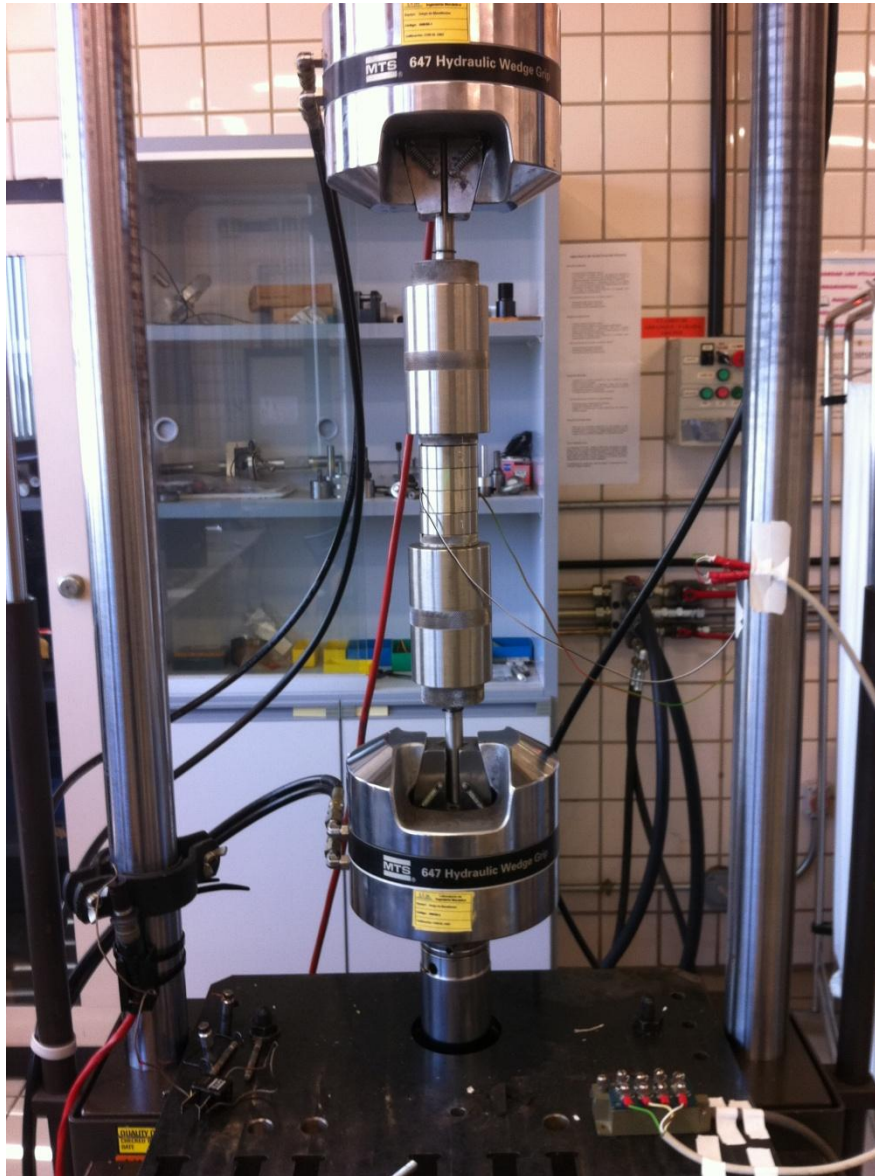


6 Caracterización experimental de la unión atornillada

En este apartado se recogerán los resultados experimentales obtenidos del ensayo de la unión atornillada.

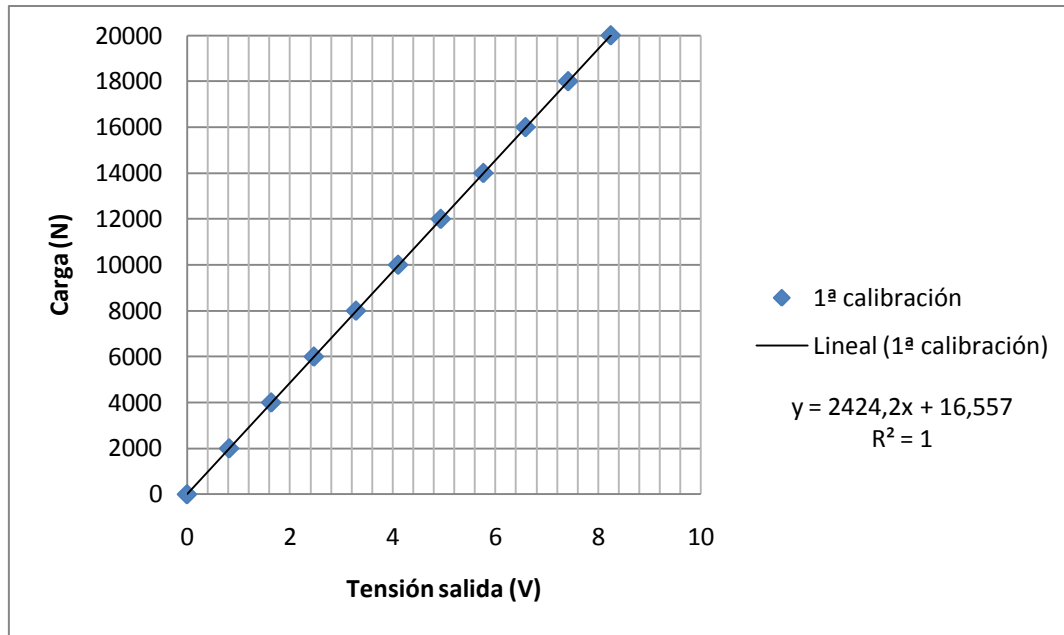
6.1 Calibración del circuito extensométrico

Para caracterizar las medidas de las galgas del tornillo, se han realizado tres series de carga a la unión sin apriete previo, de diez medidas en el intervalo de 0 a 20 kN.



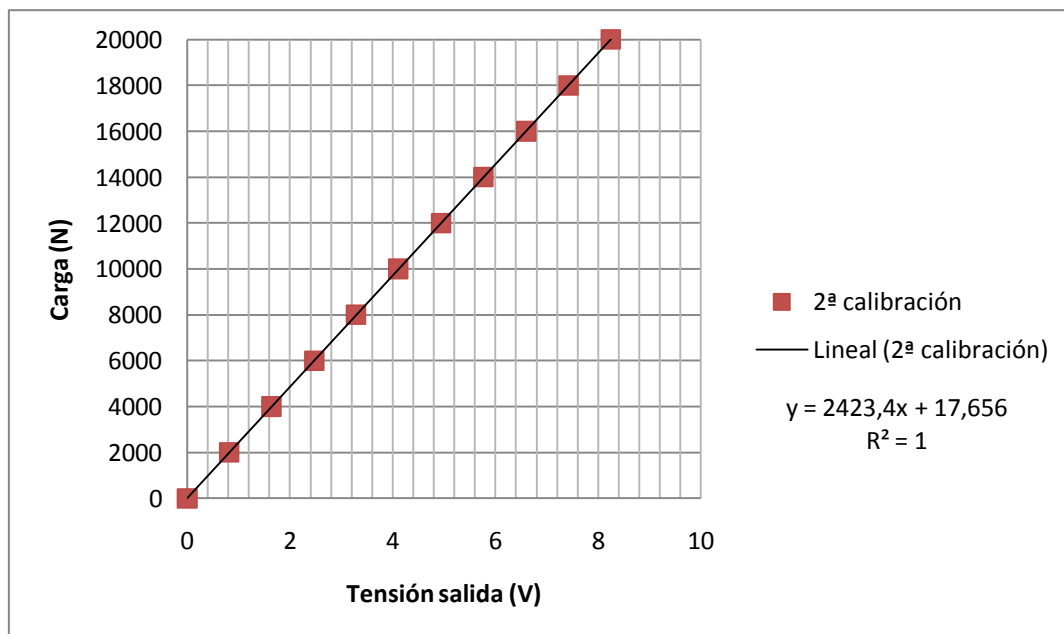
Primera serie:

Carga (kN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0,00	0,82	1,64	2,47	3,29	4,11	4,94	5,77	6,59	7,42	8,25



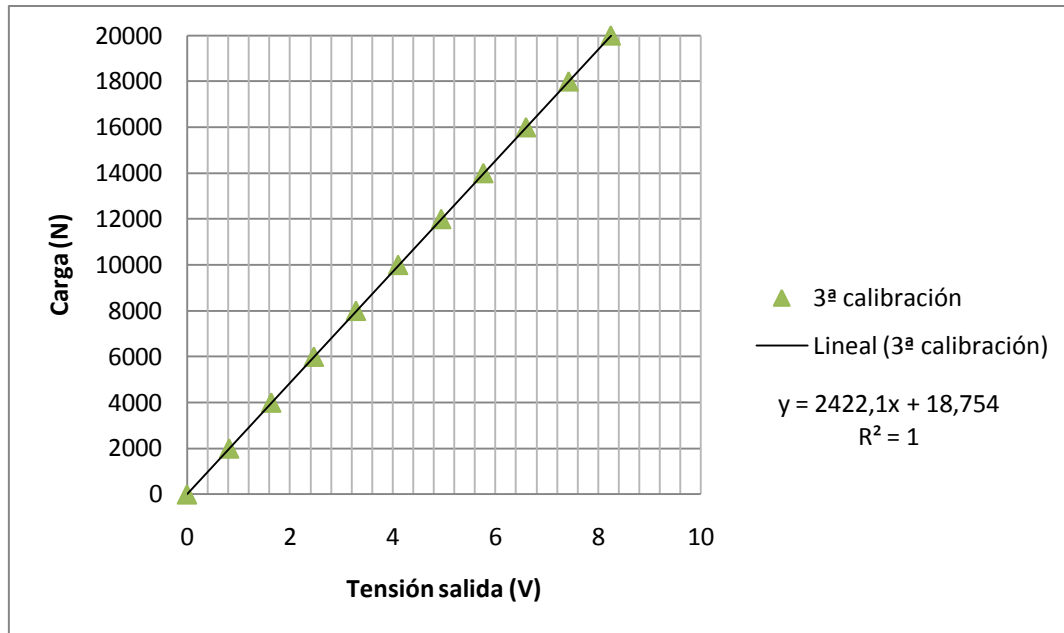
Segunda serie:

Carga (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0,00	0,82	1,64	2,47	3,29	4,11	4,94	5,77	6,6	7,42	8,25



Tercera serie:

Carga (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0,00	0,82	1,64	2,47	3,29	4,11	4,95	5,77	6,6	7,43	8,25



Finalmente la relación lineal de la fuerza de tracción en el tornillo con el voltaje de salida del puente, calculada utilizando todo los datos anteriores, resulta:

$$F_t(N) = 2423,25 \cdot V_o(v) + 17,66$$

6.2 Ensayo de Par de apriete-Fuerza de apriete.

En este apartado se recogerán los resultados los ensayos para caracterizar la relación par-fuerza, y con ello poder estimar los coeficientes de rozamiento de la unión atornillada.



Se han realizado dos series de medidas por cada condición de lubricación, cada una de cinco aprietes de aproximadamente 15 N·m y cinco de 20 n·m.

6.2.1 Par aplicado sin ninguna lubricación

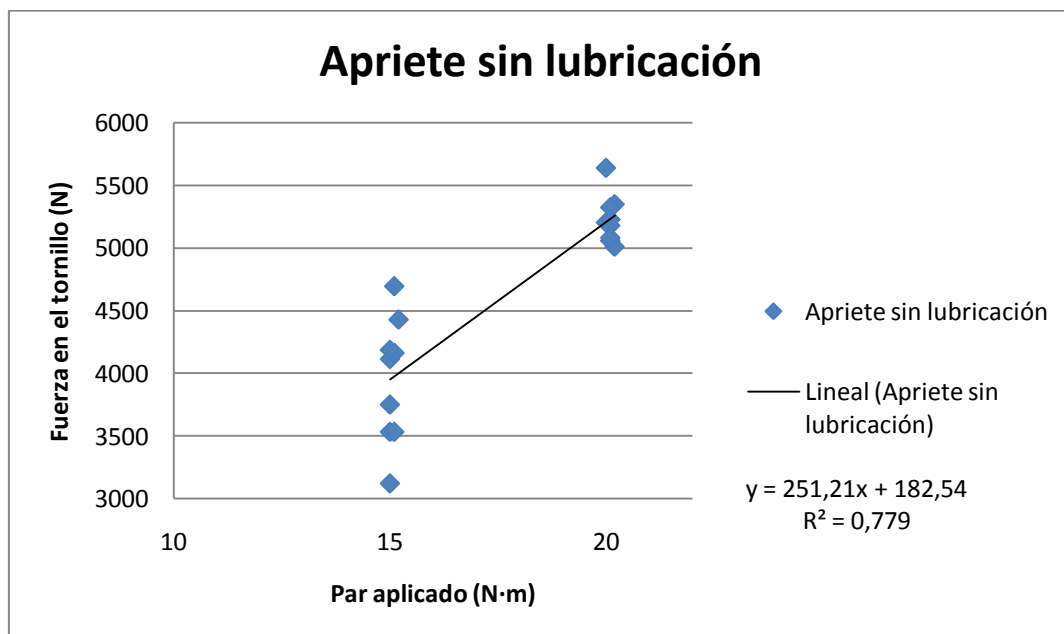
El apriete se realizó sin ningún tipo de lubricación, ni en la rosca ni en las superficies de la arandela de la tuerca.

Primera serie sin lubricación:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	20,1	20,1	20,2	20,1	20,0
Voltaje de salida (v)	1,28	1,45	1,69	1,54	1,45	2,08	2,13	2,06	2,15	2,32
Fuerza en el tornillo (N)	3119	3531	4113	3749	3531	5058	5179	5010	5228	5640

Segunda serie sin lubricación:

Par aplicado (N·m)	15,1	15,1	15,1	15,2	15	20,2	20	20,1	20,1	20,1
Voltaje de salida (v)	1,71	1,93	1,71	1,82	1,72	2,2	2,14	2,19	2,15	2,09
Fuerza en el tornillo (N)	4161	4695	4161	4428	4186	5349	5203	5325	5228	5082



6.2.2 Par aplicado con lubricación en las superficies

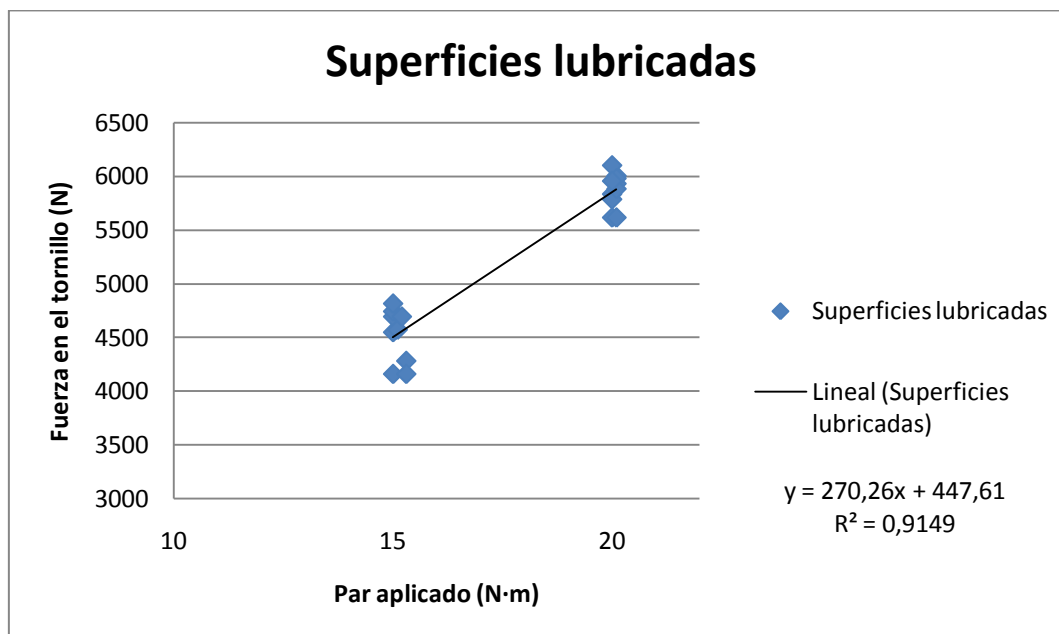
El apriete se realizó con lubricación en las superficies de la arandela de la tuerca, mediante la aplicación de una grasa multifuncional “Renolit EP 2”, disponible en el laboratorio. La rosca no se lubricó.

Primera serie con lubricación en las superficies:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,0	15,3	15,1	15,3	20,0	20,1	20,0	20,1	20,0
Voltaje de salida (v)	1,87	1,71	1,76	1,88	1,71	2,31	2,31	2,4	2,47	2,51
Fuerza en el tornillo (N)	4549	4161	4283	4573	4161	5615	5615	5833	6003	6100

Segunda serie con lubricación en las superficies:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,1	15,0	15,2	15,0	20,0	20,1	20,1	20,1	20,0
Voltaje de salida (v)	1,93	1,88	1,95	1,93	1,98	2,38	2,44	2,46	2,42	2,45
Fuerza en el tornillo (N)	4695	4573	4743	4695	4816	5785	5930	5979	5882	5955



6.2.3 Par aplicado con lubricación en la rosca

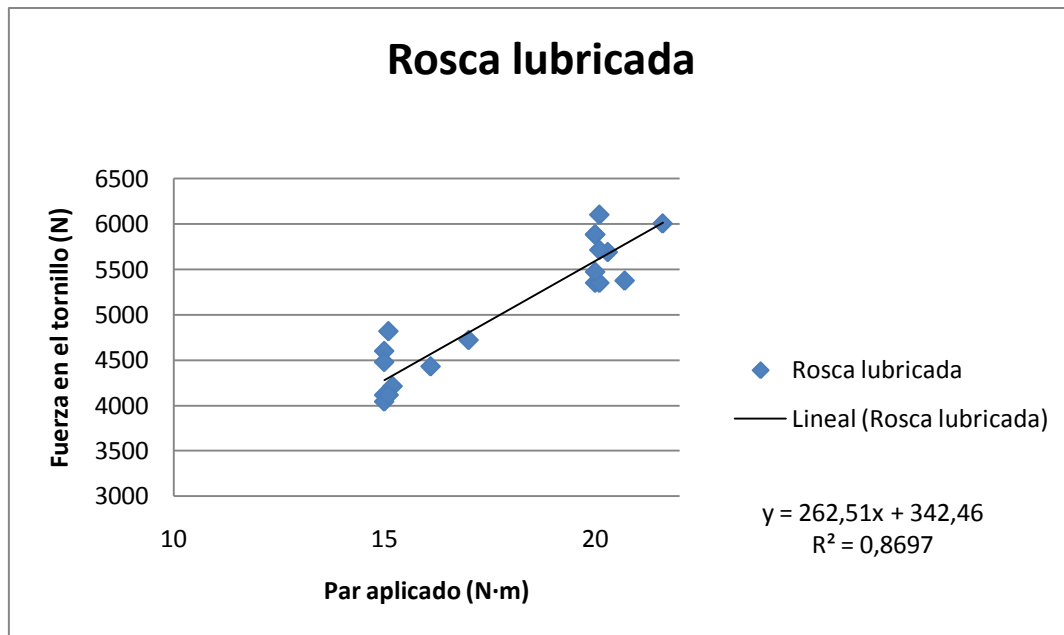
El apriete se realizó sin lubricación en las superficies de la arandela de la tuerca, por lo que se procedió a su limpieza, ya que se encontraban engrasadas del ensayo anterior. La rosca se lubricó con la misma grasa utilizada en el ensayo anterior.

Primera serie con lubricación en la rosca:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,1	15,0	15,1	15,2	20,0	20,3	20,1	20,1	21,6
Voltaje de salida (v)	1,89	1,69	1,84	1,98	1,73	2,2	2,34	2,51	2,35	2,47
Fuerza en el tornillo (N)	4598	4113	4476	4816	4210	5349	5688	6100	5712	6003

Segunda serie con lubricación en la rosca:

Par aplicado (N·m)	16,1	17,0	15,0	15,0	15,1	20,0	20,7	20,1	20,0	20,0
Voltaje de salida (v)	1,82	1,94	1,69	1,66	1,69	2,42	2,21	2,2	2,42	2,25
Fuerza en el tornillo (N)	4428	4719	4113	4040	4113	5882	5373	5349	5882	5470



6.2.4 Par aplicado con lubricación en la rosca y en las superficies de contacto

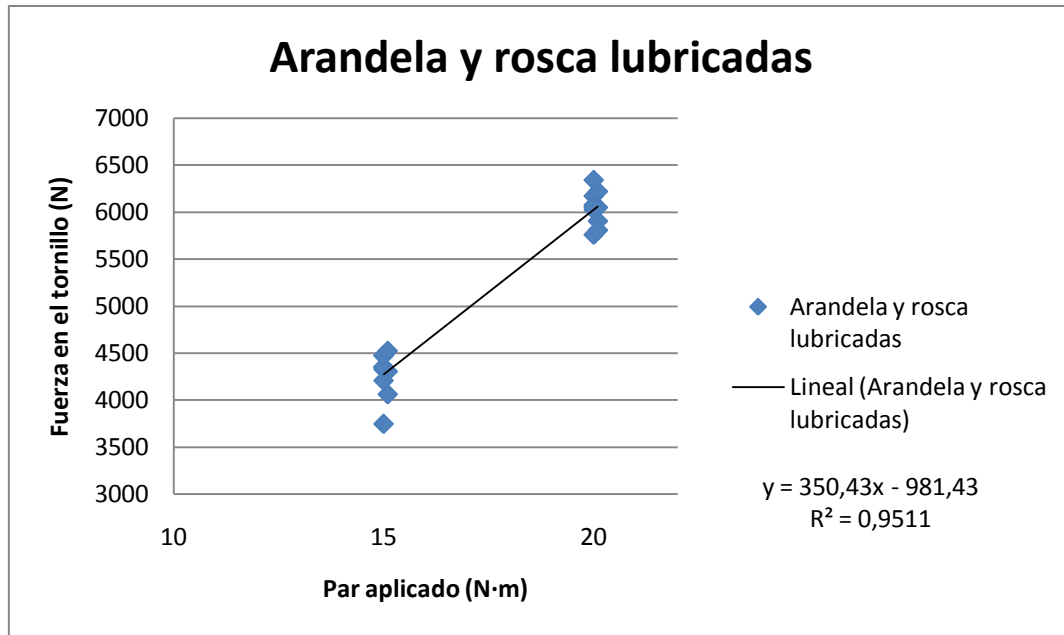
Este ensayo se realizó con un engrasamiento tanto de las superficies de la arandela como de la rosca del tornillo y tuerca.

Primera serie con lubricación en la rosca y en las superficies de contacto:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,0	15,1	15,1	15,0	20,0	20,1	20,1	20,0	20,0
Voltaje de salida (v)	1,54	1,78	1,77	1,67	1,73	2,37	2,43	2,39	2,48	2,54
Fuerza en el tornillo (N)	3749	4331	4307	4064	4210	5761	5906	5809	6027	6173

Segunda serie con lubricación en la rosca y en las superficies de contacto:

Par aplicado (N·m)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	20,1	20,1	20,0	20,0	20,0
Voltaje de salida (v)	1,84	1,79	1,79	1,84	1,86	2,49	2,56	2,5	2,49	2,61
Fuerza en el tornillo (N)	4476	4355	4355	4476	4525	6052	6221	6076	6052	6342



6.2.5 Estimación de los coeficientes de rozamiento

Con los resultados obtenidos en los ensayos de par-fuerza de apriete se puede plantear un sistema de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas, obteniendo una ecuación por cada estado de lubricación:

1. Sin lubricación:

$$T_t = F (\mu_{c \text{ no lubricado}} \cdot r_c + \tan (\varphi'_{\text{no lubricado}} + \alpha) \cdot \frac{d_m}{2})$$

2. Con lubricación en las superficies

$$T_t = F (\mu_{c \text{ lubricado}} \cdot r_c + \tan (\varphi'_{\text{no lubricado}} + \alpha) \cdot \frac{d_m}{2})$$

3. Con lubricación en la rosca

$$T_t = F (\mu_{c \text{ no lubricado}} \cdot r_c + \tan (\varphi'_{\text{lubricado}} + \alpha) \cdot \frac{d_m}{2})$$

4. Con lubricación en la rosca y en las superficies de contacto

$$T_t = F (\mu_{c \text{ lubricado}} \cdot r_c + \tan (\varphi'_{\text{lubricado}} + \alpha) \cdot \frac{d_m}{2})$$

Donde la relación F/T_t de cada estado se obtiene de la recta de regresión de los ensayos de par-fuerza.

Haciendo uso de las relaciones:

$$\mu' = \tan (\varphi') \quad \mu' = \mu / \cos \beta$$

Se obtienen que los coeficientes de rozamiento son:

μ_c no lubricado	0,1583
μ_{no} lubricado	0,1697
μ_c lubricado	0,1432
μ lubricado	0,1428

6.2.6 Conclusiones

Los coeficientes de rozamiento dependen del estado superficial y del estado de lubricación de la unión atornillada (como se recoge en la Tabla 11 de la teoría). Aunque los intervalos de rozamientos posibles son amplios, sus valores se encuentran comprendidos entre 0,08 a 0,21.

Es difícil dar un valor exacto del rozamiento de la unión atornillada aunque se conozcan el estado superficial y el estado de lubricación de la misma. Por eso es tan importante la experiencia o la realización de ensayos para poder estimar mejor los valores del rozamiento.

Además para una misma unión atornillada, hay una gran dispersión entre la fuerza de apriete obtenida de un apriete a otro aunque se controle el par aplicado con una llave dinamométrica, como se ha podido comprobar en los ensayos, aunque con el uso de lubricación se reduce en cierta medida esta dispersión.

6.3 Ensayos de aplicación de distintas fuerzas separadoras a la unión pretensada

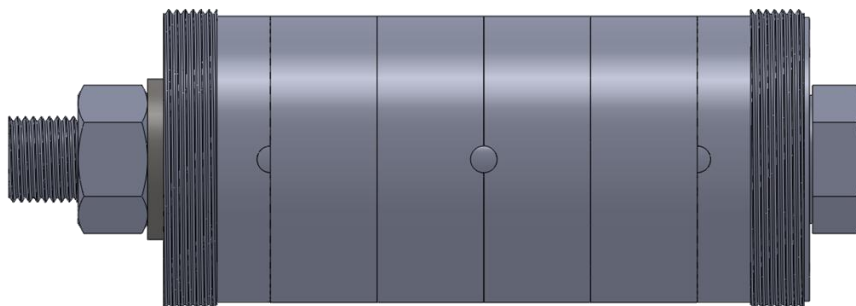
En estos ensayos se aplicará una fuerza separadora a la unión atornillada apretada con un par determinado ($30 \text{ N} \cdot \text{m}$). El ensayo se repetirá con las diferentes disposiciones de los casquillos de la unión, para que la fuerza separadora pueda actuar sobre distintas zonas de la unión, yendo desde la aplicación en la zona más cercana a la cabeza del tornillo y tuerca, hasta la zona media.

Como estos ensayos se realizaron otro día, se procedió a calibrar de nuevo el sistema de extensometría obteniéndose la siguiente relación:

$$F_t(N) = 2692,50 \cdot V_o(v) - 19,80$$

6.3.1 Fuerza separadora aplicada en la zona exterior

En este ensayo los casquillos roscados se colocan de manera que queden en contacto con la cabeza del tornillo en un extremo y con la arandela de la tuerca en el otro extremo.



Se le aplico el par de $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ con la llave dinamométrica obteniéndose una tensión de salida de 3,52 ν que corresponde a una fuerza de apriete de 9458 N .

1ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

Tras el apriete se rosco al utillaje que permite montarlo en la máquina de tracción. Se monto en la máquina de tracción y se puso en cero la señal de la tensión de salida, por lo que el aparato de extensometría medirá los incrementos de carga que sufre el tornillo. Y finalmente, se le aplicó un fuerza separadora con una carga desde 0 a 20 KN , en incrementos de 2 KN por carga, obteniéndose las siguientes medidas:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0,00	0,08	0,19	0,33	0,49	0,73	1,06	1,71	2,46	3,21	3,98

Que se traducen en los siguientes valores de fuerza en el tornillo:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
F tornillo (KN)	9,46	9,67	9,97	10,35	10,78	11,42	12,31	14,06	16,08	18,10	20,17

Como se vio en el apartado 4.2.3 “Modelo de esfuerzos en la unión atornillada ante una fuerza separadora”, la fuerza a la que quedarán sometidos el tornillo ($F_t^{exterior}$) y las piezas unidas ($F_c^{exterior}$), dependerán del apriete inicial ($F_{inicial} = 9458 \text{ N}$), de las rigideces equivalentes del tornillo ($K_{teq}^{exterior} = 204,96 \text{ KN/mm}$) y de las piezas unidas ($K_{peq}^{exterior} = 2541,7 \text{ KN/mm}$), y también de la fuerza separadora a la que está sometido la unión (P), relacionados mediante las siguientes expresiones:

$$F_t^{exterior} = F_{inicial} + \frac{K_{teq}^{exterior}}{K_{teq}^{exterior} + K_{peq}^{exterior}} P$$

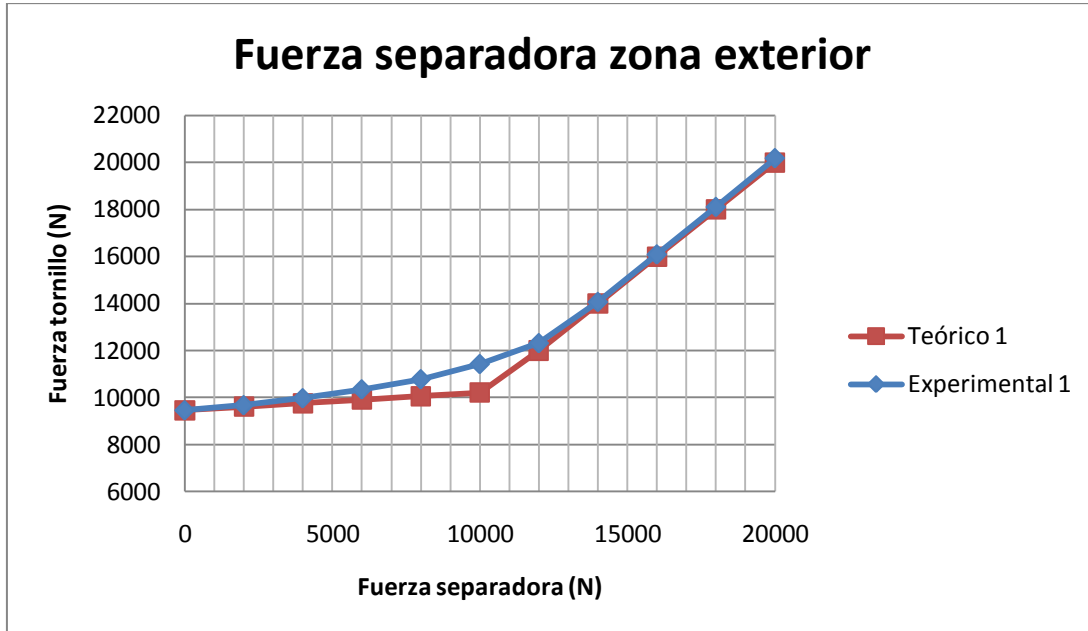
$$F_c^{exterior} = F_{inicial} - \frac{K_{peq}^{exterior}}{K_{teq}^{exterior} + K_{peq}^{exterior}} P$$

Esta relación se cumplirá hasta un cierto valor de la fuerza separadora ($P_{separación}$) en el que las piezas unidas se separan ($F_c^{exterior} = 0$):

$$F_c^{exterior} = 0 = F_{inicial} - \frac{K_{peq}^{exterior}}{K_{teq}^{exterior} + K_{peq}^{exterior}} P_{separación} \Rightarrow P_{separación} = 10,22 \text{ KN}$$

Una vez que se produce la separación de las piezas, la fuerza a la que queda sometida el tornillo es igual a la fuerza separadora ejercida sobre la unión.

Una vez descrito el modelo teórico podemos compararlo con los resultados obtenidos del ensayo:



F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
F tornillo (KN)	9,46	9,67	9,97	10,35	10,78	11,42	12,31	14,06	16,08	18,10	20,17
Ft teórica (KN)	9,46	9,61	9,76	9,91	10,05	10,20	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

Una vez que llegamos a los 20 KN de carga separadora se descarga el montaje para empezar una nueva serie de carga.

2ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

En este caso, cuando se vuelve a poner la fuerza separadora a cero, se registran valores negativos en la tensión de salida del circuito extensiométrico ($-0,65 \nu$). Esto es debido a una pérdida de apriete en la unión, que se produce al volver a ponerse en contacto las superficies de la piezas que se habían separado, por lo que el apriete del que partimos en esta serie será menor ($F_{inicial} = 7708 \text{ N}$).

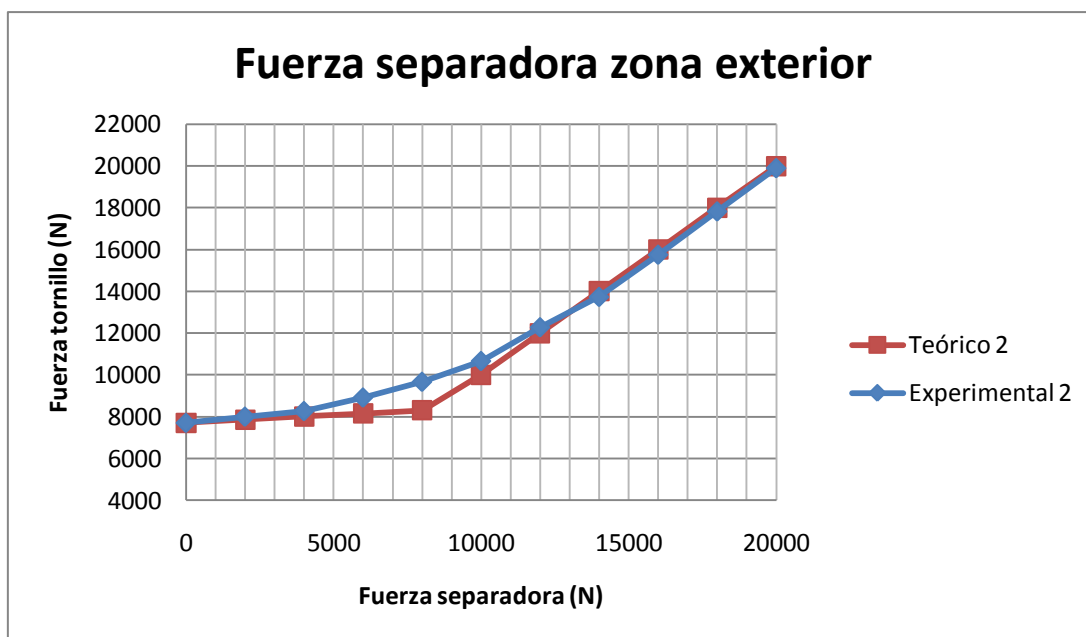
Como el apriete inicial es diferente, la separación de las piezas se producirá ante un valor de fuerza separadora distinto, que se calcula del misma forma anterior:

$$F_c^{exterior} = 0 = F_{inicial} - \frac{K_{p eq}^{exterior}}{K_{t eq}^{exterior} + K_{p eq}^{exterior}} P_{separación} \Rightarrow P_{separación} = 8,33 \text{ KN}$$

A continuación se presentan los valores de tensión registrados, los valores experimentales de fuerza en el tornillo a los que equivalen, y los del modelo teórico de fuerza en el tornillo:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-0,65	-0,54	-0,44	-0,2	0,08	0,45	1,05	1,59	2,34	3,11	3,88
F tornillo (KN)	7,71	8,00	8,27	8,92	9,67	10,67	12,28	13,74	15,76	17,83	19,90
Ft teórica (KN)	7,71	7,86	8,01	8,16	8,30	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

Finalmente comparamos gráficamente los valores experimentales de fuerza obtenidos en esta segunda serie de carga con el modelo teórico:



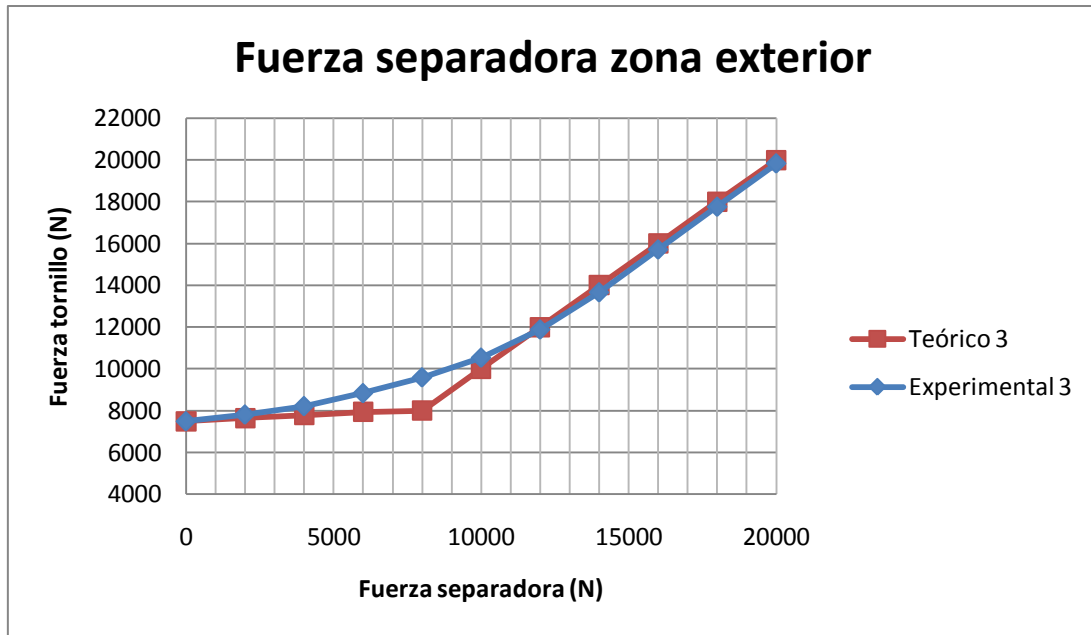
3ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

Se vuelve a descargar para proceder a una nueva serie de carga, y de nuevo queda un valor de apriete distinto al anterior, ya que en la serie anterior también se produjo la separación de las piezas.

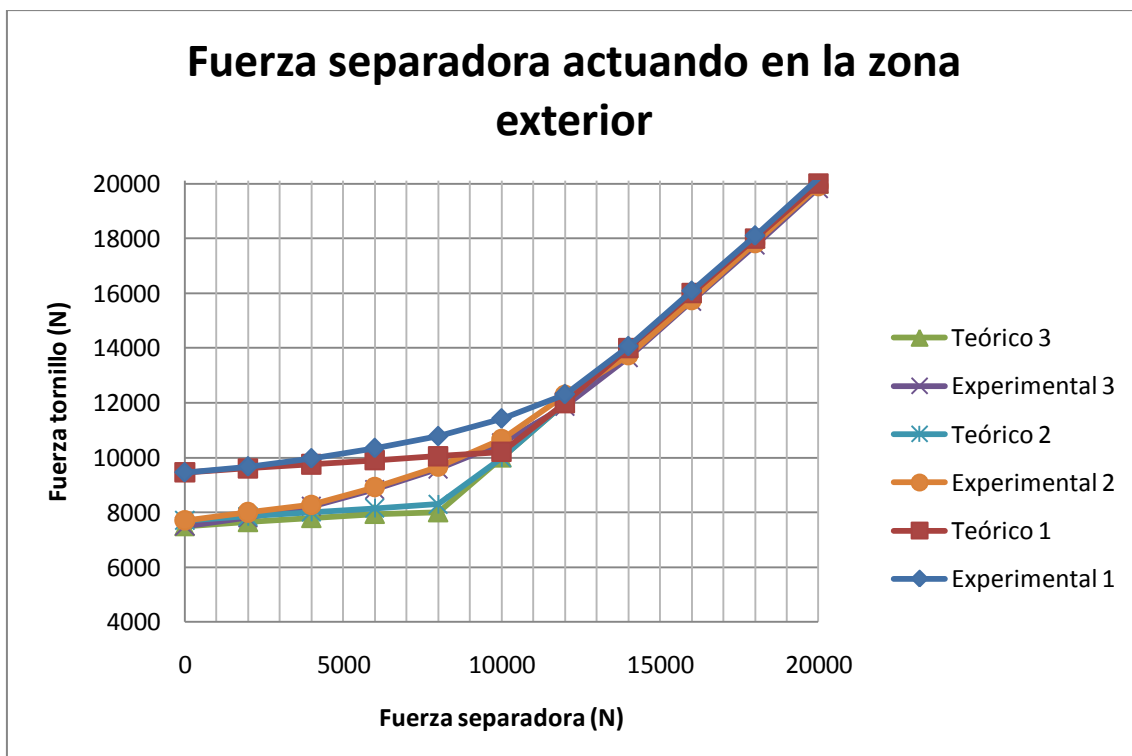
Se obtuvo una lectura de tensión de $-0,73 \text{ v}$, que equivale a una fuerza de apriete en el tornillo $F_{\text{inicial}} = 7492 \text{ N}$. Se vuelve a calcular la fuerza de separación a la que se producirá la separación de las piezas y como resultado se obtiene una fuerza $P_{\text{separación}} = 8096 \text{ N}$.

A continuación se presentan los datos relevantes de esta tercera serie de carga, y la comparación gráfica entre la fuerza en el tornillo experimental y teórica :

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-0,73	-0,61	-0,46	-0,23	0,05	0,4	0,9	1,56	2,32	3,08	3,85
F tornillo (KN)	7,49	7,82	8,22	8,84	9,59	10,53	11,88	13,66	15,70	17,75	19,82
Ft teórica (KN)	7,49	7,64	7,79	7,94	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

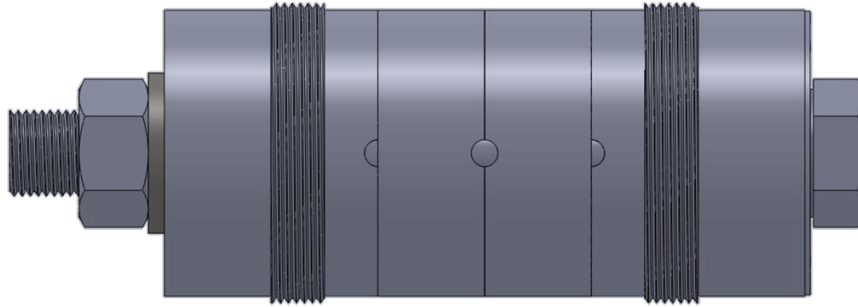


Finalmente se representan gráficamente los valores de la fuerza del tornillo experimental y teórica para las tres series de carga:



6.3.2 Fuerza separadora aplicada en la zona media

En este apartado la metodología de ensayo será la misma que en el apartado anterior, pero en este caso la fuerza separadora se aplicará en una zona distinta de la unión. Ahora los casquillos roscados se colocan contiguos a los que quedan en contacto con la cabeza del tornillo y con la arandela de la tuerca, como se muestra en la siguiente imagen:



Después se le aplicó a la tuerca el par de $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ con la llave dinamométrica obteniéndose una tensión de salida de $3,65 \text{ v}$ que corresponde a una fuerza de apriete inicial $F_{inicial}$ de 9808 N .

Como se vio en el apartado 4.2.3 “Modelo de esfuerzos en la unión atornillada ante una fuerza separadora”, al cambiar la zona de aplicación de la fuerza separadora, cambiarán las rigideces equivalentes del tornillo ($K_{t eq}^{medio} = 195,92 \text{ KN/mm}$) y de las piezas unidas ($K_{p eq}^{medio} = 5942,7 \text{ KN/mm}$), y por tanto la relación teórica de las fuerzas en el tornillo y las piezas durante la aplicación de la fuerza separadora (P) antes de la separación de las piezas:

$$F_t^{medio} = F_{inicial} + \frac{K_{t eq}^{medio}}{K_{t eq}^{medio} + K_{p eq}^{medio}} P$$

$$F_c^{medio} = F_{inicial} - \frac{K_{p eq}^{medio}}{K_{t eq}^{medio} + K_{p eq}^{medio}} P$$

Entonces con el apriete inicial $F_{inicial} = 9808 \text{ N}$, la separación teórica de las piezas se producirá para una fuerza separadora ($P_{separación}$):

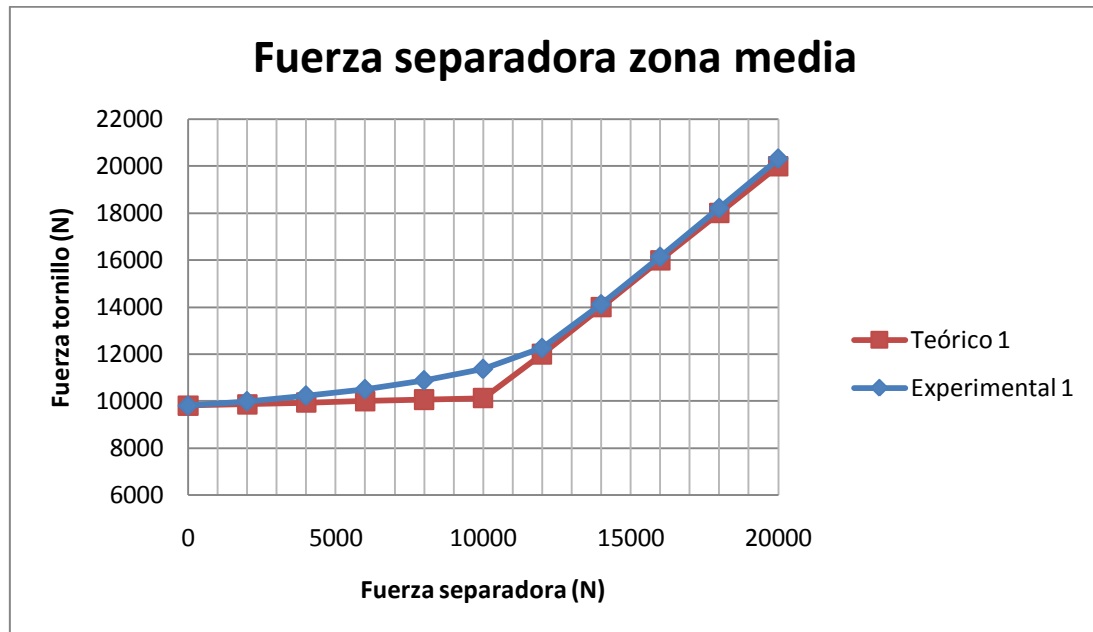
$$F_c^{medio} = 0 = F_{inicial} - \frac{K_{p eq}^{medio}}{K_{t eq}^{medio} + K_{p eq}^{medio}} P_{separación} \Rightarrow P_{separación} = 10,13 \text{ KN}$$

1ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona intermedia:

A continuación se recogen los valores obtenidos durante la primera serie de carga, de la tensión de salida tras la aplicación de la fuerza separadora, así como su equivalente en fuerza en el tornillo, y los valores de fuerza que debería obtenerse según el modelo teórico:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0	0,07	0,16	0,26	0,4	0,58	0,91	1,6	2,35	3,12	3,9
F tornillo (KN)	9,81	10,00	10,24	10,51	10,88	11,37	12,26	14,12	16,14	18,21	20,31
Ft teórica (KN)	9,81	9,87	9,94	10,00	10,06	10,13	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

Y la comparación gráfica entre modelo teórico y los resultados experimentales:

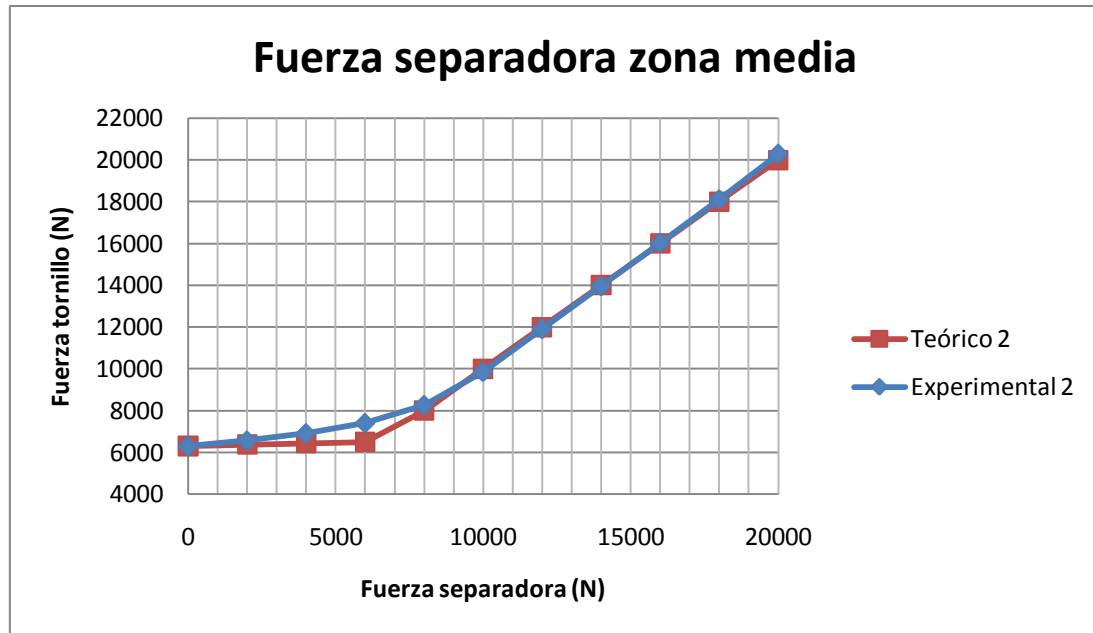


Como en el ensayo anterior, al descargar el sistema se produce una pérdida de apriete, se obtiene una lectura de tensión de $-1,3 \text{ v}$, que equivale a una fuerza de apriete en el tornillo $F_{\text{inicial}} = 6308 \text{ N}$. Se calcula de nuevo la fuerza de separación a la que se producirá la separación de las piezas y como resultado se obtiene una fuerza $P_{\text{separación}} = 6516 \text{ N}$.

2ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona intermedia:

De nuevo se presentan los datos de esta segunda serie de carga, y la comparación gráfica entre la fuerza en el tornillo experimental y teórica :

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-1,3	-1,2	-1,07	-0,89	-0,57	0,02	0,78	1,54	2,31	3,08	3,89
F tornillo (KN)	6,31	6,58	6,93	7,41	8,27	9,86	11,91	13,95	16,03	18,10	20,28
Ft teórica (KN)	6,31	6,37	6,44	6,50	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

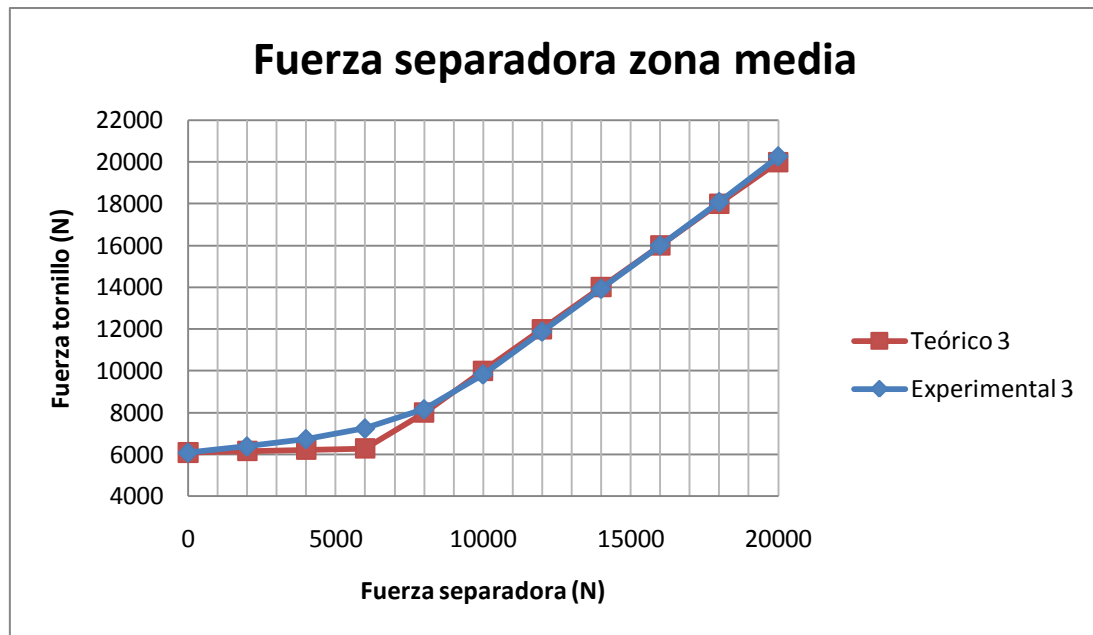


3ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona intermedia:

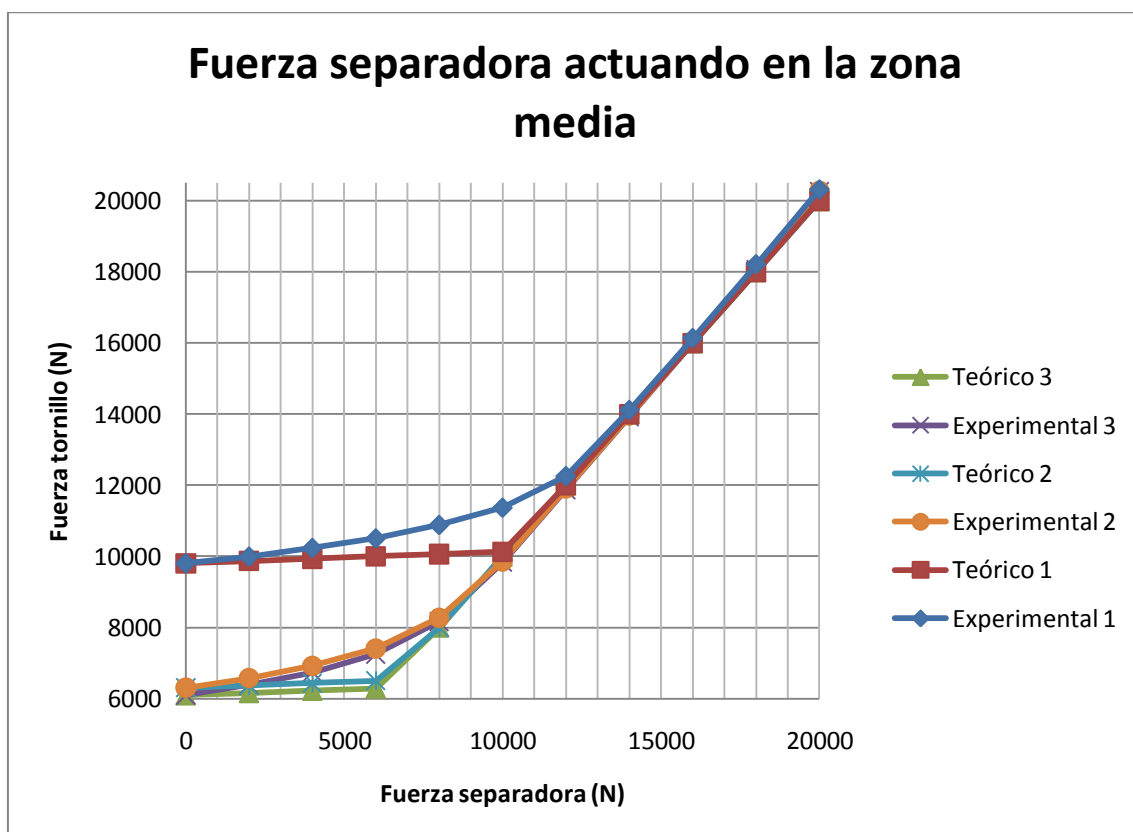
Por último, en la descarga de esta serie se obtiene una lectura de tensión de $-1,38 \text{ v}$, que equivale a una fuerza de apriete en el tornillo $F_{inicial} = 6092 \text{ N}$. La fuerza de separación a la que se producirá la separación de las piezas para esta fuerza de apriete será $P_{separación} = 6293 \text{ N}$.

A continuación se presentan los datos de esta tercera serie de carga, y la comparación gráfica entre la fuerza en el tornillo experimental y teórica :

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-1,38	-1,27	-1,14	-0,95	-0,61	0,01	0,77	1,53	2,3	3,07	3,88
F tornillo (KN)	6,09	6,39	6,74	7,25	8,17	9,83	11,88	13,93	16,00	18,07	20,25
Ft teórica (KN)	6,09	6,16	6,22	6,28	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

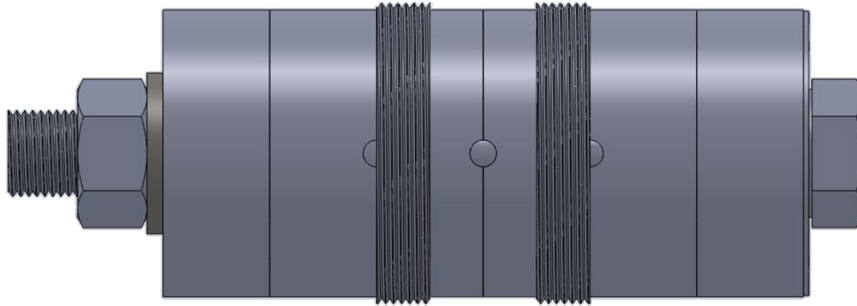


Finalmente se representan gráficamente los valores de la fuerza del tornillo experimental y teórica para las tres series de carga para la fuerza separadora actuando en la zona media:



6.3.3 Fuerza separadora aplicada en la zona interior

En esta última series de ensayos, la fuerza separadora se aplicará en una zona interior de la unión. Para ello, los casquillos roscados se colocan en el centro quedando en contacto entre ellos, como se muestra en la siguiente imagen:



Después se le aplicó a la tuerca el par de $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ con la llave dinamométrica obteniéndose una tensión de salida de $3,68 \text{ v}$ que corresponde a una fuerza de apriete inicial F_{inicial} de 9889 N .

En esta serie también se ha cambiado la zona de aplicación de la fuerza separadora, por lo que para el modelo teórico se usarán las rigideces equivalentes del tornillo ($K_{t \text{ eq}}^{\text{interior}} = 192,26 \text{ KN/mm}$) y de las piezas unidas ($K_{p \text{ eq}}^{\text{interior}} = 14052,3 \text{ KN/mm}$) vistas en el apartado 4.2.3 para el caso de aplicación de la fuerza separadora en la zona interior.

Para el apriete inicial $F_{\text{inicial}} = 9808 \text{ N}$, la separación teórica de las piezas se producirá para una fuerza separadora ($P_{\text{separación}}$):

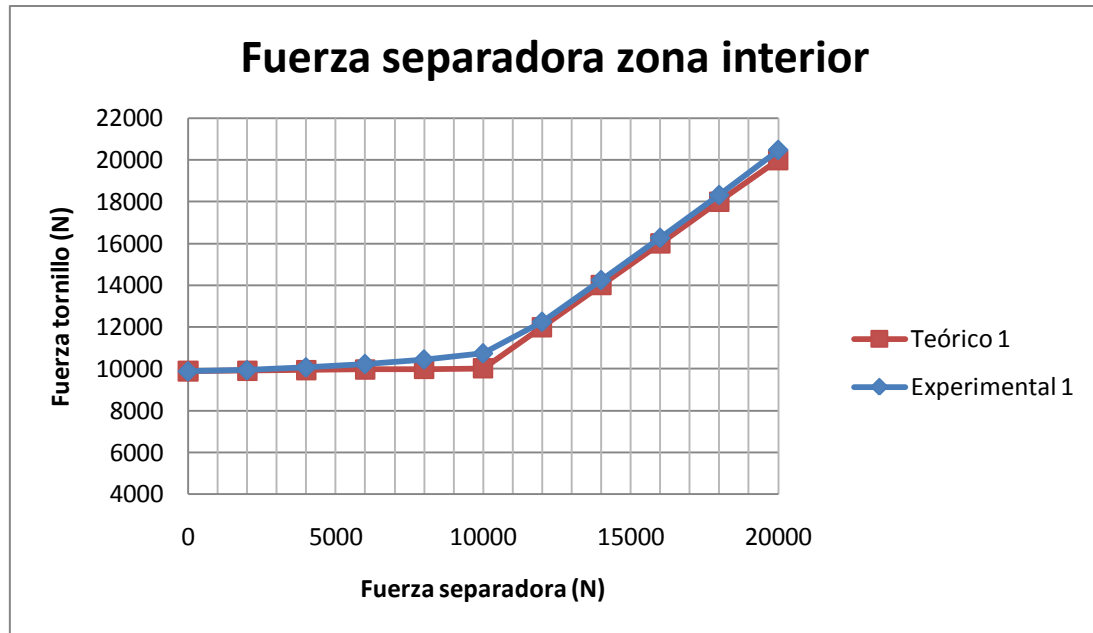
$$F_c^{\text{interior}} = 0 = F_{\text{inicial}} - \frac{K_{p \text{ eq}}^{\text{interior}}}{K_{t \text{ eq}}^{\text{interior}} + K_{p \text{ eq}}^{\text{interior}}} P_{\text{separación}} \Rightarrow P_{\text{separación}} = 10,02 \text{ KN}$$

1ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

Tras la primera serie de carga, se han obtenido los siguientes valores de tensión de salida, de los que podemos obtener la fuerza en el tornillo durante el ensayo, y compararlos con los valores de fuerza que debería obtenerse según el modelo teórico:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	0	0,02	0,07	0,13	0,21	0,32	0,88	1,62	2,37	3,13	3,93
F tornillo (KN)	9,89	9,94	10,08	10,24	10,45	10,75	12,26	14,25	16,27	18,32	20,47
Ft teórica (KN)	9,89	9,92	9,94	9,97	10,00	10,02	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

Se comparan gráficamente los valores de fuerza en el tornillo del modelo teórico y los obtenidos experimentalmente:



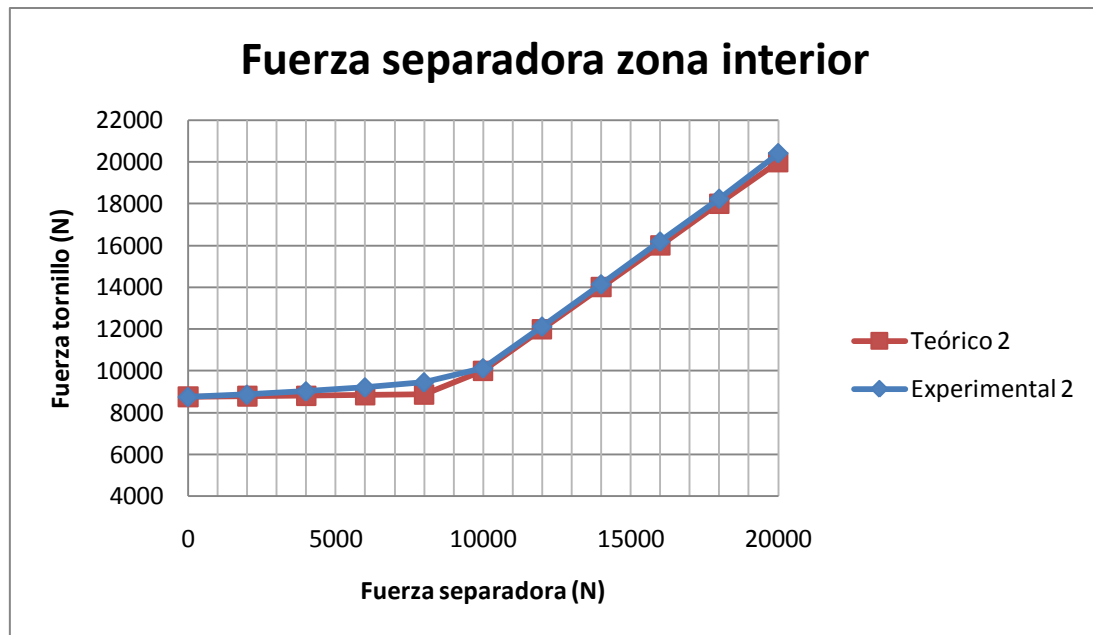
Tras la primera serie de carga, se procedió a descargar el sistema, y como en los ensayos anteriores también se produjo una pérdida de apriete. Se obtuvo una lectura de tensión de $-0,42$ v, por lo que el tornillo rebajo su fuerza de apriete hasta los 8758 N. Con este apriete la fuerza separadora necesaria para separar las piezas será: $P_{separación} = 8878$ N.

2ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

Se procedió a la segunda serie de carga, que proporcionó los valores de tensión de salida necesarios para la obtención de los valores de fuerza en el tornillo. A continuación se recogen dichos valores y se comparan con el modelo teórico de fuerza en el tornillo tras la aplicación de una fuerza separadora:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-0,42	-0,38	-0,32	-0,25	-0,16	0,09	0,83	1,58	2,34	3,1	3,91
F tornillo (KN)	8,76	8,87	9,03	9,22	9,46	10,13	12,12	14,14	16,19	18,24	20,42
Ft teórica (KN)	8,76	8,78	8,81	8,84	8,87	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00

Y la comparación gráfica:

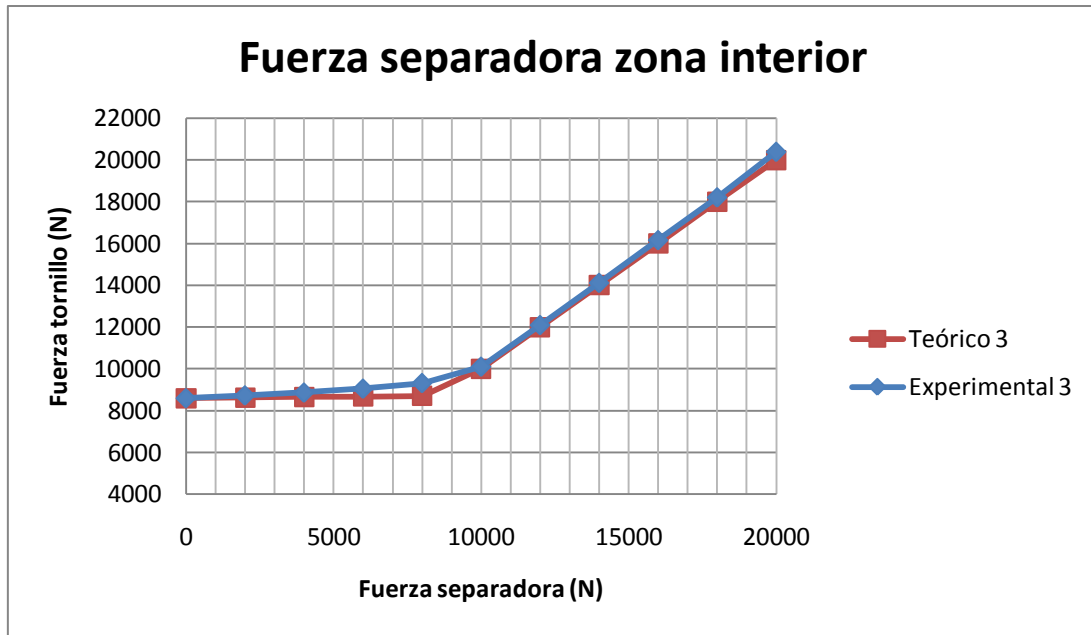


3ª Serie de carga con la fuerza aplicada en la zona exterior:

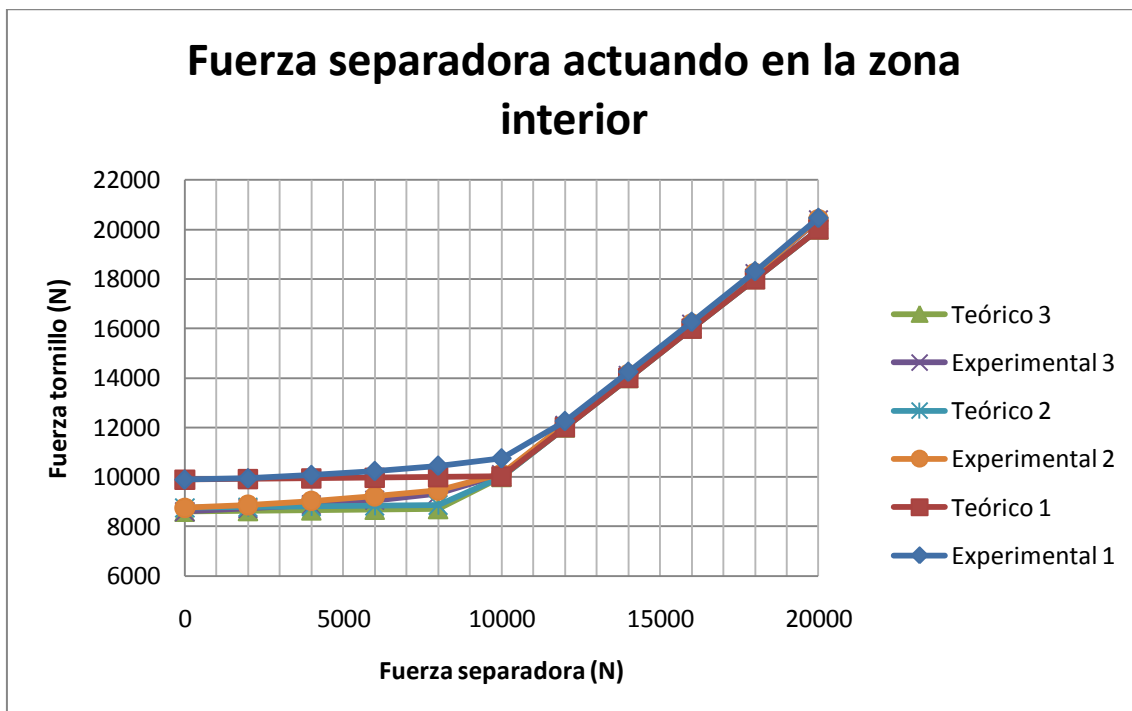
Y por último se procede a la descarga de la unión, antes de aplicar la tercera y última serie de cargas. Se obtuvo una lectura de tensión de $-0,48 \text{ v}$, por lo que el tornillo la fuerza con la que queda apretado el tornillo será $F_{\text{inicial}} = 8596 \text{ N}$. Con este apriete la fuerza separadora necesaria para separar las piezas será: $P_{\text{separación}} = 8714 \text{ N}$.

Se procedió a la tercera serie de carga, los valores obtenidos son los siguientes:

F separadora (KN)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tensión salida (V)	-0,48	-0,43	-0,38	-0,31	-0,21	0,08	0,82	1,57	2,33	3,09	3,9
F tornillo (KN)	8,60	8,73	8,87	9,05	9,32	10,10	12,10	14,12	16,16	18,21	20,39
Ft teórica (KN)	8,60	8,62	8,65	8,68	8,70	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00



Finalmente se representan gráficamente los valores de la fuerza del tornillo experimental y teórica para las tres series de carga para la fuerza separadora actuando en la zona interior:

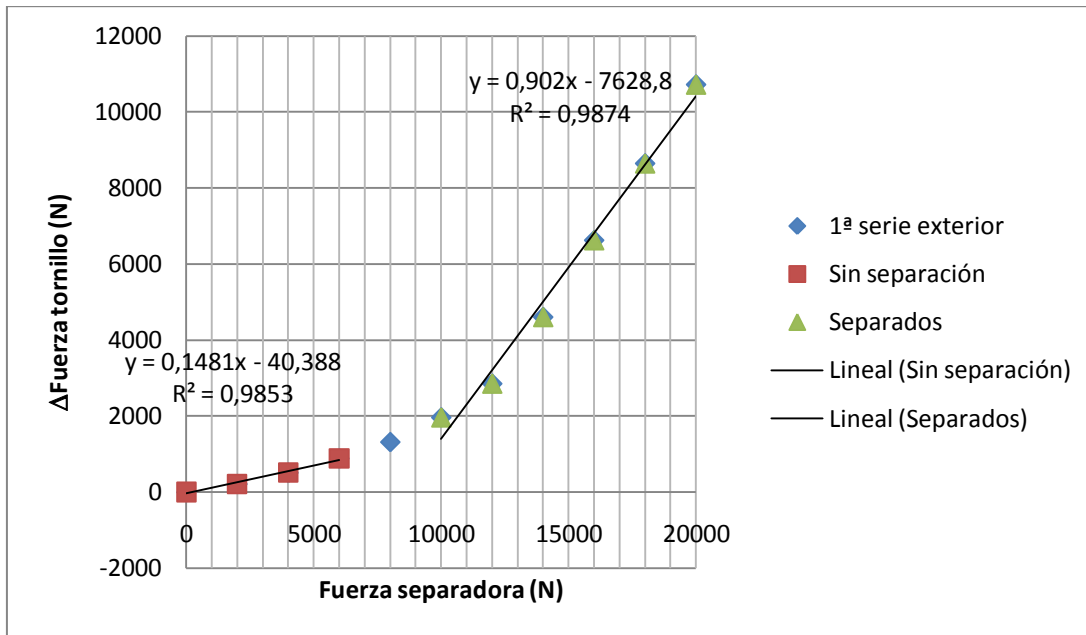


6.3.4 Conclusiones

El modelo teórico propone que la fuerza en el tornillo (F_t) crecerá linealmente con relación a las fuerza separadora aplicada a la unión atornillada (P):

$$F_t = F_{inicial} + \frac{K_{t eq}}{K_{t eq} + K_{p eq}} P$$

La pendiente de esta recta depende de los valores de rigidez equivalente del tornillo ($K_{t eq}$) y las piezas unidas ($K_{p eq}$), podemos comprobar los valores del modelo teórico de dicha pendiente con la pendiente los primeros puntos de cada ensayo, como por ejemplo en la primera serie de carga cuando la fuerza separadora se aplica en la zona exterior:



En este primer ensayo, la pendiente de la recta cuando las piezas no se han separado sería 0,1481. Si calculamos dicha pendiente en las tres series donde la fuerza separadora se aplica en la zona exterior, y hacemos la media de las tres series tenemos que el valor de la pendiente es de 0,1885.

Teóricamente la pendiente de la recta debería ser:

$$\frac{K_{t eq}^{exterior}}{K_{t eq}^{exterior} + K_{p eq}^{exterior}} = 0,0746$$

Podemos realizar esta comparación en los tres distintos montajes, los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Pendiente	Experimental	Teórico
Aplicación de la Fuerza separadora:		
En el montaje exterior	0,1885	0,0746
En el montaje intermedio	0,1638	0,0319
En el montaje interior	0,0704	0,0135

Se puede comprobar que hay una menor pendiente cuando se aplica la fuerza separadora desde la zona interior que desde la exterior, lo que conlleva que soporta menos fuerza

separadora antes de abrirse una que unión atornillada cuando se estira de la zona interior que de la exterior (ya que se llega antes a que $F_t = P$, que ocurre al separarse)

También se puede observar que las pendientes experimentales son mayores que las teóricas, lo que conlleva una posterior apertura de la unión en la realidad que en el modelo teórico. Si se calculara con este modelo la apertura de la unión, realmente soportaría más fuerza antes que abrirse, por lo que se estaría del lado de la seguridad. Aunque habría que tener la precaución de no apretar los tornillos en exceso, no dejándolos cerca de los valores de plastificación, ya que realmente los valores de carga alcanzados en el tornillo son un poco mayores que los predichos por el modelo teórico. En las gráficas de los tres ensayos de fuerza separadora se puede observar que los valores experimentales permanecen por encima de los teóricos, sobre todo en el caso en que la fuerza separadora se aplica en la zona exterior.