58 kN/mm

- Comentario: El resultado es inferior al máximo permitido por la especificación de 150 kN/mm
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
- Resultado (2º/3º/4º ensayo): 11.86 kN/ 11.67 kN/ 10.00 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 11.17 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN
- Dinámico de carga inclinada:
- Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): 0.53 mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): 0.69 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): 0.24 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): 0.15 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): 0.25 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): 0.22 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 0.852 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.
- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
- Resultado (1º/2º/3º ensayo): 16.30 kN/ 16.44 kN/ 16.42 kN
 - Fuerza de apriete media: 16.39 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 10.48 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.
- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
- Resultado: 107.09 kN/mm
 - Aumento respecto al resultado original: 6.01 %

- Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.
- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
- Resultado: 97.88 kN/mm
 - Aumento respecto al resultado original: 0.31 %
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
- Resultado ($2^{\circ}/3^{\text{er}}/4^{\circ}$ ensayo): 9.85 kN/ 9.66 kN/ 9.88 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 9.79 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 12.35 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

Un resumen de los resultados obtenidos con esta configuración aparece en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 12

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=18.31$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} prev.	$k_s=101.02$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=97.58$ kN/mm	Resultado correcto
R. Desliz prev.	$F=11.17$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{\max}^c=0.53$; $D_{\min}^c=0.69$ $D_{\max}^{pv}=0.24$; $D_{\min}^{pv}=0.15$ $D_{\max}^{ph}=0.25$; $D_{\min}^{ph}=0.22$ Pérdida de espesor: 0.852 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=16.39$ kN (10.48 %)	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} post.	$k'_s=107.09$ (6.01%)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$k'=97.88$ (0.31 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=9.79$ kN (12.35 %)	Resultado correcto

Como se puede comprobar por los resultados obtenidos, el incremento de la rigidez de la placa de asiento mejora su comportamiento dinámico, permitiendo al conjunto superar correctamente el ensayo dinámico de carga inclinada.

2.4. CONFIGURACIÓN N° 13

En esta nueva configuración, se pretendía analizar el posible efecto de una falta de apriete en el montaje de la sujeción, para lo cual, al conjunto se le aplicó un par de apriete de 200 N·m, a diferencia del resto de configuraciones en las que el par de apriete nominal fue de 250 N·m. En la Tabla 8.7 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 13, que son los mismos que los de la anterior, salvo la traviesa, que va rotando en todas las configuraciones .

Tabla 8.7.- Componentes de la configuración n° 13

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	Al-99, fabricante H
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [120]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 18.64 kN/ 18.80 kN/ 18.87 kN
 - Fuerza de apriete media: 18.77 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 104.82 kN/mm

- Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: 102.75 kN/mm
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo permitido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^{\circ}/3^{\text{er}}/4^{\circ}$ ensayo): 7.58 kN/ 7.60 kN/ 7.59 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 7.59 kN
 - Comentario: El valor obtenido no supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{\text{máx}}$ ($D_{\text{máx}}^c$): 0.66mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{\text{mín}}$ ($D_{\text{mín}}^c$): 0.88 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{\text{máx}}$ ($D_{\text{máx}}^{\text{pv}}$): 0.10 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{\text{mín}}$ ($D_{\text{mín}}^{\text{pv}}$): 0.15 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{\text{máx}}$ ($D_{\text{máx}}^{\text{ph}}$): 0.38 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{\text{mín}}$ ($D_{\text{mín}}^{\text{ph}}$): 0.25 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 0.935 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado ($1^{\text{er}}/2^{\circ}/3^{\text{er}}$ ensayo): 16.71 kN/ 17.24 kN/ 17.27 kN
 - Fuerza de apriete media: 17.07 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 9.05 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: 108.03 kN/mm
 - Aumento respecto al resultado original: 3.06 %
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
 - Resultado: 90.37 kN/mm
 - Aumento respecto al resultado original: - 5.66 %
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado ($2^\circ/3^{er}/4^\circ$ ensayo): 7.50 kN/ 7.54 kN/ 7.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 7.52 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 0.92 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

Un resumen de los resultados obtenidos con esta configuración aparece en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 13

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=18.77$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} prev.	$k_s= 104.82$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k= 102.75$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=7.59$ kN	Resultado incorrecto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D^c_{max}=0.66$; $D^c_{min}=0.88$ $D^{pv}_{max}=0.10$; $D^{pv}_{min}=0.15$ $D^{ph}_{max}=0.38$; $D^{ph}_{min}=0.34$ Pérdida de espesor: 0.935 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=17.07$ kN (9.05 %)	Resultado correcto

Prueba	Resultado	Comentario
Rig. P_0/P_{0+75} post.	$k'_s=108.03$ (3.06%)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$k'=90.37$ (- 5.66 %)	Resultado correcto
R. Desliz post.	$F'=7.52$ kN (0.92 %)	Resultado correcto

Los resultados obtenidos al disminuir el par de montaje un 20 % permiten concluir que el comportamiento dinámico del conjunto es correcto, manteniéndose dentro de los límites establecidos por la especificación, pero que el conjunto tendrá un problema con la resistencia al deslizamiento longitudinal al ser su valor un 15 % inferior al exigido por la especificación.

2.5. CONFIGURACIÓN Nº 14

En las tres configuraciones restantes se fue analizando el comportamiento de placas acodadas de diferentes fabricantes. En la configuración 14, verificado el correcto funcionamiento de la placa modelo A, se montó la placa modelo B, introduciendo la placa acodada inyectada por el fabricante D y cambiando también el clip y la traviesa. En la Tabla 8.9 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 14.

Tabla 8.9.- Componentes de la configuración nº 14

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, Hytrel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante D, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip B
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [121]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^{o}/3^{er}$ ensayo): 20.94 kN/ 20.75 kN/ 20.55 kN
 - Fuerza de apriete media: 20.74 kN

- Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN
- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
- Resultado: 109.96 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
- Resultado ($2^{\circ}/3^{\text{er}}/4^{\circ}$ ensayo): 12.50 kN/ 15.0 kN/ 15.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 14.16 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN
- Dinámico de carga inclinada:
- Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{\text{máx}}$ ($D^{\text{c}}_{\text{máx}}$): 0.50 mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{\text{mín}}$ ($D^{\text{c}}_{\text{mín}}$): 0.51 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{\text{máx}}$ ($D^{\text{pv}}_{\text{máx}}$): 0.11 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{\text{mín}}$ ($D^{\text{pv}}_{\text{mín}}$): 0.14 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{\text{máx}}$ ($D^{\text{ph}}_{\text{máx}}$): 0.15 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{\text{mín}}$ ($D^{\text{ph}}_{\text{mín}}$): 0.12 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 0.783 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.
- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
- Resultado ($1^{\text{er}}/2^{\circ}/3^{\text{er}}$ ensayo): 18.38 kN/ 18.35 kN/ 18.24 kN
 - Fuerza de apriete media: 18.32 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 11.67 %

- Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado (2º/3º/4º ensayo): 15.0 kN/ 12.5 kN/ 12.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 13.33 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 5.86 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

Un resumen de los resultados obtenidos con esta configuración aparece en la Tabla 8.10.

Tabla 8.10.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 14

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=20.74$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} prev	$k_s= 109.96$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=14.16$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{max}^c=0.50$; $D_{min}^c=0.51$ $D_{max}^{pv}=0.11$; $D_{min}^{pv}=0.14$ $D_{max}^{ph}=0.15$; $D_{min}^{ph}=0.12$ Pérdida de espesor: 0.783 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=18.32$ kN (11.67 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=13.33$ kN (5.86 %)	Resultado correcto

Esta configuración no plantea ningún problema, superando, tanto en comportamiento, estático como dinámico, las exigencias de la especificación.

2.6. CONFIGURACIÓN Nº 15

En esta nueva configuración se introdujo la placa acodada inyectada por el fabricante C, intercambiando además la traviesa y manteniendo la placa de asiento

modelo A. En la Tabla 8.11 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 15.

Tabla 8.11.- Componentes de la configuración nº 15

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes ovalados, Hytrel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante C, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante J
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [122 y 123]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 19.01 kN/ 19.27 kN/ 19.30 kN
 - Fuerza de apriete media: 19.19 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 114.07 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 12.5 kN/ 12.5 kN/ 12.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 12.5 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): 0.51 mm

- Desplazamiento de cabeza para F_{\min} (D_{\min}^c): 0.68 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para F_{\max} (D_{\max}^{pv}): 0.11 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para F_{\min} (D_{\min}^{pv}): 0.13 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para F_{\max} (D_{\max}^{ph}): 0.21 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para F_{\min} (D_{\min}^{ph}): 0.21 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 0.664 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.
- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
- Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 18.28 kN/ 18.38 kN/ 18.43 kN
 - Fuerza de apriete media: 18.36 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 4.32 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
- Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 12.5 kN/ 12.5 kN/ 12.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 12.5 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 0 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

Un resumen de los resultados obtenidos con esta configuración aparece en la Tabla 8.12

Tabla 8.12.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 15

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=19.19$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_0+75 prev	$k_s=114.07$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=12.5$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{max}^c=0.51$; $D_{min}^c=0.68$ $D_{max}^{pv}=0.11$; $D_{min}^{pv}=0.13$ $D_{max}^{ph}=0.21$; $D_{min}^{ph}=0.21$ Pérdida de espesor: 0.664 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=18.36$ kN (4.32 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=12.5$ kN (0 %)	Resultado correcto

El cambio de placa acodada, al igual que en la configuración anterior, no plantea ningún problema, superando, tanto en comportamiento estático, como dinámico, las exigencias de la especificación.

2.7. CONFIGURACIÓN Nº 16

En la última de las configuraciones se completa el conjunto con la placa acodada inyectada por el fabricante E, manteniendo la placa de asiento modelo B y cambiando la traviesa. En la Tabla 8.13 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 16.

Tabla 8.13.- Componentes de la configuración nº 16

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, Hytrel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante E, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante G
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos con esta configuración son los siguientes [124]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 17.70 kN/ 17.51 kN/ 17.37 kN
 - Fuerza de apriete media: 17.53 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_0+75 , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: 106.38 kN/mm
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 7.5 kN/ 10.0 kN/ 10.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: 9.17 kN
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo permitido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): 0.45 mm
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): 0.77 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): 0.04 mm
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): 0.09 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): 0.30 mm
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): 0.32 mm
 - Funcionalidad: adecuada
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: 0.918 mm
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado ($1^{\text{er}}/2^{\text{o}}/3^{\text{er}}$ ensayo): 16.58 kN/ 16.35 kN/ 16.64 kN
 - Fuerza de apriete media: 16.52 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 5.76 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado ($2^{\text{o}}/3^{\text{er}}/4^{\text{o}}$ ensayo): 7.5 kN/ 7.5 kN/ 7.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: 7.5 kN
 - Pérdida respecto al resultado original: 18.21 %
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO IV.

Un resumen de los resultados obtenidos con esta configuración aparece en la Tabla 8.14.

Tabla 8.14.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 16

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=17.53$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_0+75 prev	$k_s=106.38$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=9.17$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada (mm)	$D_{\text{max}}^c=0.45$; $D_{\text{min}}^c=0.77$ $D_{\text{max}}^{\text{pv}}=0.04$; $D_{\text{min}}^{\text{pv}}=0.09$ $D_{\text{max}}^{\text{ph}}=0.30$; $D_{\text{min}}^{\text{ph}}=0.32$ Pérdida de espesor: 0.918 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=16.52$ kN (5.76 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=7.5$ kN (18.21 %)	Resultado correcto

Se comprueba de nuevo que el cambio de placa acodada, al igual que en las dos configuraciones anteriores, no plantea ningún problema, superando, tanto en comportamiento estático, como dinámico, las exigencias de la especificación.

2.8. RESUMEN DE CONFIGURACIONES

A modo de resumen se indica en la Tabla 8.14 los componentes que conforman cada una de las configuraciones que se emplearon para analizar el comportamiento del conjunto de sujeción, así como el resultado global obtenido con cada una de ellas. El resultado incorrecto indica que alguna de las pruebas realizadas sobre el conjunto no superó las indicaciones de la especificación técnica.

Tabla 8.15.- Resumen de resultados obtenidos con el anclaje VAPE

Conf	Anclaje	P. asiento	P. acodada	Clip	Traviesa	Resultado
3	VAPE	Mod. B	A2 Fab. A	Clip A	AI-99 Fab. F	Incorrecto
4	VAPE	Mod. B	Hibrida	Clip B	AI-99 Fab. H	Correcto
7	VAPE	Mod. C1	A2 Fab. B	Clip C	AI-99 Fab. J	Incorrecto
10	VAPE	Mod. A	A2 Fab. D	Clip A	AI-99 Fab. I	Incorrecto
11	VAPE	Mod. A	A2 Fab. B	Clip A	AI-99 Fab. I	Incorrecto
12	VAPE	Mod. A	A2 Fab. B	Clip A	AI-99 Fab. L	Correcto
13	VAPE	Mod. A	A2 Fab. B	Clip A	AI-99 Fab. H	Incorrecto
14	VAPE	Mod. B	A2 Fab. D	Clip B	AI-99 Fab. L	Correcto
15	VAPE	Mod. B	A2 Fab. C	Clip A	AI-99 Fab. J	Correcto
16	VAPE	Mod. B	A2 Fab. E	Clip A	AI-99 Fab. G	Correcto

A continuación se resumen las causas que originaron los resultados incorrectos de las diferentes configuraciones. En la configuración 3 falló el ensayo eléctrico, pero como se comprobó en el capítulo 6 la sujeción tiene poco que ver en este parámetro. El error en la configuración 7 es debido a la atenuación al impacto de la placa modelo C1, que se trata de una placa descartada para la solución definitiva, además de tratarse de un ensayo que, como se ha podido comprobar, ofrece resultados muy irregulares. En las configuraciones 10 y 11 el fallo se establece en el comportamiento dinámico debido a un descenso en la rigidez inicial de la placa de asiento. Y por último, la configuración 13, no cumple los requisitos de resistencia al deslizamiento longitudinal, debido a que la sujeción se montó con un par un 20 % inferior al nominal.

A continuación se realiza un análisis más profundo de los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones analizando todos los parámetros que intervienen.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CONFIGURACIONES CON ANCLAJE TIPO VAPE

3.1. FUERZA DE APRIETE

El primero de los aspectos que cabe destacar tras el estudio de los resultados obtenidos es la gran variación que existe en el parámetro Fuerza de apriete (P_0), incluso manteniendo constantes tanto el tipo de anclaje, como la placa de asiento, el clip y la placa acodada.

Como ya se comprobó en el capítulo 6, los tres tipos de clips presentan un comportamiento similar y, además, en distintas configuraciones con clips idénticos se han obtenido valores de P_0 totalmente diferentes (Figura 6.5), con lo que se descarta que el causante de esta variación en la fuerza de apriete pueda ser este elemento.

En cuanto a la placa de asiento, en el mismo capítulo, se demostró la falta de influencia que en el parámetro fuerza de apriete tenía la rigidez de la placa de asiento. En la Figura 8.1, se intenta relacionar la Fuerza de apriete de las diferentes configuraciones empleadas con anclaje tipo VAPE frente a la rigidez P_0/P_0+75 de la placa de asiento. Como se puede observar en la figura, no parece existir relación alguna entre ambos parámetros.

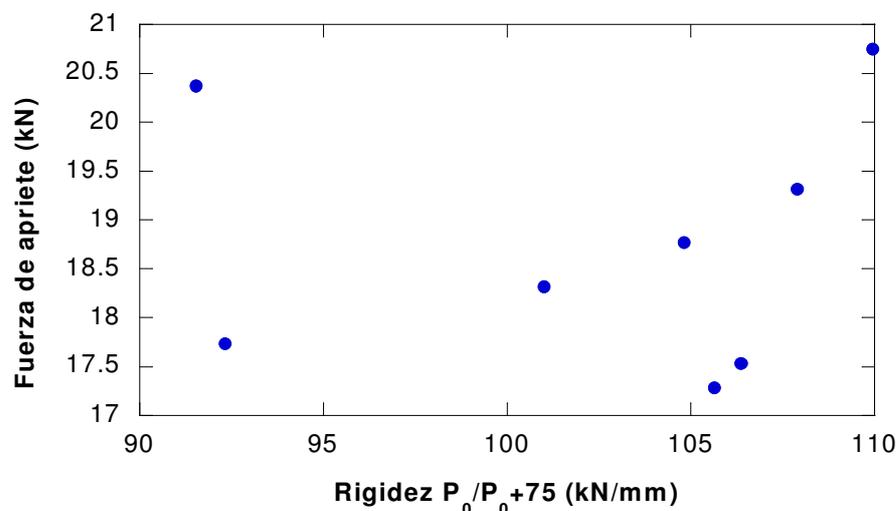


Figura 8.1.- Relación Fuerza de apriete-Rigidez de la placa de asiento

Un aspecto a tener en cuenta para intentar justificar la variación en la fuerza de apriete, a pesar de emplear componentes similares, como ya se observó en el capítulo 6, es la variación en la geometría de la placa acodada ligera A2, concretamente la cota que marca el final del recorrido del descenso del bucle en el proceso de apretado (cota D, Figura 8.3), suponiendo la placa acodada indeformable. Una vez que el bucle toca en el asiento marcado por la cota D, el par de apriete no se traduce en un incremento lineal de la fuerza de apriete, gobernado por la elasticidad del clip, como hasta el momento en el que no se había producido el contacto, sino que ese incremento será muy inferior y vendrá condicionado por la deformación de la placa acodada en la longitud representada por la cota D.

Como no se disponía del valor de la cota D de las placas acodadas empleadas en los ensayos, se realizó un estudio estadístico consistente en la medida de la cota D en las dos alas de apoyo del bucle de cuatro piezas de cavidades diferentes dentro del molde de inyección de cada uno de los suministradores. Se tomó como valor de la cota D el valor medio de las ocho medidas realizadas. Los resultados se reflejan en la Tabla 8.16.

Como puede observarse la desviación estándar entre cavidades es inferior en todos los casos a 0.07 mm, por lo que el valor medio de las ocho medidas puede considerarse una buena estimación de la cota D. En el caso de la placa híbrida solamente se realizó medida de una placa ya que se trata de un prototipo.

Tabla 8.16.- Medida de la cota D

Fabricante	Cota D (a) (mm)		Cota D (b) (mm)		Cota D (c) (mm)		Cota D (d) (mm)		σ_D	\bar{D} (mm)
Fab. A	20.34	20.40	20.37	20.19	20.24	20.30	20.25	20.31	0.07	20.30
Fab. B	19.75	19.67	19.65	19.69	19.70	19.62	19.76	19.62	0.05	19.68
Fab. C	19.94	19.98	20.06	20.00	19.90	19.93	20.23	20.13	0.06	19.98
Fab. D	20.04	20.02	20.01	19.99	19.84	19.90	20.03	19.99	0.07	19.97
Fab. E	20.35	20.41	20.43	20.48	20.34	20.43	20.45	20.34	0.05	20.40
Híbrida	19.77	19.88							0.05	19.83

En la Figura 8.2 se representa la variación de la Fuerza de apriete del sistema de sujeción frente al valor de la cota D de la placa acodada.

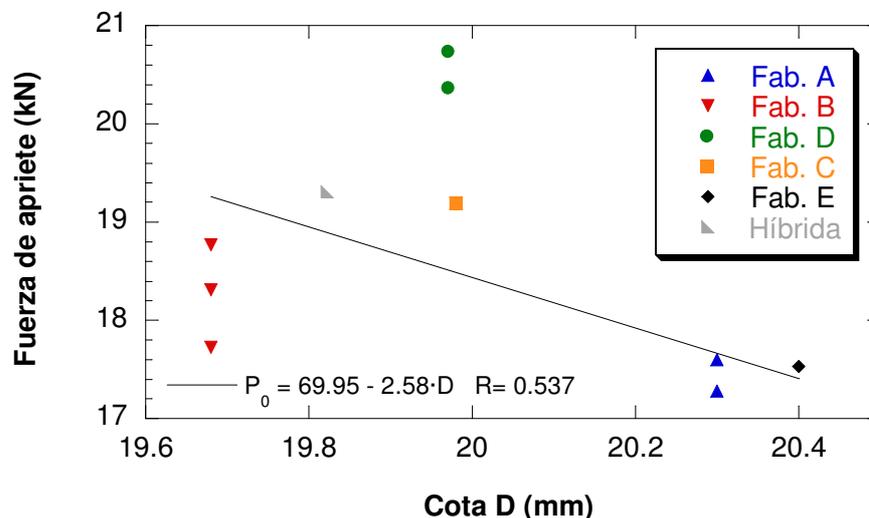


Figura 8.2.- Relación entre la cota D y la Fuerza de apriete

A la vista del gráfico de la figura parece existir una cierta tendencia a que la fuerza de apriete disminuya a medida que se incrementa la cota D de la placa acodada, aspecto éste que ya se había comprobado en el capítulo 6, pero la correlación no es demasiado buena ($R = 0.537$)

Lo que sí parece cierto, tras la observación de la figura, es que la geometría de la placa acodada tiene mucha influencia en la variación en la fuerza de apriete, ya que, además de la tendencia descrita anteriormente, se puede apreciar como en configuraciones en las que se repite la placa acodada, variando, incluso, la placa de asiento o el clip, se obtienen valores muy similares de fuerza de apriete, como por ejemplo en las que se emplearon placas de los fabricantes A, B o D.

Por tanto, se trató de buscar otro parámetro geométrico de la placa A2 que se correlacionase mejor con la fuerza de apriete y, tras la observación de la Figura 8.3, se dedujo que también influía en dicho valor la anchura de la placa en el fondo del codo, es decir, el punto donde apoya el clip, cota E en la figura. El efecto estaría relacionado con el descrito para la cota D, mientras más alto esté situado el clip, más recorrido tendría el bucle del clip hasta tocar la placa de asiento, y por

tanto mayor será la fuerza de apriete. En este sentido incluso podría existir una cierta influencia de la geometría de la zona de la travesa donde se aloja la placa acodada.

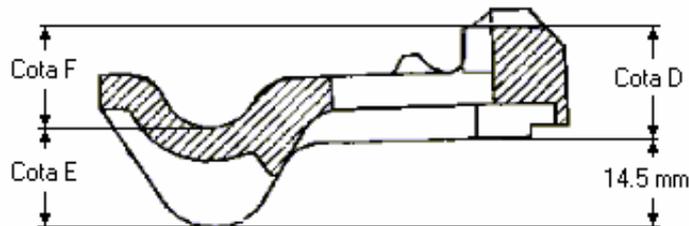


Figura 8.3.- Cotas D, E y F de la placa acodada

Para comprobar la influencia de la cota E, se realiza el mismo estudio que para la determinación de la cota D. En la Tabla 8.17 aparecen los resultados del control de la cota E, donde, al igual que ocurría en el caso anterior la desviación estándar es muy pequeña con lo que podremos tomar la media de las medidas como una buena estimación de la cota E.

Tabla 8.17.- Medida de la cota E

Fab.	Cota E (a) (mm)		Cota E (b) (mm)		Cota E (c) (mm)		Cota E (d) (mm)		σ_E	\bar{E} (mm)
Fab. A	17.83	17.88	17.80	17.83	17.82	17.92	17.83	17.86	0.03	17.84
Fab. B	18.16	18.04	18.09	18.20	18.19	18.06	17.98	17.92	0.09	18.08
Fab. C	18.55	18.49	18.52	18.51	18.54	18.50	18.51	18.48	0.02	18.51
Fab. D	18.08	18.02	18.00	18.00	17.99	18.06	18.08	18.10	0.04	18.04
Fab. E	17.89	17.77	17.76	17.80	17.85	17.80	17.71	17.78	0.05	17.79
Hibrida	17.70	17.83							0.06	17.76

En la Figura 8.4 se representa el valor de la cota E frente a la fuerza de apriete conseguida con cada una de las placas. Como era de esperar, se aprecia una tendencia al aumento de la fuerza de apriete con el incremento de la cota E.

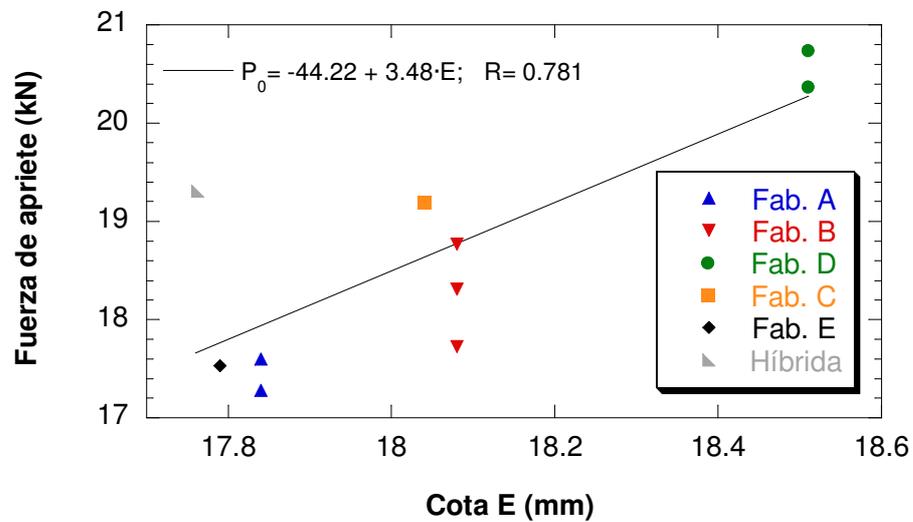


Figura 8.4.- Relación entre la cota E y la Fuerza de apriete

Para poder utilizar un único parámetro geométrico que tenga en cuenta las dos cotas, se recurre a una nueva cota F, Figura 8.3, definida según la expresión:

$$Cota F = Cota E - Cota D + \dots \quad (7.1)$$

Si se representa esta nueva cota F frente a la fuerza de apriete, Figura 8.5, se comprueba que la correlación mejora a la obtenida para la cota D solamente.

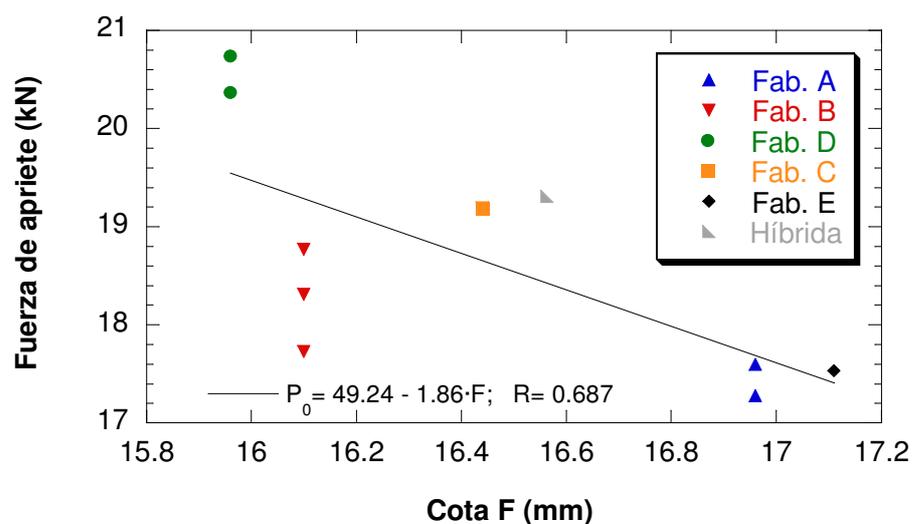


Figura 8.5.- Relación entre la cota F y la Fuerza de apriete

El aumento de la cota F, o distancia en vertical entre el fondo del codo y la parte superior del apoyo del bucle, produce un decremento en la fuerza de apriete del sistema, con lo que se demuestra la gran influencia que la geometría de la placa acodada puede llegar a tener sobre este parámetro fundamental de la sujeción.

En base a estos parámetros geométricos analizados se puede establecer un valor límite para un correcto funcionamiento. Teniendo en cuenta que el valor mínimo permitido por la especificación técnica para la fuerza de apriete es de 17 kN y realizando una extrapolación de los valores obtenidos para las diferentes cotas medidas en las tres últimas gráficas se puede fijar para la cota D un valor máximo de 20.4 mm, para la cota de E 17.8 mm como valor mínimo y por último para la cota F un valor máximo de 17.2 mm.

En la actualidad la especificación técnica de la placa A2 [78] solo contempla al control de tres cotas críticas de la placa A2 que no coinciden con ninguna de las analizadas anteriormente, por lo que se recomienda que estas tres cotas, por su influencia en la fuerza de apriete del sistema de sujeción sean consideradas en dicha especificación técnica.

3.1.1. Ensayos específicos sobre la geometría de la placa acodada

Se realizaron ensayos específicos para confirmar la influencia de la geometría de la placa acodada en la fuerza de apriete del conjunto de sujeción. Para ello, se realizaron ensayos para la determinación de la fuerza de apriete en los que la única variable era la placa acodada empleada, recurriendo, incluso, a otros modelos diferentes a la A2 ligera, para comprobar si se sigue cumpliendo la tendencia.

Los ensayos se realizaron sobre una traviesa suministrada por el fabricante J con espiga tipo VAPE, con clips tipo C y la placa de asiento modelo B con una rigidez P_0/P_{0+75} de 105.0 kN/mm.

Para comprobar la influencia del par de apriete, se montó un conjunto con placa acodada A2 inyectada por el fabricante A y se le dio el par de apriete justo hasta conseguir que el bucle del clip entrase en contacto con el asiento de la placa acodada, sin llegar al par nominal de 250 N·m. En la Figura 8.6, se representa esta configuración frente a la misma apretada hasta el par nominal.

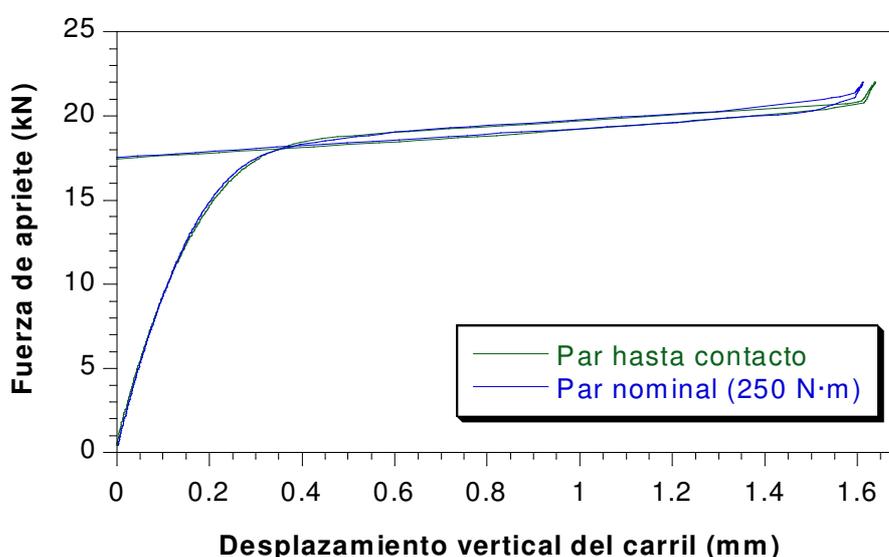


Figura 8.6.- Influencia del par de apriete en la fuerza de apriete

Como se puede observar en la figura, el par de apriete, una vez obtenido el contacto, parece no tener mucha influencia, 17.50 kN para la configuración con par nominal y 17.45 kN para la otra.

Con el fin de conseguir un amplio rango en la cota D, se emplearon varios tipos de placa acodada, variando, incluso, de modelo y recurriendo a las placas acodadas macizas Pag/0, que tienen una cota D nominal superior a la A2.

En la Figura 8.7 se representan los resultados obtenidos con placas acodadas ligeras inyectadas por el fabricante A, placas híbridas y placas macizas inyectadas en PA 6.6 y PA 6 de los fabricantes E y M

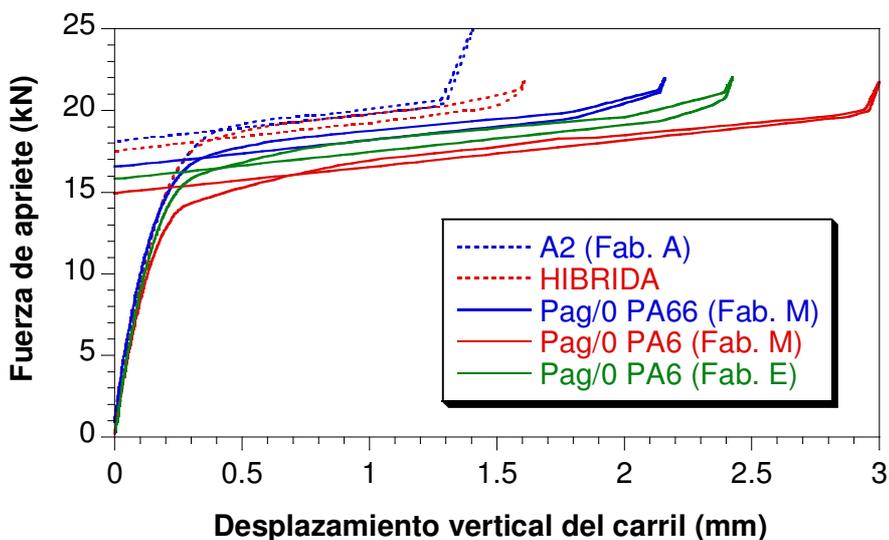


Figura 8.7.- Variación de la fuerza de apriete en función de la placa acodada

A la vista del gráfico se comprueba fácilmente el descenso en la fuerza de apriete con el uso de las placas acodadas macizas.

Por último, sobre la placa inyectada en PA 6 del fabricante E se realizó una modificación geométrica consistente en el mecanizado del la zona de apoyo del bucle del clip rebajando la cota D hasta los 20 mm marcados en el plano de la placa ligera. En la Figura 8.8, se representan los dos ensayos efectuados sobre las placas modificadas y originales, respectivamente.

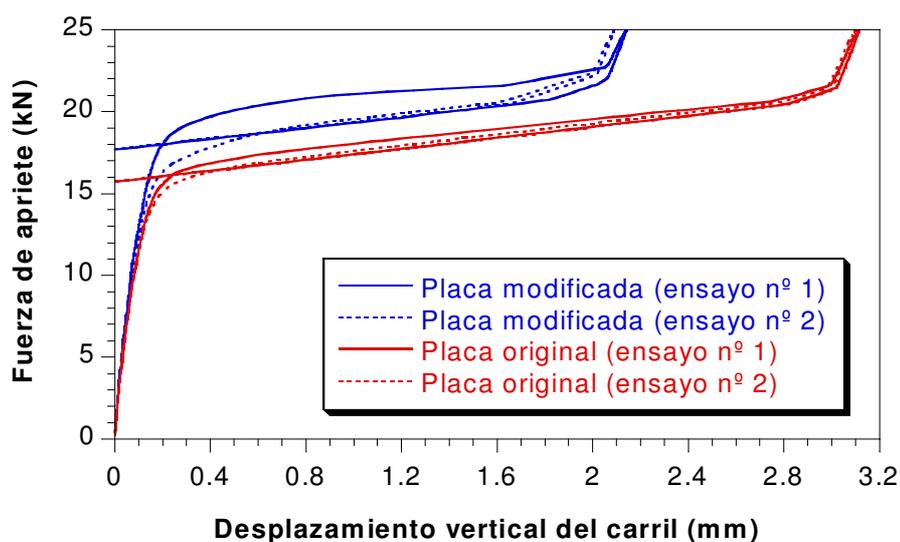


Figura 8.8.- Variación de la fuerza de apriete al mecanizar la placa Pag/0

Se puede observar en la figura cómo al rebajar la cota D de la placa maciza a valores similares a los de la placa ligera, los resultados obtenidos de fuerza de apriete son similares (entre 17 y 18 kN).

A modo de resumen, en la Tabla 8.18 se muestran los valores de fuerza de apriete obtenidos con las placas acodadas que han sido ensayadas en las mismas condiciones, es decir, mismos componentes de la sujeción y mismo apriete, así como de los correspondientes valores de las cotas D, E y F. En la Figura 8.9 se representan estas variables, intentando buscar una correlación entre la fuerza de apriete y los parámetros geométricos de la placa acodada.

Tabla 8.18.- Fuerza de apriete y cotas D, E y F

Placa	F. Apriete (kN)	Cota D (mm)	Cota E (mm)	Cota F (mm)
Híbrida	17.5	19.88	17.76	16.62
A2 Fab. A	18.1	20.30	17.84	16.96
Pag/0 (PA 66) Fab. M	16.5	20.58	17.64	17.44
Pag/0 (PA 6) Fab. M	15.8	20.66	17.31	17.85
Pag/0 (PA 6) Fab. E	14.9	20.75	17.33	17.92
Pag/0 (PA 6) Fab. E mecanizada	17.7	19.96	17.25	17.21

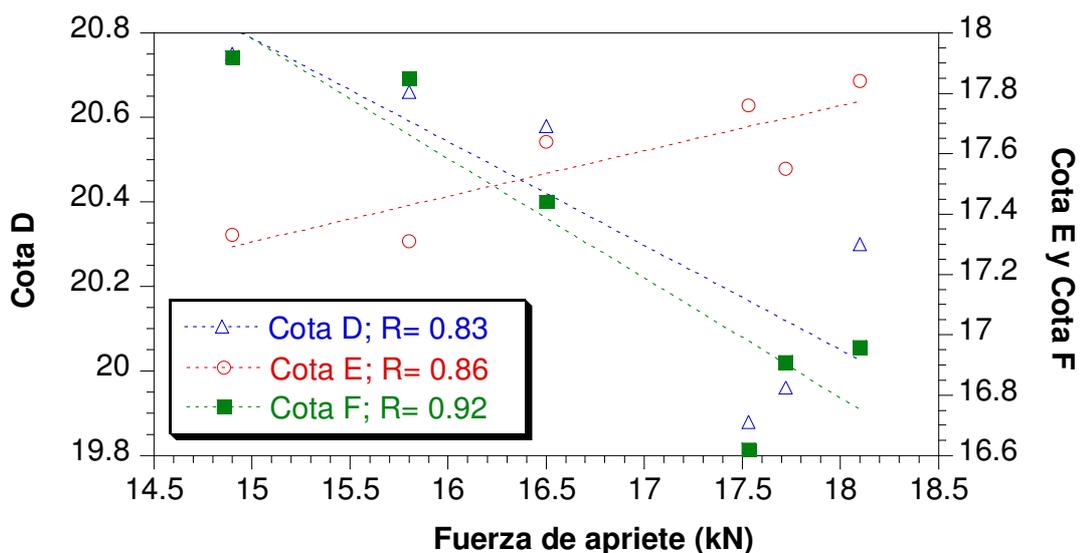


Figura 8.9.- Evolución de la fuerza de apriete con la geometría de la placa

En la figura se puede comprobar lo que ya se había visto con anterioridad: la fuerza de apriete aumenta al disminuir la cota D y al aumentar la cota E. Siendo la cota F, que relaciona las dos anteriores, la que mejor coeficiente de correlación presenta, con un valor de 0.92.

En la Figura 8.10 se representan los valores de la cota F obtenidos en este apartado junto con los obtenidos en el anterior, comprobando que se mantiene la tendencia descrita en el mismo.

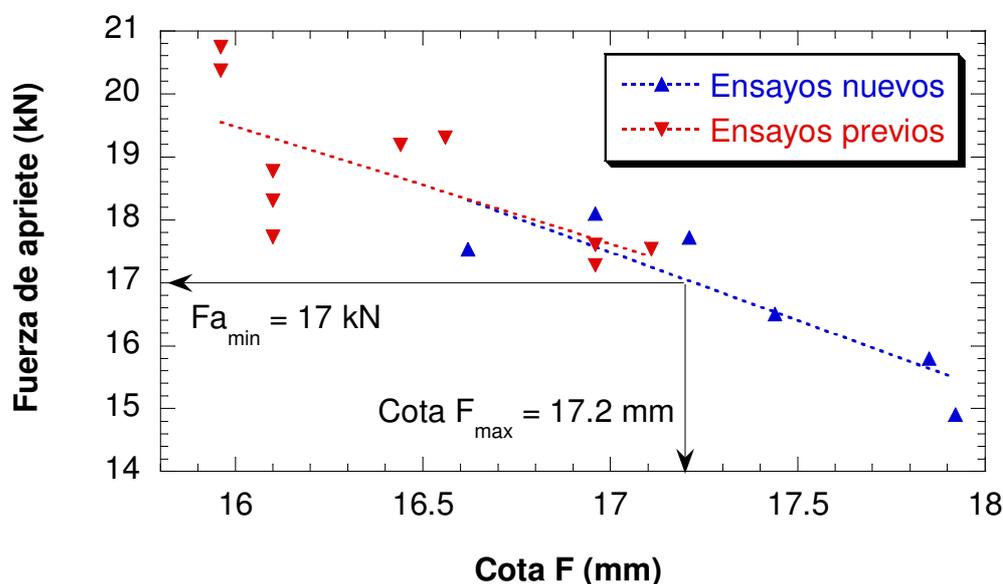


Figura 8.10.- Evolución de la fuerza de apriete con la cota F

Como se puede ver en la figura se confirma el valor mínimo establecido como límite para la cota F de 17.2 mm, por debajo del cual la fuerza de apriete no alcanza el mínimo exigido en la especificación técnica de sujeciones.

3.2. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO LONGITUDINAL

La resistencia al deslizamiento longitudinal es un parámetro de la sujeción un tanto aleatorio, ya que tiene una dependencia muy fuerte de fenómenos locales. Lógicamente, el de mayor preponderancia es el rozamiento que se establece entre los componentes. Por ello, la resistencia al deslizamiento se puede ver modificada,

por ejemplo, por el estado superficial del carril, por el estado de desgaste de los clips, por el clavado del clip en la superficie del patín del carril, etc.

A pesar de esta cierta anarquía anunciada y como ya se había comprobado en el apartado 2.3 del capítulo 6 de la presente Tesis, se aprecia una pequeña correlación con la fuerza de apriete como puede verse en la Figura 8.11.

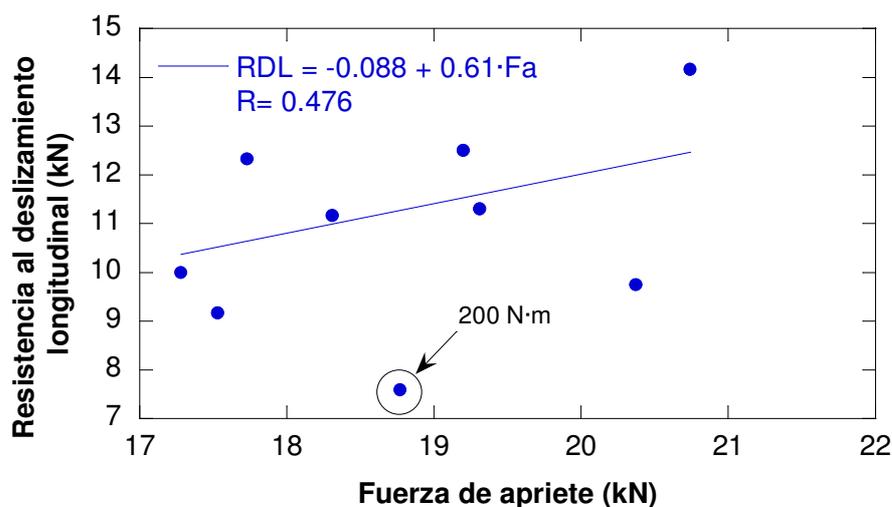


Figura 8.11.- Relación entre Fuerza de apriete y la resistencia al deslizamiento

Tras observar la figura se comprueba que, tras despreciar el valor obtenido con la configuración apretada a 200 N·m, por tratarse de condiciones de partida diferentes, existe una pequeña correlación entre la resistencia al deslizamiento y la fuerza de apriete, aumentando la primera con el incremento de la segunda.

3.3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO

El sometimiento a esfuerzos dinámicos del conjunto de la sujeción influye sobre parámetros tales como la fuerza de apriete, la resistencia al deslizamiento, la variación del espesor y la rigidez de la placa de asiento o los desplazamientos del carril. En este apartado, se trata de cuantificar el alcance de esta influencia a través de la variación sufrida por los parámetros con referencia a su valor inicial.

Para cuantificar la rigidez de la placa, se empleará el parámetro de la rigidez P_0/P_0+75 (k_s) en lugar de la rigidez 5/80 (k), a pesar de que k_s está obtenida entre valores de carga variables que son función de la fuerza de apriete, y por tanto distintos en cada caso, mientras que para la obtención de k los valores de carga son constantes. Las razones fundamentales para el uso de k_s son las de disponer de más datos de este parámetro ya que se toma como referencia para el ensayo dinámico de carga inclinada. En todo caso, las dos variables están correlacionadas linealmente como puede verse en la Figura 8.12, por lo que sería indistinto referirse a una u otra de las rigideces.

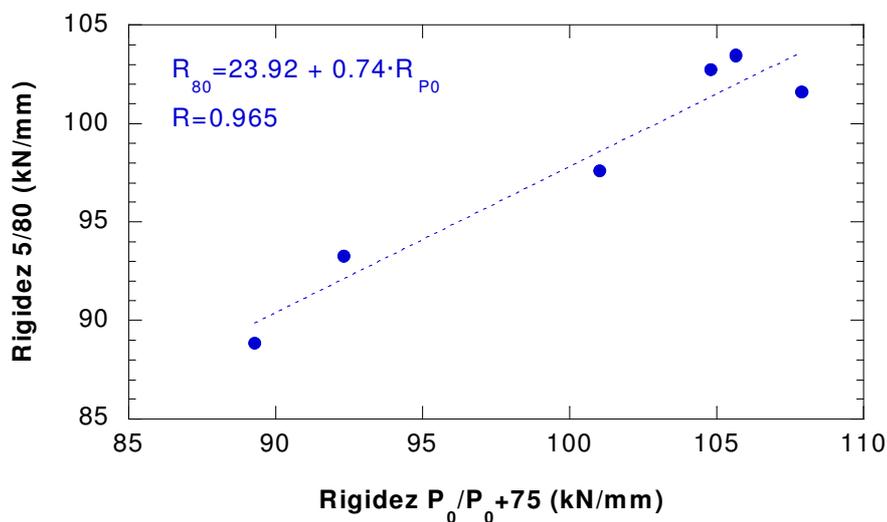


Figura 8.12.- Relación entre las rigideces 5/80 y P_0/P_0+75

3.3.1. Fuerza de apriete

La primera influencia analizada es la reducción experimentada por la fuerza de apriete tras la realización del ensayo dinámico, expresada en valor porcentual respecto al valor de partida. En la Figura 8.13 se representa la variación respecto a los valores iniciales de fuerza de apriete y en la Figura 8.14 frente a los valores iniciales de la rigidez de la placa de asiento.

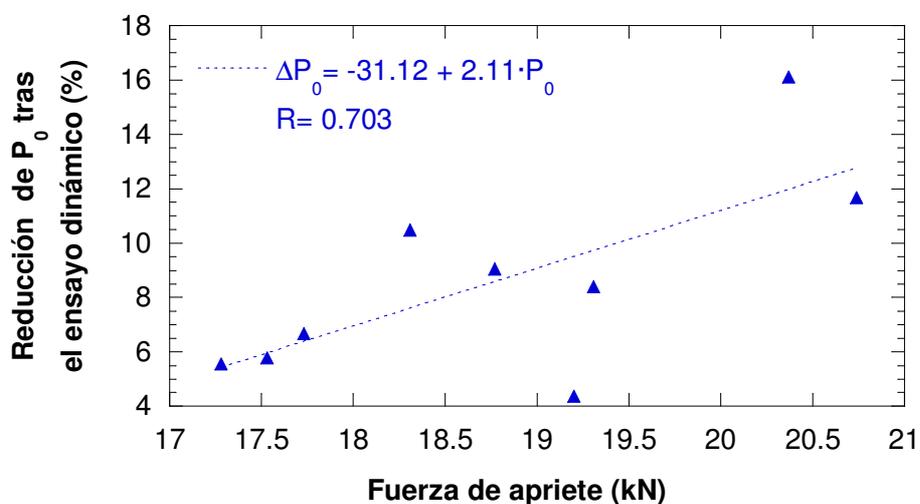


Figura 8.13.- Variación de la fuerza de apriete en función de la P_0 inicial

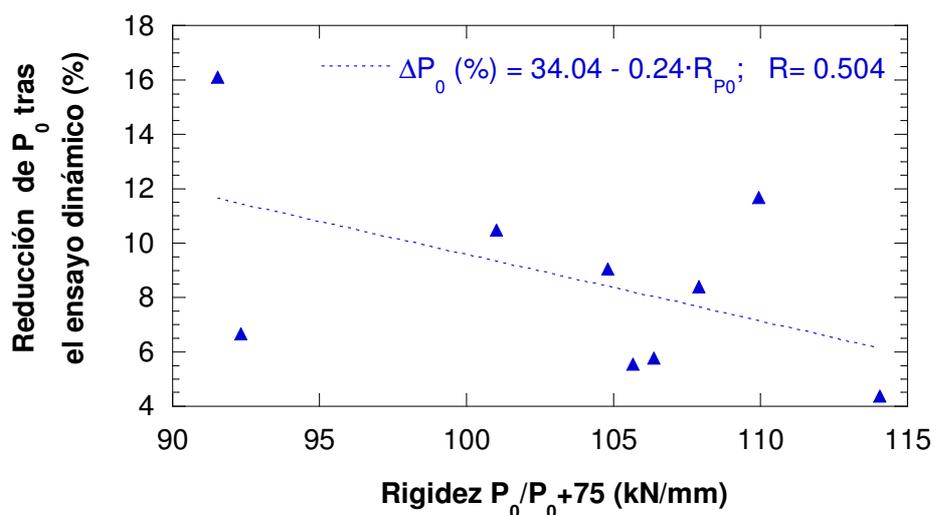


Figura 8.14.- Variación de la fuerza de apriete en función de la rigidez de la placa

A la vista de las dos figuras anteriores, se comprueba que la pérdida de fuerza de apriete tras el ensayo dinámico puede verse influenciada por los dos parámetros analizados, de forma que, ésta disminuye con el incremento en la rigidez inicial de la placa y al disminuir la fuerza de apriete inicial del sistema de sujeción.

En la Figura 8.13 aparece un punto singular que se desvía de la tendencia general, que tiene una variación de P_0 en torno al 4 %, pero al observar la figura siguiente se puede verificar que corresponde a una placa de asiento con rigidez alta. Por otro lado, en la Figura 8.14, los puntos que más se separan de la tendencia son los de las placas de rigidez 92 y 110 kN/mm, aproximadamente, a las que le corresponden según la figura anterior pares de apriete bajos y altos, respectivamente.

Por tanto, teniendo en cuenta que la limitación impuesta por la especificación técnica para la pérdida de fuerza de apriete es del 20 %, se recomienda emplear placas con rigidez inicial superior a 90 kN/mm y no superar los 21 kN de fuerza de apriete del sistema.

3.3.2. Resistencia al deslizamiento

En cuanto a la variación de la resistencia al deslizamiento longitudinal tras el ensayo dinámico, no se encontró correlación alguna con la fuerza de apriete ni con el valor inicial de la resistencia al deslizamiento longitudinal, apareciendo una ligera tendencia con el valor inicial de la rigidez inicial de la placa (Figura 8.15).

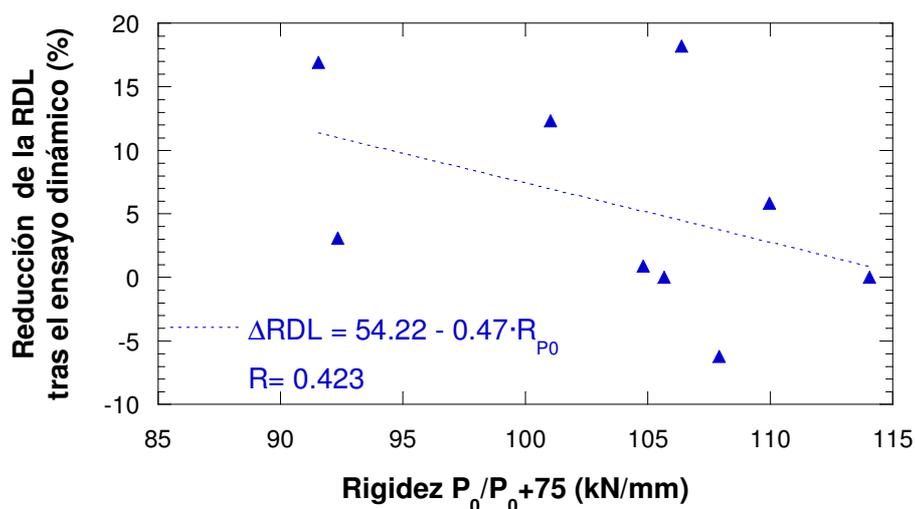


Figura 8.15.- Variación de la resistencia al deslizamiento longitudinal (RDL) tras el ensayo dinámico en función de la rigidez inicial de la placa

Como se observa en el gráfico, se confirma la aleatoriedad en la medida de la resistencia al deslizamiento, demostrada en varias ocasiones a lo largo del desarrollo de la Tesis, llegando en algunos casos a registrarse un reducción negativa, o lo que es lo mismo a manifestarse un incremento del parámetro tras el ensayo dinámico, que se puede justificar a efectos locales existentes en el contacto clip-carril. En el gráfico también se observa la pequeña correlación que puede existir entre la variación de la resistencia al deslizamiento y la rigidez de la placa, de forma que la pérdida tiende a disminuir al incrementarse el valor de rigidez inicial de la placa,

Por tanto, teniendo en cuenta que la limitación impuesta por la especificación técnica para la pérdida de resistencia al deslizamiento tras el ensayo dinámico es del 20 %, se recomienda emplear placas con rigidez inicial superior a 90 kN/mm.

3.3.3. Variación de la placa de asiento

Las propiedades de la placa de asiento se ven modificadas tras el ensayo dinámico, tanto las mecánicas, es decir, las rigideces, como las geométricas, o lo que es lo mismo el espesor de la misma.

La placa de asiento por efecto del ensayo dinámico, como ya se vio con anterioridad, sufre una rigidización como consecuencia, por un lado, de las deformaciones viscoplásticas adquiridas y, por otro, por el desgaste sufrido por el rozamiento continuo de la placa contra la traviesa y el carril. Tanto las deformaciones permanentes, como el desgaste sufrido por la placa se pueden englobar en un único parámetro físico denominado pérdida de espesor, Δe .

Este incremento de rigidez se puede observar en la Figura 8.16 y Figura 8.17 en las que se representa como varía la rigidez P_0/P_{0+75} en función de la propia rigidez inicial de la placa y de la fuerza de apriete del conjunto, respectivamente.

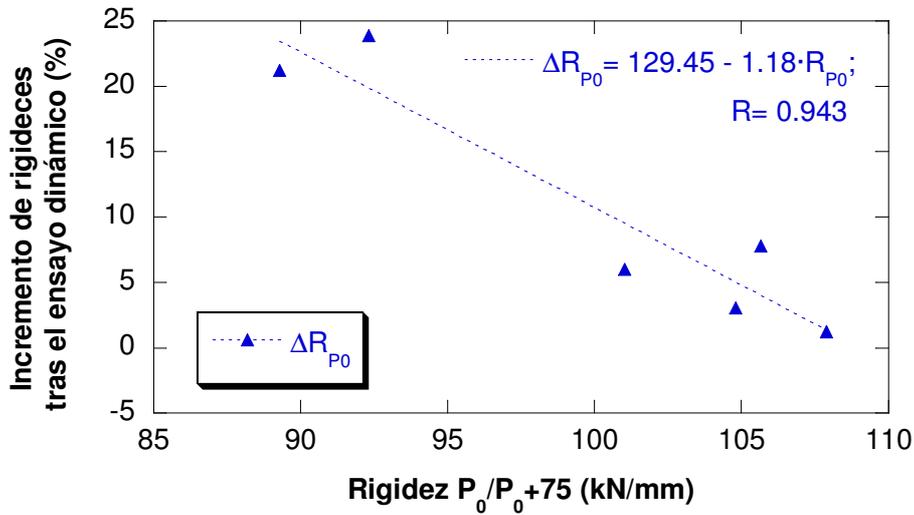


Figura 8.16.- Variación de la rigidez de la placa de asiento en función de la rigidez inicial de la misma tras el ensayo dinámico

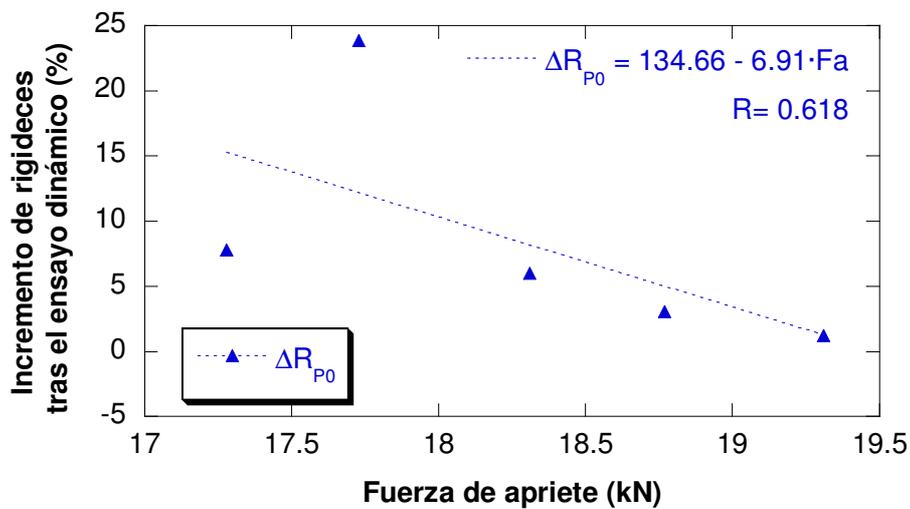


Figura 8.17.- Variación de la rigidez de la placa de asiento en función de la fuerza de apriete inicial del sistema tras el ensayo dinámico

Como se observa en las dos figuras los dos parámetros contemplados tienen el mismo efecto sobre la rigidización de la placa, a medida que estos se incrementan la rigidización disminuye y, por tanto, también lo harán los cambios en las propiedades mecánicas del conjunto.

Se confirman las recomendaciones de los apartados anteriores respecto a la rigidez mínima de la placa de asiento, como puede verse en la Figura 8.16 no conviene que ésta disminuya de 90 kN/mm para evitar rigidizaciones superiores al 25 %, límite máximo impuesto por la especificación técnica. De la misma manera, tampoco se recomienda que la fuerza de aprieta disminuya por debajo de los 17 kN ya que el efecto sería similar.

El otro de los aspectos a controlar en la placa es la variación de la geometría, es decir el espesor, que como ya se comentó, esta relacionada con el deterioro mecánico de la placa ya que cuantifica tanto el desgaste como la deformación plástica. Como se puede comprobar en la Figura 8.18 existe una buena correlación entre la pérdida de propiedades mecánicas de la placa y la variación de su geometría, o lo que es lo mismo, entre su rigidización y la pérdida de espesor.

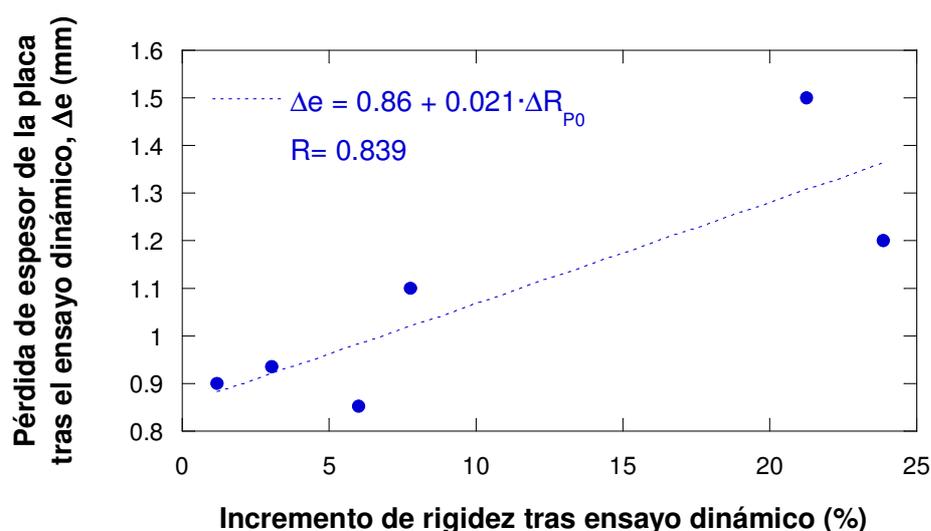


Figura 8.18.- Relación entre el deterioro mecánico de la placa y la pérdida de espesor

Conocida esta relación, se puede establecer un criterio geométrico para limitar el uso de un conjunto de sujeción. A partir del gráfico, se comprueba que un desgaste superior a 1.4 mm tras el ensayo dinámico implica un deterioro mecánico de la placa que le aproxima a una rigidización del 25 %, límite de funcionamiento impuesto por la especificación técnica.

Así como la rigidización se puede expresar en función de la rigidez inicial de la placa, la variación geométrica puede establecerse de la misma forma (Figura 8.17)

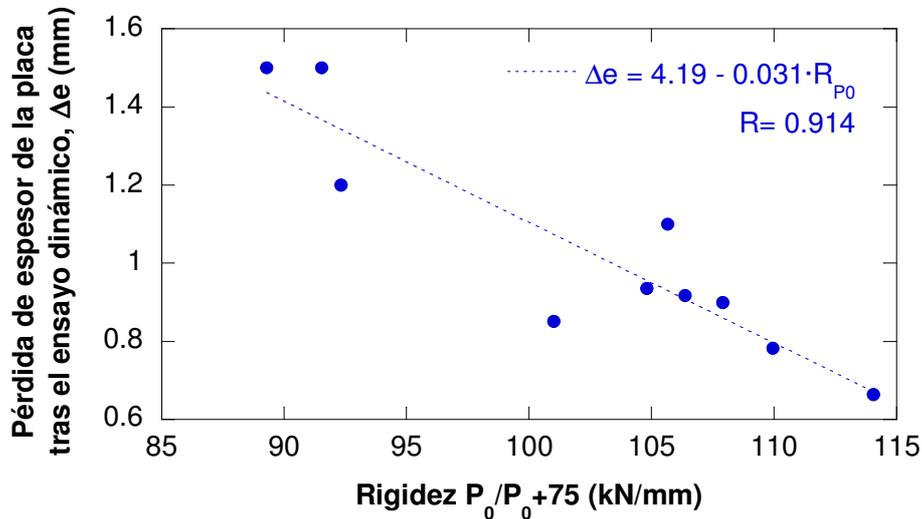


Figura 8.19.- Pérdida de espesor en función de la rigidez tras el ensayo dinámico

Tras la observación de la figura se comprueba una gran influencia de la rigidez inicial de la placa en la pérdida de espesor, de forma que mientras menor es la rigidez de la placa mayor es la pérdida de espesor tras el ensayo dinámico.

3.3.4. Desplazamientos del carril

Por último se realizará un estudio en el que se consideren los desplazamientos del carril: primero la evolución de las amplitudes de desplazamiento, previas y posteriores al ensayo dinámico; y después los desplazamientos remanentes adquiridos a lo largo del ensayo dinámico.

Se ha comprobado que no existe correlación entre las amplitudes de desplazamiento y la fuerza de apriete del conjunto, pero esta relación sí existe cuando se intentan relacionar las amplitudes de desplazamiento con la rigidez. En la Figura 8.20 se representa la evolución de las amplitudes de desplazamiento de cabeza y patín vertical y horizontal antes y después del ensayo dinámico frente a la rigidez de la placa.

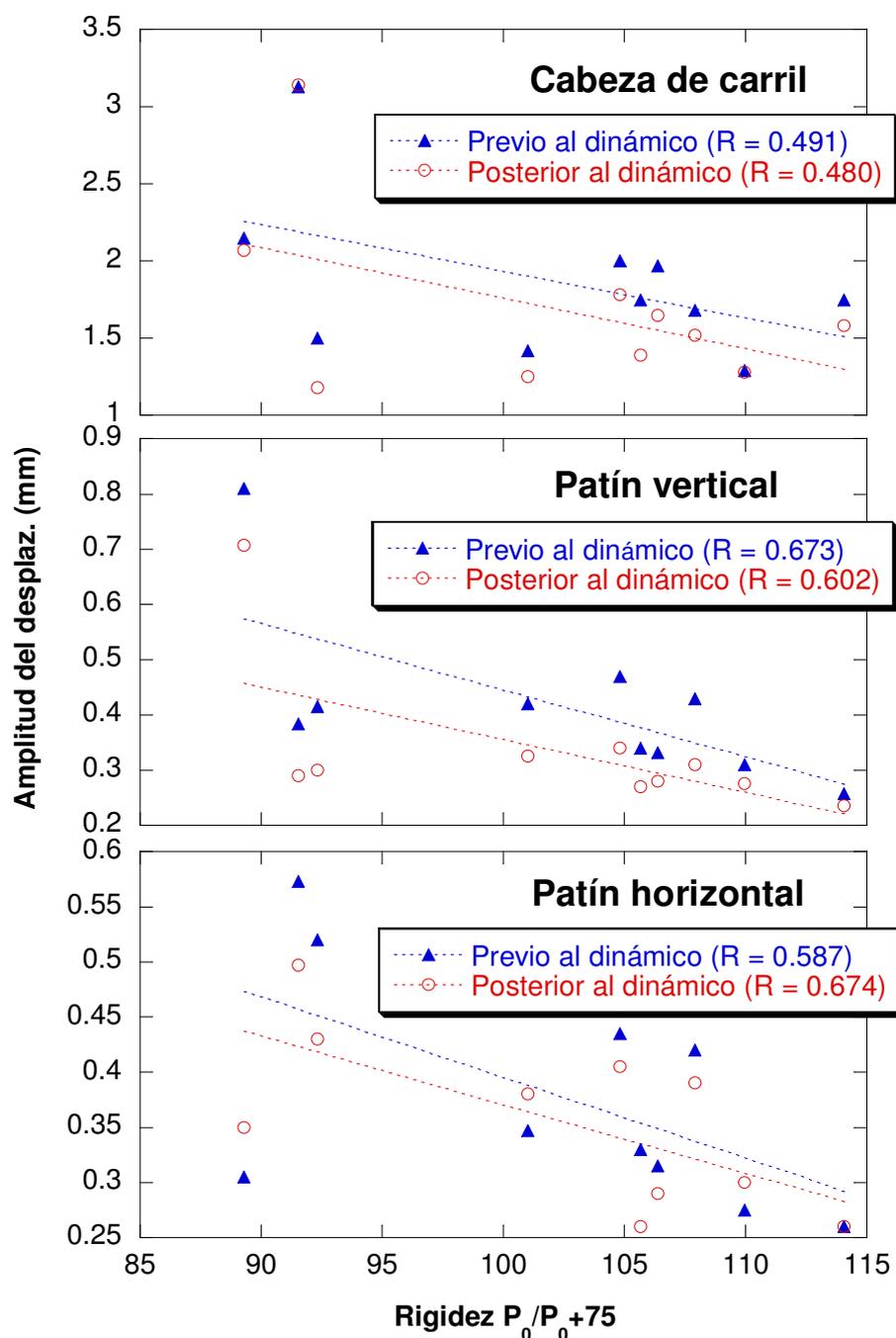


Figura 8.20.- Evolución de las amplitudes de desplaz. en función de la rigidez.

Como se observa en la figura las amplitudes de los diferentes movimientos tienden a incrementarse con la flexibilidad de la placa de asiento. Además, para los desplazamientos del patín del carril, a medida que aumentamos la rigidez de la placa disminuye la variación entre las amplitudes conseguidas antes y después del ensayo, hecho indicado por la tendencia de las rectas de ajuste a juntarse con el

aumento de rigidez. Este fenómeno no se aprecia para las amplitudes de la cabeza del carril, donde las rectas son casi paralelas.

En la Figura 8.21 se representa la evolución de los desplazamientos remanentes medidas en la cabeza y el patín del carril, tanto bajo fuerza máxima, como bajo fuerza mínima, tras el ensayo dinámico frente a la rigidez de la placa.

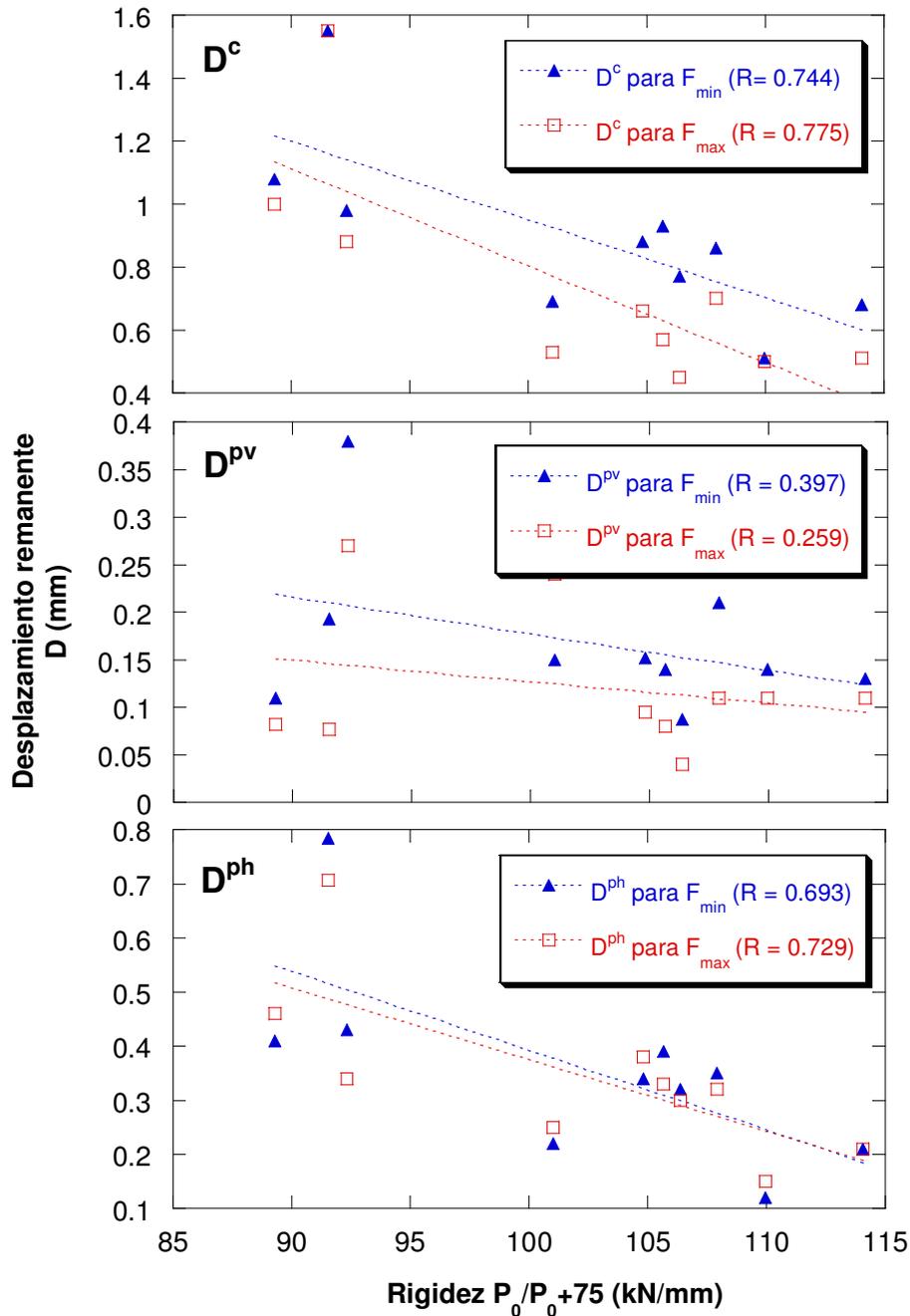


Figura 8.21.- Evolución de los desplazamientos remanentes en función de la rigidez.

Las deformaciones remanentes provocadas por el ensayo dinámico sobre el sistema de sujeción muestran una correlación con las propiedades mecánicas de la placa, concretadas en su rigidez inicial. Esta correlación es buena para el caso de los desplazamientos de la cabeza del carril y el desplazamiento horizontal del patín, empeorando para los desplazamientos verticales del patín. También se comprobó la nula relación existente entre los desplazamientos residuales con la fuerza de apriete del conjunto.

Al igual que ocurría con las amplitudes, los desplazamientos remanentes disminuyen a medida que se incrementa la rigidez de la placa.

Debido a que parte de la pérdida de espesor sufrida por la placa acodada tras la fatiga cuantifica la deformación plástica sufrida por la misma se buscó una correlación entre la pérdida de espesor y los desplazamientos remanentes del sistema, ver Figura 8.22.

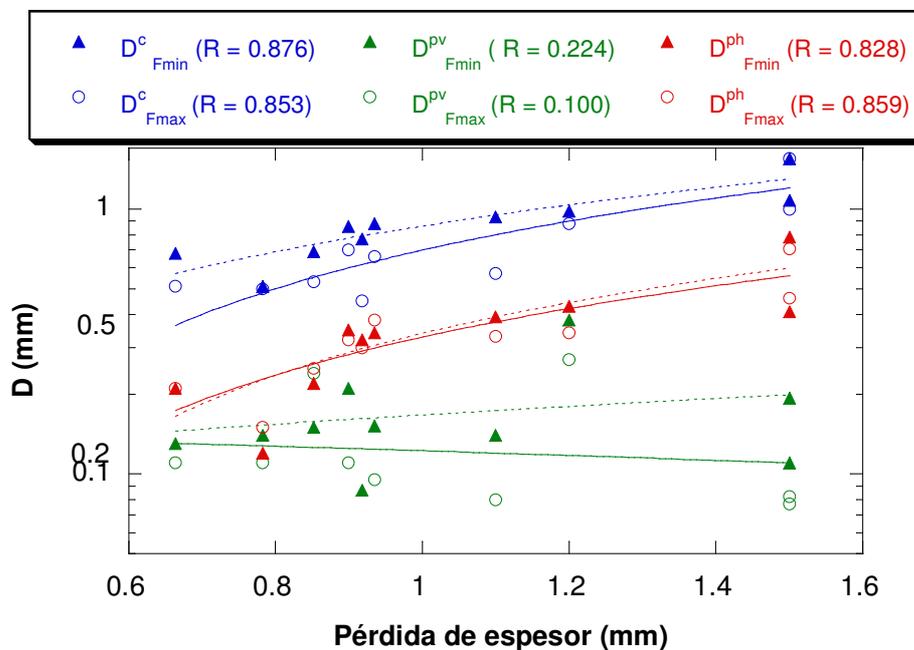


Figura 8.22.- Relación entre la pérdida de espesor y los desplazamientos remanentes

Como se observa en la figura, y al igual que ocurría en el caso anterior, existe una correlación aceptable con los desplazamientos de la cabeza del carril y con los horizontales del carril, pero casi despreciable con los desplazamientos verticales del patín. En todo caso el aumento de los desplazamientos remanentes implica un incremento de la pérdida de espesor.

4. FUERZAS SOBRE EL ANCLAJE

Teniendo en cuenta las condiciones límites de comportamiento, analizadas en el capítulo 7, que deben satisfacer tanto la vaina como del tornillo ante diferentes tipos de sollicitaciones, estáticas y dinámicas, es conveniente comprobar cómo repercuten los esfuerzos externos, entre los que se encuentran el par de apriete y los esfuerzos transmitidos directamente por el carril, sobre estos componentes para poder verificar si se llegan a alcanzar estas condiciones críticas bajo condiciones normales de trabajo.

Para el estudio de las sollicitaciones recibidas por el tornillo y transmitidas a la vaina se instrumentó un tirafondo especial. Este tirafondo tuvo que modificarse ligeramente respecto al empleado en la sujeción original debido a la geometría del útil. El tirafondo empleado tiene 40 mm más de caña y, en la parte superior de la misma, se le realizaron tres planos a 120 grados para poder colocar bandas extensométricas y así conocer la tensión del tirafondo en todo momento, disminuyendo la sección neta del fuste de 390.6 mm² a 353.1 mm². En la Figura 8.23 se muestra el tornillo empleado y un detalle de la colocación de las bandas extensométricas.

El tirafondo se alojó en un útil que simula la sujeción completa y que ya fue descrito en las Figuras 1 y 2 del capítulo 7 de la presenta tesis. Este dispositivo incluye todos los componentes del sistema de sujeción salvo la placa de asiento, es decir, que está compuesto por una placa acodada, un tirafondo, una vaina y un clip.

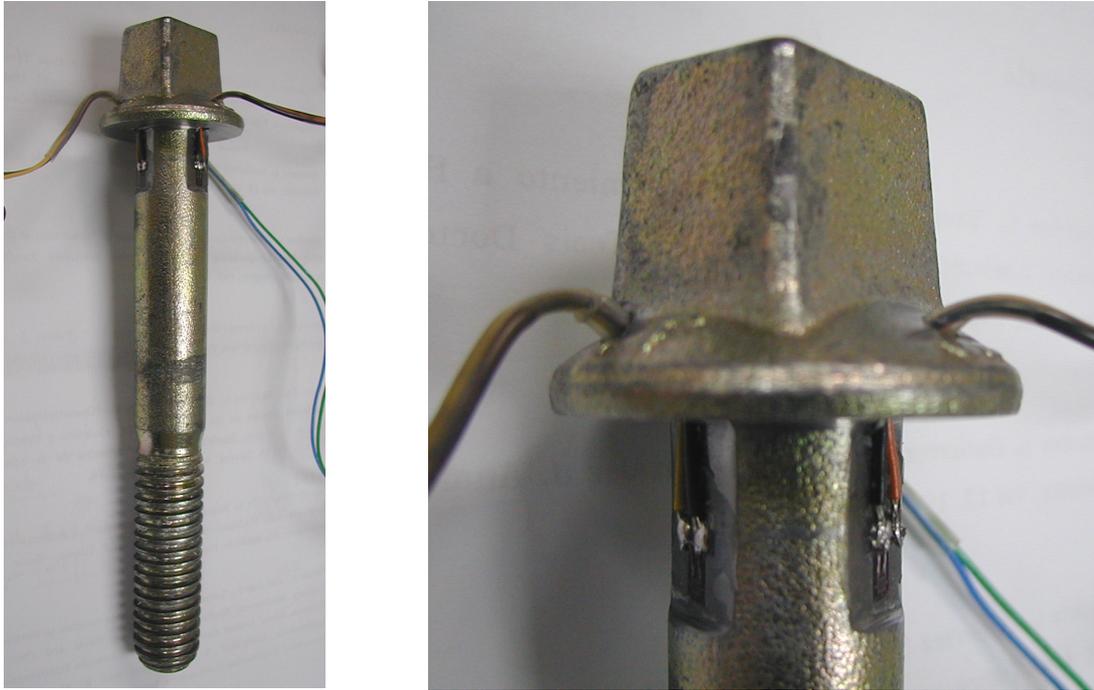


Figura 8.23.- Tornillo empleado y colocación de las bandas extensométricas

4.1. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

La primera de las operaciones realizadas fue la calibración de las bandas extensométricas. Se empleó para ello el dispositivo empleado en la rotura de los tornillos y descrito en la Figura 60 del capítulo 7, obteniéndose la deformación del tornillo como la media de la deformación registrada por cada una de las tres bandas.

El resultado obtenido en esta calibración es el que se muestra en la Figura 8.24, donde puede observarse la linealidad de funcionamiento que permite determinar que el módulo de elasticidad estimado es de 205 GPa.

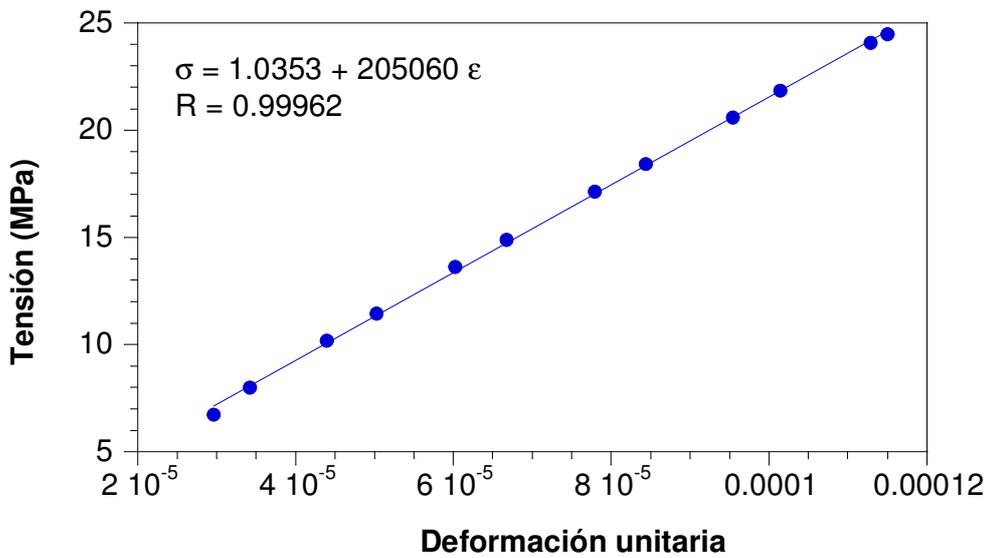


Figura 8.24.- Calibración del tornillo

El siguiente de los parámetros analizados fue la fuerza introducida sobre el anclaje por el simple hecho de apretar el tirafondo. Se realizó el apretado de 5 sujeciones en las que se varió el contenido de la humedad de la placa A2 para ver si este podría tener alguna influencia sobre la fuerza aplicada al tornillo. En el gráfico de la Figura 8.25, se representa la evolución de la deformación del tornillo en función del par de apriete y de la humedad de la placa A2.

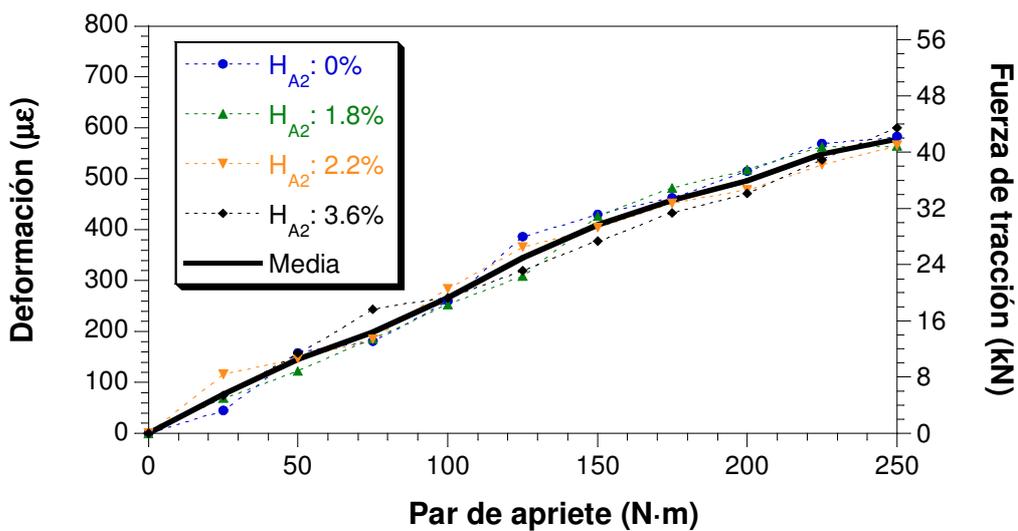


Figura 8.25.- Relación entre el par aplicado y la deformación medida

Se puede apreciar que la humedad de la placa A2 tiene poca influencia, y que en todos los casos las curvas son similares. Observando la curva media se puede constatar que un apriete de 250 N·m (apriete nominal) se traduce en una deformación del tornillo de 600 microdeformaciones, o lo que es lo mismo, una fuerza de tracción de 44 kN, aproximadamente, que equivale a una tensión de 124.6 MPa, que entra en el dominio de comportamiento elástico.

Para verificar estos resultados se realizó una medida directa de la fuerza en el tornillo interponiendo una célula de carga entre el útil que sujeta la placa A2 con el clip y el útil que sujeta la vaina. En la Figura 8.26 se muestra dispositivo empleado para la medida directa de la fuerza del apriete, en el que se puede apreciar la disposición de la célula de carga. Al intercalar un elemento intermedio, fue necesario alargar la caña del tornillo para tener la misma longitud roscada que en los casos anteriores. El tornillo se fabricó a partir de uno estándar, soldando un tramo auxiliar, como puede verse en la Figura 8.27.



Figura 8.26.- Dispositivo empleado para la medida de la fuerza en el tornillo

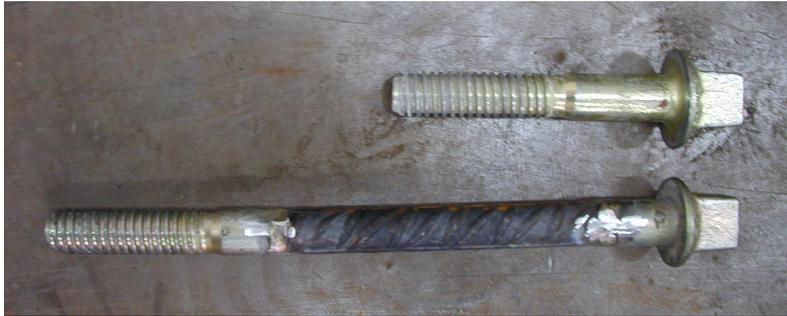


Figura 8.27.- Tornillo empleado para la medida de la fuerza en el tornillo

En el gráfico de la Figura 8.28, se comparan la carga registrada directamente con la estimada a partir de la medida de la deformación de las tres bandas extensométricas. La carga real sólo pudo definirse hasta un par de 180 N·m, momento este en el que se partió el tornillo por una de sus soldaduras.

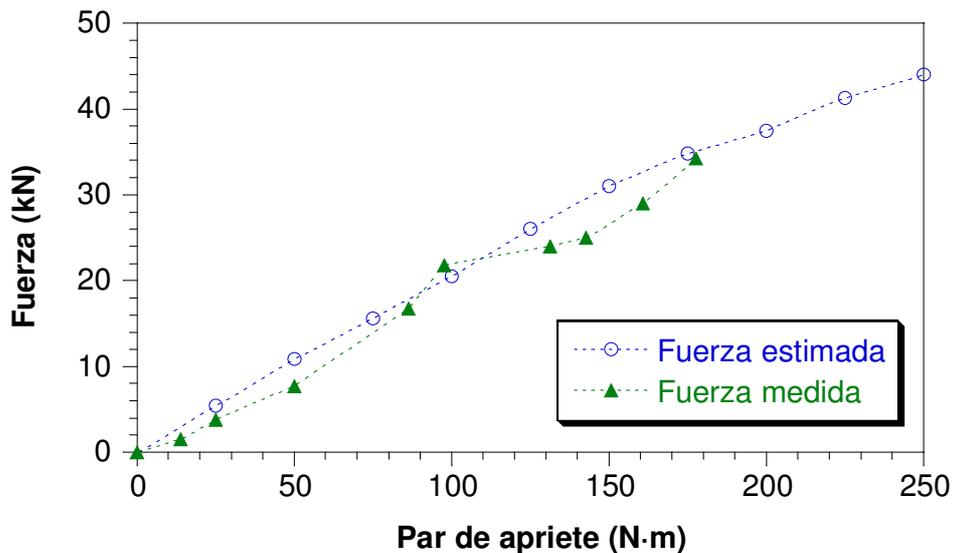


Figura 8.28.- Comparación de la fuerza real y la estimada

Como puede observarse, hasta el momento de la rotura del tornillo, las dos fuerzas, la estimada y la medida son prácticamente coincidentes, por lo que se comprueba que las bandas extensométricas aportan una información fidedigna del valor de la fuerza que actúa sobre el anclaje y por tanto el proceso experimental desarrollado es adecuado.

4.2. ESFUERZOS SUFRIDOS POR EL ANCLAJE ANTE UNA SOLICITACIÓN ESTÁTICA

En este apartado se realiza un estudio del comportamiento del anclaje ante esfuerzos estáticos que ocasionan un desplazamiento horizontal relativo entre el carril y la traviesa, analizando la influencia del par de apriete aplicado a la sujeción.

Se evitó introducir una variable más en el estudio, seleccionando placas acodadas y vainas con el mismo contenido de humedad (1.8 % y 1 %, respectivamente).

Para evaluar la influencia del par de apriete, se analizaron tres situaciones de apriete diferentes, como se puede observar en la Figura 8.29, donde se representa la variación de la carga en el tornillo frente al desplazamiento del patín del carril.

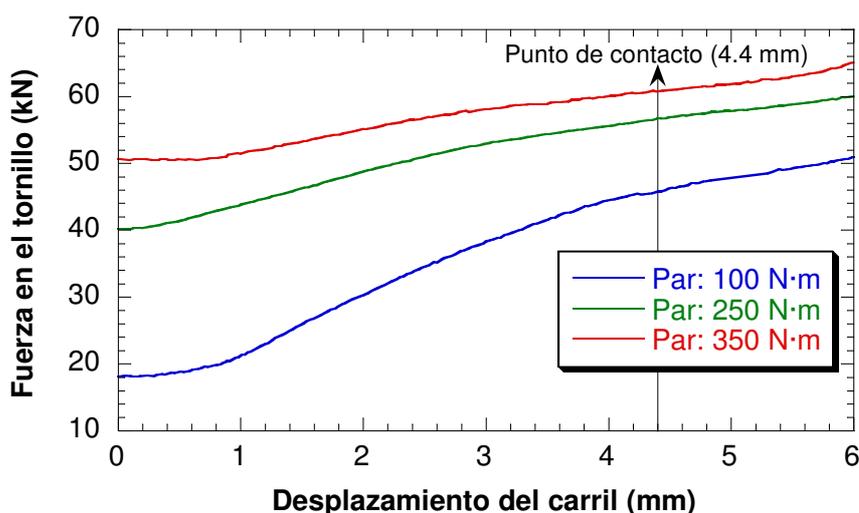


Figura 8.29.- Evolución de la fuerza en el tornillo en función del desplazamiento del patín y del par de apriete aplicado, tras un ensayo estático

En ella, se observa la gran influencia del par de apriete aplicado en la fuerza inicial, pasando de valores inferiores a 20 kN para el caso de 100 N·m a más de 50 kN para 350 N·m. El valor obtenido para el par de 250 N·m difiere en 4 unidades del obtenido en los ensayos previos de calibración, pero se puede considerar una dispersión aceptable tras observar la Figura 8.25. También se puede comprobar que a pesar de incrementarse en mayor medida el esfuerzo del anclaje para aprietes bajos, la desventaja de inicio no se recupera incluso con grandes

desplazamiento del carril. Otro aspecto a destacar es que, independientemente del par de apriete suministrado, y como ya se comprobó en el capítulo 7, a partir de un movimiento próximo a los 4.4 mm la pieza acodada, en su orificio central, contacta con el fuste del tornillo, lo que induce mayores esfuerzos a estos últimos, incluso cuando la placa A2 pierde prestaciones por deformaciones excesivas, aspecto éste, manifestado como un punto de inflexión sobre la curva.

Resumiendo, el máximo esfuerzo medido sobre el anclaje en el ensayo estático sucede con el mayor de los pares de apriete, 350 N·m. Antes del contacto del tornillo con la placa su valor es de 60 kN, aproximadamente, alcanzando los 65 kN para un desplazamiento del carril de 6 mm. Estos valores están muy por debajo del límite de funcionamiento de las vainas que como se vio en el capítulo anterior, para una humedad del 1 %, se sitúa en torno a 140 kN.

4.3. Esfuerzos sufridos por el anclaje ante una sollicitación de impacto

En este apartado se realiza un análisis similar al desarrollado en el apartado anterior, intentando comprobar los esfuerzos generados en el anclaje ante sollicitaciones de impacto.

El gráfico de la Figura 8.30, recoge los resultados obtenidos. Su semejanza con los incluidos en el gráfico anterior, permite asumir los mismos comentarios derivados de la observación de la misma.

Señalar además que, en este caso, el fallo de las placas A2 ocurre previo al contacto de la misma con el tornillo, por lo que en las curvas se refleja este hecho con una pequeña descarga súbita. Una vez rota la placa A2 se asienta sobre el tornillo y se continua transmitiendo esfuerzo sobre el mismo como ocurría en el estudio estático a partir de los 4.4 mm, aproximadamente.

El máximo esfuerzo medido, al igual que ocurría en el caso estático, sobreviene para el mayor par aplicado, 350 N·m, no superando los 80 kN antes de la rotura de la placa acodada. Este valor es muy inferior al límite de funcionamiento de las vainas que como se vio en el capítulo anterior, para una humedad del 1 %, se sitúa en torno a 174 kN.

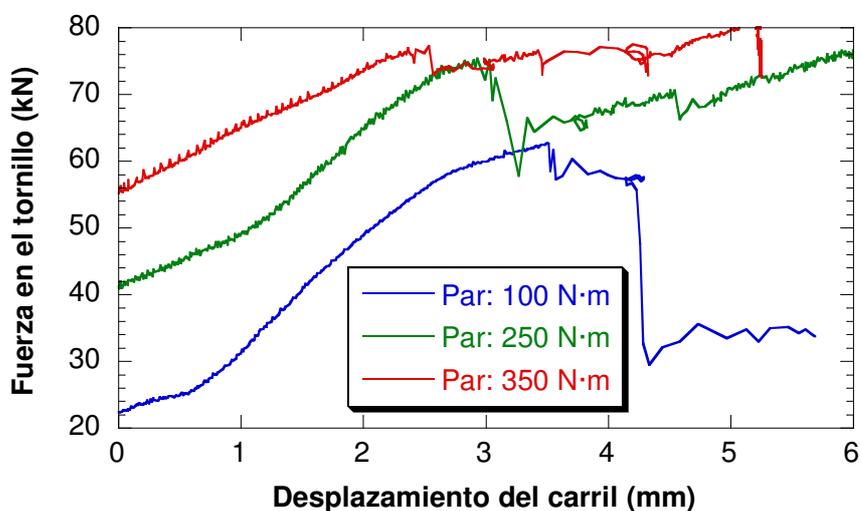


Figura 8.30.- Evolución de la fuerza en el tornillo en función del desplazamiento del patín y del par de apriete en un ensayo de impacto

Al comparar los dos comportamientos (Figura 8.31), se aprecia claramente que el anclaje soporta mayores esfuerzos ante un impacto. El valor máximo de carga tiene lugar para valores de desplazamiento del carril más pequeños, coincidiendo con la rotura de la placa acodada.

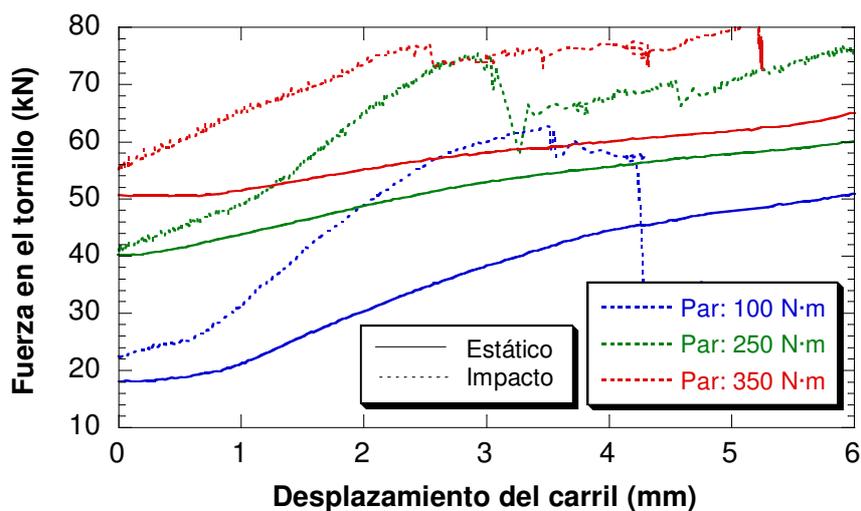


Figura 8.31.- Comparativa de la evolución de la fuerza en el tornillo en función del desplazamiento del patín y del par de apriete en un ensayo estático y de impacto

4.4. ESFUERZOS SUFRIDOS POR EL ANCLAJE ANTE UNA SOLICITACIÓN DE FATIGA

En este apartado se realiza un análisis similar al desarrollado en los apartados previos, intentando comprobar los esfuerzos generados en el anclaje ante sollicitaciones de fatiga, teniendo en cuenta aspectos como la variación del par de apriete del conjunto de la sujeción o del contenido de humedad de la vaina.

Para el estudio de los esfuerzos sufridos por el tornillo ante sollicitaciones de fatiga se empleó la metodología Locati con los parámetros descritos en el apartado 2.3 del capítulo 7.

En los gráficos de la Figura 8.32 y Figura 8.33 se muestra la evolución de la fuerza sobre el anclaje a lo largo del ensayo de fatiga para un apriete de 100 y 350 N·m, respectivamente. En dichas figuras se representan los niveles máximo, mínimo y medio de las ondas de fuerza aplicada sobre el tornillo, así como la amplitud de las mismas.

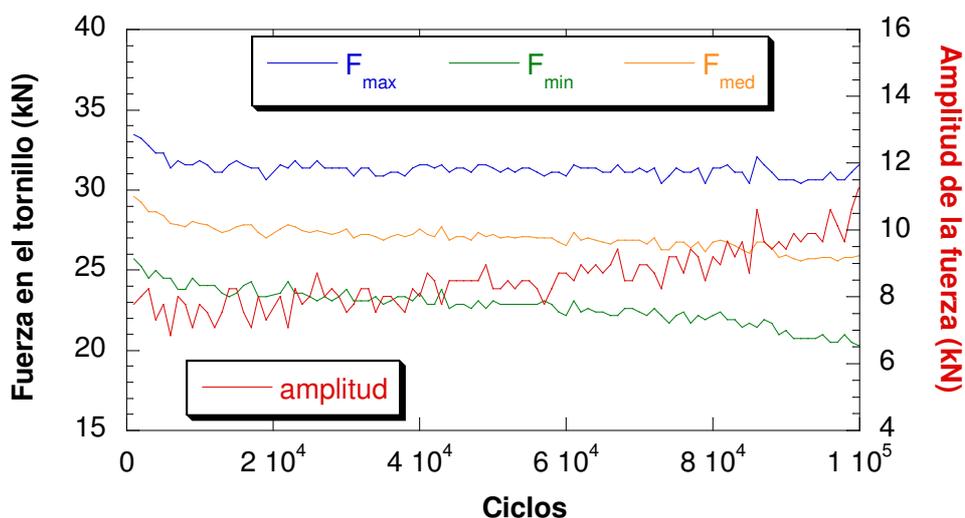


Figura 8.32.- Evolución de la fuerza del tornillo en un ensayo Locati con par de 100 N·m

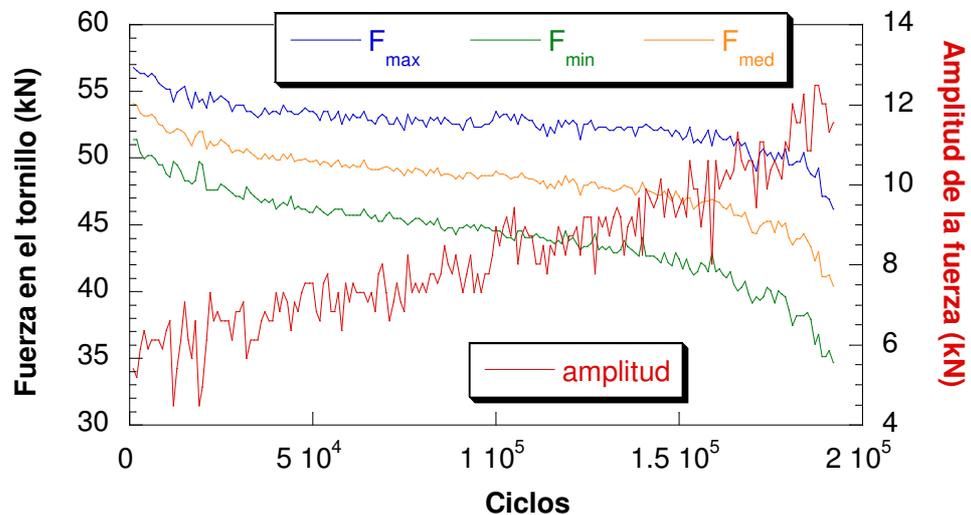


Figura 8.33.- Evolución de la fuerza del tornillo en un ensayo Locati con par de 350 N·m

Se comprueba, que en los dos casos con diferentes pares de apriete la amplitud de la fuerza es creciente, como cabe esperar, ya que cada 20.000 ciclos y por definición del ensayo Locati se incrementa en 2 kN la fuerza máxima aplicada sobre el patín.

Por el contrario, los valores absolutos, y con ellos el nivel medio, de la fuerza disminuyen continuamente, a pesar de que el nivel medio de la carga aplicada al patín también es creciente. Este fenómeno es debido a la fluencia producida en los filetes del interior de la vaina.

Esta fluencia sufrida por la vaina se traduce en una relajación de la tensión soportada por el tornillo que puede afectar de forma importante a la fuerza de apriete del conjunto, uno de los parámetros fundamentales de la sujeción, reduciéndola tras la aplicación de un esfuerzo dinámico cíclico, siempre y cuando la pérdida de fuerza sea suficiente para destensar el clip.

En la Figura 8.34 se muestran los valores del decremento relativo del nivel medio de las fuerzas sufridas por el tornillo en el ensayo Locati.

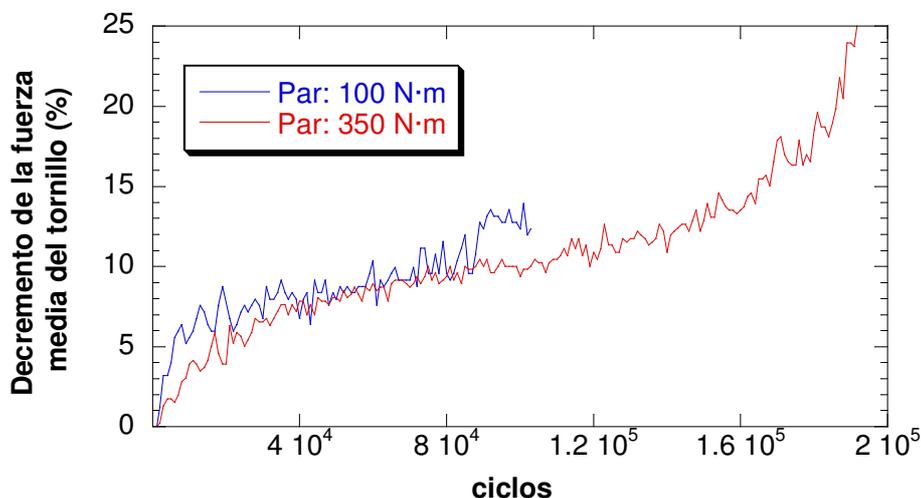


Figura 8.34.- Decremento del nivel medio de la fuerza del tornillo en un ensayo Locati en función del par de apriete

En la gráfica se aprecia una coincidencia de las dos curvas hasta el punto en el que comienza a fallar la placa A2 debido a una deformación excesiva. Las dos curvas mantienen una pendiente decreciente desde el inicio y, a partir de este momento, se vuelve creciente.

Se comprueba, por tanto, que a pesar de la diferencia tan grande existente en los valores absolutos de fuerza media iniciales, 55 kN para 350 N·m y 30 kN para 100 N·m, la relajación porcentual sufrida por el tornillo hasta que se produce el fallo de la placa A2 es similar en ambos casos, independientemente del par de apriete aplicado a la sujeción.

Para comprobar la integridad de la vaina sometida a fatiga por efecto de las cargas aplicadas por el patín del carril se construye un diagrama de Goodman recurriendo a los resultados obtenidos en el capítulo 7 para vainas aisladas con un contenido de humedad semejante a las empleadas en este apartado (en torno al 1 %). La carga de rotura se situó en 140 kN, mientras que el límite de fatiga obtenido a partir del ensayo LOCATI se estableció para una fuerza máxima de 70 kN y mínima de 5 kN, o lo que es lo mismo, un nivel medio de 37.5 kN y una amplitud de 32.5 kN.

Todos estos datos se han representado en la Figura 8.35, junto con los datos obtenidos de fuerzas medidas en el anclaje con pares de 100 y 350 kN, al principio y final del ensayo.

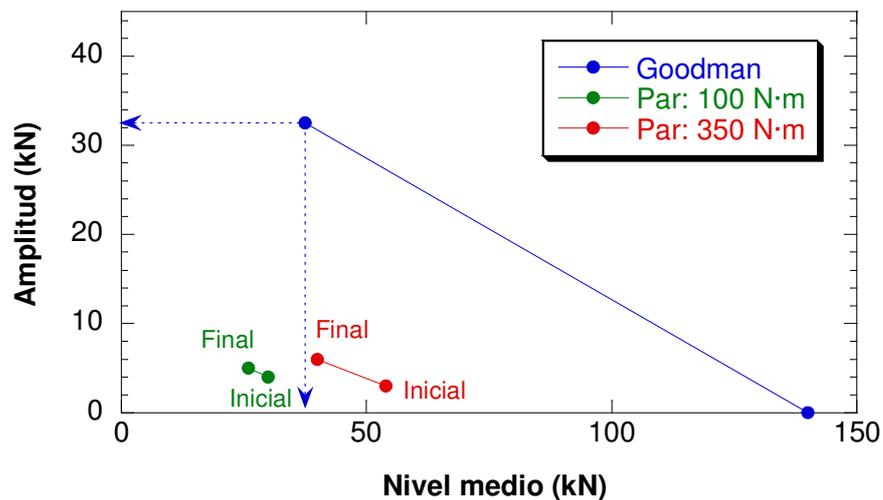


Figura 8.35.- Diagrama de Goodman

Se puede comprobar que las combinaciones de fuerza media y amplitud medidas no llegan a poner en peligro, independientemente del par aplicado, la integridad del anclaje.

Para verificar la posible pérdida de tensión en el anclaje por efecto de la fluencia sufrida por los filetes de la vaina se realizaron dos ensayos de fatiga en idénticas condiciones y variando únicamente la flexibilidad de la vaina. La variación de la flexibilidad se consiguió en base a diferentes tratamientos de humedad: una vaina seca y otra con un contenido de humedad de 4.7 %. Mientras, la humedad de la placa acodada se mantuvo constante en ambos casos (0.8 %)

El ensayo trata de reproducir las condiciones de un ensayo de cargas repetidas indicadas en la norma UNE-EN 13146-4:2003 [59] con $\alpha=33^\circ$, $\beta=2.86^\circ$, frecuencia de 5 Hz, fuerza mínima de 5 kN y fuerza máxima de 75 kN ($P_v/\cos \alpha$).

El útil de ensayo empleado, descrito anteriormente, sólo permite la aplicación de cargas paralelas a la base del patín del carril por lo que las cargas aplicadas corresponden, únicamente a la componente en esa dirección. En la Figura 8.36, se

muestra un esquema de cómo se descompone la fuerza aplicada sobre el carril en la componente paralela a la traviesa.

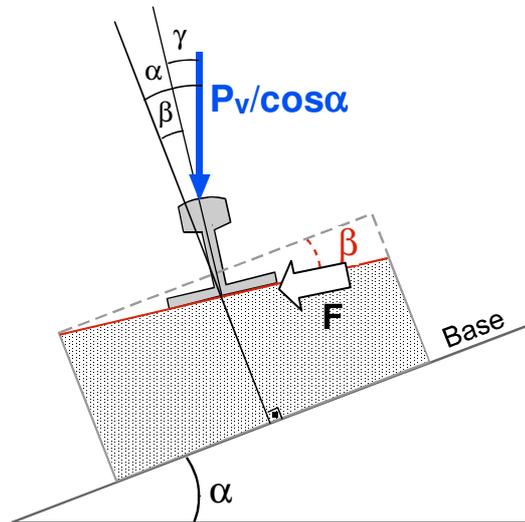


Figura 8.36.- Fuerza paralela a la base del carril

Por tanto, la fuerza paralela a la base de la traviesa, también es de naturaleza sinusoidal, con una frecuencia de 5 Hz y comprendida entre 2.5 y 37.7 kN. En ambos casos se aplicaron 500.000 ciclos de fatiga monótona.

En la Figura 8.37, se representa la evolución de los desplazamientos máximo y mínimo a lo largo del ensayo.

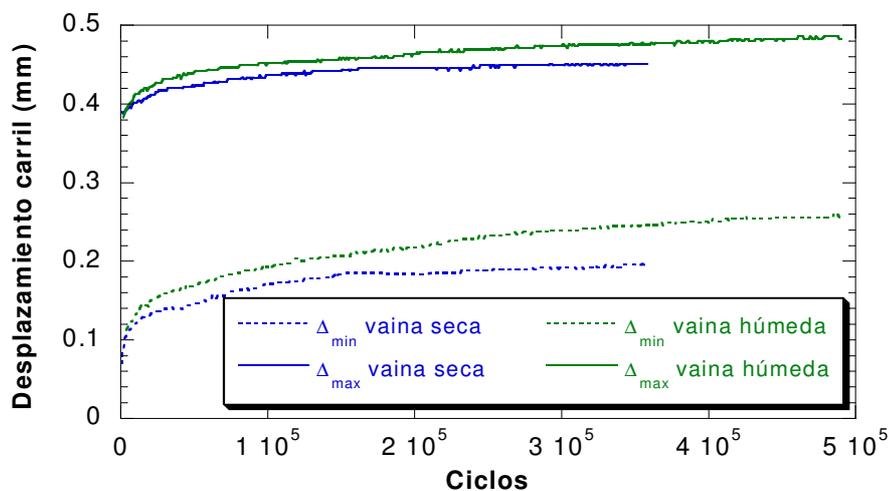


Figura 8.37.- Evolución de los desplazamientos

Como puede observarse en la figura, el desplazamiento del patín del carril, que inicialmente es igual en ambos casos, crece más rápido con la vaina húmeda. Es decir, que el incremento de humedad de la vaina perjudica el comportamiento en fatiga de la placa acodada A2, y por tanto al del sistema completo.

En la Figura 8.38 se muestra, comparativamente, la evolución de la amplitud y el nivel medio de la fuerza medida en el tornillo del anclaje, para las dos vainas empleadas con diferentes contenidos de humedad.

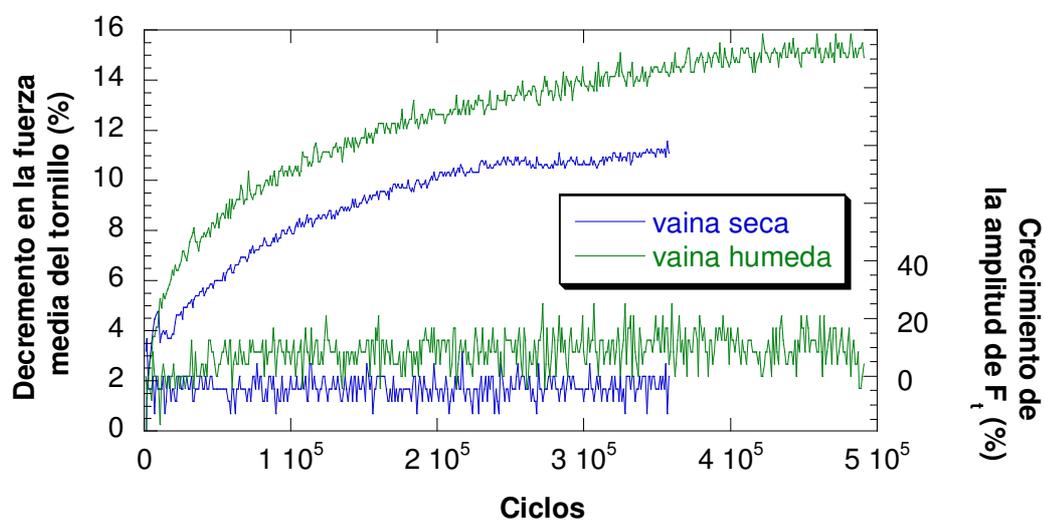


Figura 8.38.- Evolución de la amplitud y del nivel medio de la fuerza del tornillo en un ensayo de fatiga monótona en función de la humedad de la vaina

En este caso, al tratarse de una fatiga monótona, se aprecia que la amplitud de la carga se mantiene prácticamente constante en ambos casos, siendo el nivel medio el que disminuye a medida que transcurre el ensayo. En la figura puede apreciarse un mayor decremento en el valor relativo del nivel medio para la vaina húmeda, al igual que también se aprecia un ligero incremento en la amplitud.

Este hecho confirma que la relajación de tensiones sufrida por el anclaje por efecto de una acción cíclica depende en gran medida de la naturaleza de la vaina, ya que es el único componente que diferencia a los dos sistemas ensayados y se alcanza una variación de la relajación cercana al 40 %.