

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Procedimiento para la medición de fuerzas en el
sillín de una bicicleta

Autor: Pablo Ramos Rodríguez

Tutor: Joaquín Ojeda Granja

**Dpto. Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Procedimiento para la medición de fuerzas en el sillín de una bicicleta

Autor:

Pablo Ramos Rodríguez

Tutor:

Joaquín Ojeda Granja

Profesor contratado doctor interino

Dpto. de Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Procedimiento para la medición de fuerzas en el sillín de una bicicleta

Autor: Pablo Ramos Rodríguez

Tutor: Joaquín Ojeda Granja

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El trabajo desarrollado a continuación forma parte de un proyecto más amplio que consiste en conocer la cinética de un ciclista, esto es, tanto el movimiento como las fuerzas que se encuentran implicadas en el movimiento del sistema. Para ello, han de estudiarse por separado el manillar, sillín y los pedales. Este trabajo se centra en el sillín, con el objetivo de obtener de la forma más genérica posible las fuerzas en las tres direcciones del espacio que se producen en el tubo del sillín de una bicicleta, ayudando por lo tanto a conocer la cinética. Para ello se va a hacer uso de las galgas extensométricas, las cuales serán desarrolladas más adelante, así como de un programa de adquisición de datos llamado “Quantum”, el cual hace posible a partir de varios ensayos en los que diversos ciclistas se sitúan y comienzan a pedalear sobre la bicicleta, obtener las microdeformaciones que experimentan las galgas para la posterior obtención de las fuerzas buscadas mediante la implementación de dos sistemas de ecuaciones (desarrollados en el apartado 6-2).

Resumen	ix
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xvii
1 Introducción	1
2 Base teórica	2
2.1. <i>Galgas extensométricas</i>	2
2.2. <i>El Puente de Wheatstone</i>	3
2.2.1. Conexión en cuarto de puente	4
2.2.2. Conexión en medio puente	4
2.2.3. Conexión en Puente completo	5
3. Metodología e instrumental disponible	7
4. Ubicación y colocación de las galgas	10
4.1. <i>Zona de colocación de las galgas</i>	10
4.2. <i>Orientación y colocación de las galgas</i>	13
4.2.1. Mediciones sobre una barra sometida a tracción-compresión	13
4.2.2. Mediciones sobre una barra en flexión	13
4.2.3. Mediciones sobre una barra sometida a esfuerzo cortante o a torsión	14
4.3. <i>Cálculo previo de microdeformaciones</i>	15
5. Montaje de las galgas extensométricas	19
6. Resultados	24
6.1. <i>Método para desacoplar axiles de flectores</i>	24
6.2. <i>Procedimiento para el cálculo de las fuerzas</i>	31
7 Conclusión	41
Referencias	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Galga monodireccional	2
Figura 2-2. Roseta	3
Figura 2-3. Galga bidimensional	3
Figura 2-4. El puente de Wheatstone	4
Figura 3-1. Galgas disponibles	7
Figura 3-2. Quantum	8
Figura 3-3. Sillín disponible	8
Figura 4-1. Representación tubo del sillín	10
Figura 4-2. Cargas sobre el tubo del sillín	10
Figura 4-3. Diagramas de esfuerzos	11
Figura 4-4. Zonas de colocación de las galgas	12
Figura 4-5. Colocación de bandas sobre barra en tracción/compresión. (Tomado de [3])	13
Figura 4-6. Colocación de bandas sobre barra en flexión. (Tomado de [3])	14
Figura 4-7. Colocación de bandas sobre eje a torsión/esfuerzo cortante. (Tomado de [3])	14
Figura 4-8. Galgas adheridas al tubo bajo estudio	15
Figura 4-9. Tubo sometido a fuerza en dirección "y"	15
Figura 4-10. Distribución de tensiones sobre viga sometida a flexión	16
Figura 5-1. Posicionamiento de la galga con celo	19
Figura 5-2. Catalizador y pegamento aplicado sobre las galgas	20
Figura 5-3. Retirada del celo a 45°	20
Figura 5-4. Retirada de celo a 45°	21
Figura 5-5. Galga extensométrica adherida sobre el tubo del sillín	21
Figura 5-7. Proceso de soldadura de la galga	22
Figura 5-6. Comprobación de la resistencia de la banda	22
Figura 5-8. Verificación tras el soldado	23
Figura 5-9. Galgas montadas sobre el tubo	23
Figura 6-1. Ensayo a flexión "pura"	24
Figura 6-3. Microdeformaciones de ensayo a flexión	25
Figura 6-2. Ensayo a compresión "pura"	25

Figura 6-4. Resultado del ensayo a compresión "pura"	26
Figura 6-5. Sistema de referencia en el sillín	27
Figura 6-6. Numeración de las 4 galgas	28
Figura 6-7. Fuerzas del ciclista 1	28
Figura 6-8. Fuerzas del ciclista 2	29
Figura 6-9. Fuerzas del ciclista 3	30
Figura 6-10. Fuerzas en sillín medición estática	34
Figura 6-11. Fuerzas en sillín ciclista 1	34
Figura 6-12. Fuerzas en sillín ciclista 2	35
Figura 6-13. Fuerzas en sillín ciclista 3	35
Figura 6-14. Fuerzas giradas en sillín medición estática	37
Figura 6-15. Fuerzas giradas en sillín ciclista 1	37
Figura 6-16. Fuerzas giradas en sillín ciclista 2	38
Figura 6-17. Fuerzas giradas en sillín ciclista 3	38

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de los parámetros

33

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende desarrollar un procedimiento que permita obtener las fuerzas que se producen en el sillín de una bicicleta, temática respecto a la cual no hay mucha información desarrollada, aunque sí que hay diversos estudios previos relacionados en mayor medida con nuestro problema bajo estudio.

Así, uno de ellos se encargó de estudiar o investigar acerca de la eficiencia que tienen el diseño de almohadillas en la distribución de presiones en el sillín de la bicicleta durante el ciclo de pedaleo [4]. Las presiones fueron cuantificadas para 9 hombres usando tres diseños de almohadillas para el sillín diferentes (fina, gruesa y sin almohadilla), y se descubrió que las almohadillas gruesas tenían un máximo global de presión de unos 640 mbar, lo cual es 50 mbar más bajo que para las almohadillas finas. Dicho estudio concluyó sugiriendo que el efecto del diseño de las almohadillas en los síndromes urogenitales puede que esté infravalorado.

Otro de los trabajos previos relacionados estudió la influencia del retraso del sillín en las fuerzas que se producen en la articulación de las rodillas en el ciclismo [5]. Ante los numerosos problemas funcionales de rodilla en ciclistas, se llevó a cabo esta investigación con el objetivo de conocer el efecto en las lesiones de rodillas, pues la mayoría de ellas están motivadas por una incorrecta configuración de la bicicleta. El estudio se realizó con 10 ciclistas y 3 condiciones diferentes del sillín para cada uno de ellos (con un rango de cambio de posición del mismo de unos 6 cm), y los resultados que se obtuvieron desvelaron que el hecho de mover el sillín hacia delante no está asociado a un incremento de las fuerzas en la articulación, por el contrario, la fuerza máxima de compresión era en torno a un 15% mayor en la zona más retrasada con respecto a la más adelantada.

Por otra parte, también se hizo un estudio de los efectos que tiene las diferentes alturas del sillín de la bicicleta en la cinética de ciclistas y triatletas así como en las fuerzas que se producen en los pedales [6]. Se llevaron a cabo 4 configuraciones diferentes del sillín (configuración deseada por el ciclista, alta, baja y la altura óptima, la cual son unos 25° de flexión de rodilla). Alguno de sus resultados fue que incrementos en la altura del sillín (del orden de un 5% con respecto a la posición deseada) generan grandes incrementos del índice de efectividad en el pedaleo.

Otra investigación se centró en el desarrollo de una potencia (también llamado tija del manillar) de bicicletas de carretera para obtener medidas a partir de cargas estáticas y dinámicas [7]. Dicha potencia se instrumentó con 12 galgas extensométricas (de las cuales vamos a hacer uso y desempeñan un papel fundamental en nuestro trabajo) que permitan la medida de la fuerza vertical y dos momentos. Se observó que potencias bien instrumentadas proporcionan medidas precisas para pequeñas y grandes cargas.

A pesar de haber algunos estudios e investigaciones relacionadas con la cinética del ciclista, así como para evitar las lesiones más frecuentes o mejorar la comodidad durante el pedaleo y otros muchos aspectos (como la obtención de fuerzas en los pedales), apenas existen estudios que se centren en el cálculo de las fuerzas que se producen en el sillín de la bicicleta (las fuerzas que se producen en las tres direcciones del espacio). Por lo tanto, este trabajo resulta de interés tanto por el hecho de que forma parte de un proyecto más ambicioso, como es el hecho de conocer la cinética de un ciclista (lo cual engloba tanto el movimiento del mismo así como las fuerzas involucradas en dicho movimiento, siendo este último aspecto lo que hace que esté íntimamente relacionado con este trabajo experimental) como por el hecho de ser tremendamente novedoso, ya que no existen estudios previos que hayan desarrollado un procedimiento para el cálculo de dichas fuerzas.

2 BASE TEÓRICA

Para llevar a cabo las mediciones de las fuerzas que se ha detallado previamente en la introducción, se van a usar tanto las galgas extensométricas como el montaje en Puente de Wheatstone, por lo que se necesitan conocer tanto sus funcionamientos, utilidades y diferentes tipos (de galgas y configuraciones), siendo los siguientes dos subapartados destinados a dicho conocimiento.

2.1. Galgas extensométricas

Aunque no se va a tratar con todo detalle la teoría que concierne a las bandas extensométricas, es conveniente saber acerca de diferentes aspectos de las mismas, tales como su aplicación, tipos, etcetera.

Los métodos experimentales referidos a la teoría de la elasticidad tienen como objeto determinar algún valor asociado al sólido deformable, tales como desplazamientos, deformaciones o tensiones (en este caso nos centramos en la obtención de deformaciones), relacionando este valor, a través de un principio físico, con alguna magnitud no directamente asociada al problema bajo estudio, la cual es la que se mide.

La principal ventaja de la extensometría es que la medición puede realizarse directamente sobre la estructura real, es decir, no necesita la realización de modelos en el laboratorio. Su principal desventaja es el carácter puntual, sólo se obtiene información de deformaciones, tensiones o desplazamientos de un punto del sólido (o del contorno del mismo).

La banda extensométrica se adhiere a la superficie del sólido deformable, haciéndose solidaria con el mismo, de esta forma experimenta las mismas deformaciones que dicho sólido, y el error que se comete con la banda extensométrica será mayor cuanto mayor longitud tenga la misma. Por esta razón las galgas deben tener una longitud lo más pequeña posible. El fundamento de dichas bandas (y en concreto de las bandas de resistencia) es la variación de la resistencia de un conductor cuando cambia su longitud, es decir, al deformarse un sólido, se modifica la longitud del mismo, y consecuentemente también la de la banda adherida a dicho sólido, provocando una variación en la resistencia.

En la actualidad se emplean las llamadas bandas de láminas metálicas, con varias configuraciones disponibles:

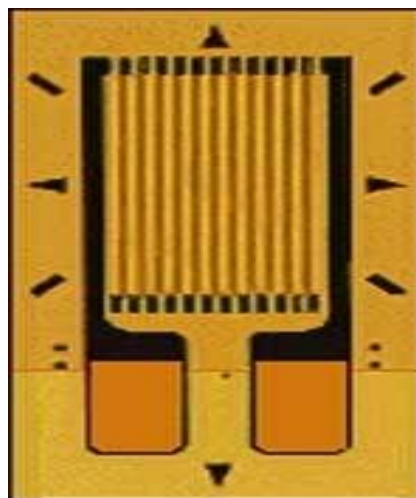


Figura 2-1. Galga monodireccional

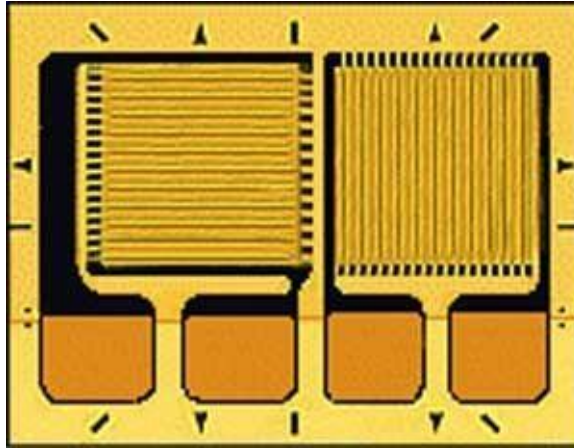


Figura 2-3. Galga bidimensional

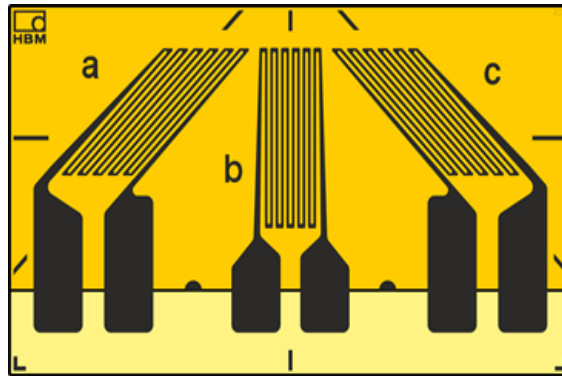


Figura 2-2. Roseta

La primera de las ilustraciones corresponde con una galga extensométrica que mide en una única dirección, la segunda de ellas se emplea para medir en dos direcciones (perpendiculares entre sí) y la tercera de ellas puede medir en tres direcciones direcciones distintas (en este caso miden a 45° entre sí), usándose esta última cuando no se conocen las direcciones principales de deformación. La elección del tipo de galga así como su correspondiente justificación se verá en los apartados siguientes.

2.2. El Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito eléctrico que se emplea para convertir la variación de resistencia que tiene lugar en la banda extensométrica en una señal de voltaje, la cual puede ser registrada.

Dicho puente está constituido por cuatro resistencias y una fuente de tensión, distribuidos de la forma que se indica a continuación:

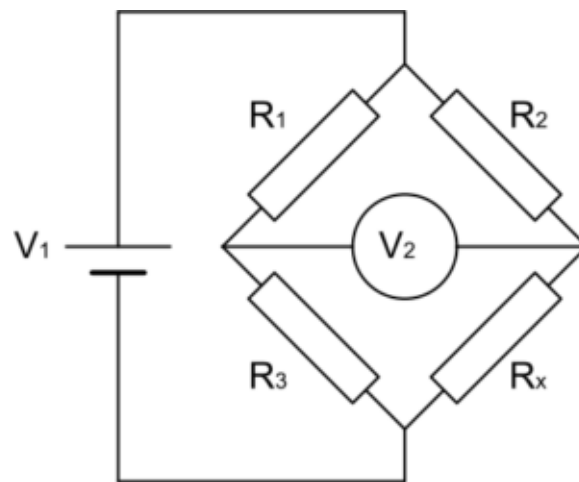


Figura 2-4.El puente de Wheatstone

La deformación longitudinal que experimenta una galga (ε) puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (1)$$

Dicha ecuación expresa que puede medirse la deformación en una determinada dirección mediante la variación de la resistencia de la galga, y para medir esa variación se emplea el Puente de Wheatstone, el cual puede tener varias configuraciones diferentes que se van a ver a continuación:

2.2.1. Conexión en cuarto de puente

El Puente de Wheatstone adquiere esta configuración cuando tan solo una de las cuatro resistencias es activa, es decir, sólo varía una de las cuatro resistencias (sólo una experimenta las deformaciones del sólido deformable al que se encuentra adherido). El montaje en $\frac{1}{4}$ de puente se usa cuando se conoce la dirección de la deformación que se pretende medir y siempre que no existan cambios de temperatura. La precisión en las lecturas efectuadas puede saberse con la llamada “sensibilidad del puente”, que corresponde con la variación de la tensión de salida (V_2) por unidad de deformación. En el caso del $\frac{1}{4}$ de puente, dicha sensibilidad vale lo siguiente:

$$s = \frac{V_2}{\varepsilon} = \frac{V_1}{4} K \quad (2)$$

2.2.2. Conexión en medio puente

Esta configuración se adopta cuando dos resistencias del puente son activas (están sometidas a deformaciones). Es muy útil el uso de este tipo de conexión para el caso de una medición de la deformación por flexión, pues compensa los efectos de la temperatura. La sensibilidad del medio de puente es igual a:

$$s = \frac{V_2}{\varepsilon} = \frac{V_1}{2} K \quad (3)$$

Como puede observarse, se produce un aumento de sensibilidad con respecto al $\frac{1}{4}$ de puente, lo cual indica que existe más precisión en la medición.

2.2.3. Conexión en Puente completo

El Puente de Wheatstone funciona en puente completo cuando las cuatro resistencias son activas (las cuatro van adheridas sobre la superficie de la estructura en cuestión). Para este caso, la sensibilidad es igual a:

$$s = \frac{V_2}{\varepsilon} = V_1 K \quad (4)$$

Y como puede observarse, esta conexión es la más precisa de todas, al tener una mayor sensibilidad.

3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTAL DISPONIBLE

Con la finalidad de obtener las fuerzas previamente mencionadas sobre el sillín de la bicicleta, y conociendo brevemente los diferentes tipos y configuraciones existentes tanto de bandas extensométricas como de Puentes de Wheatstone, se va a proceder a detallar el procedimiento que se ha llevado a cabo para la obtención de las mismas. En primer lugar se van a colocar las galgas extensométricas (Figura 3-1) en el tubo del sillín de la bicicleta (la posición y orientación serán detalladas en apartados posteriores), y una vez estén colocadas se montarán varios individuos sobre la bicicleta para obtener una columna de microdeformaciones para cada uno de los individuos. Primero se realizará una medición estática y luego otra dinámica. Dicha columna de microdeformaciones será facilitada gracias a un programa de adquisición de datos “Quantum” (Figura 3-2), y con todas las columnas de microdeformaciones para cada ciclista se desarrollarán dos sistemas de ecuaciones (detallados más adelante) de manera que podamos obtener a partir de las microdeformaciones totales, las fuerzas que se producen en las tres direcciones del espacio sobre el sillín (Figura 3-3) para cada ciclista diferente.

Parte del instrumental del que se dispone (puesto que gran parte de ellos aparecen a lo largo de los siguientes apartados) es el siguiente:

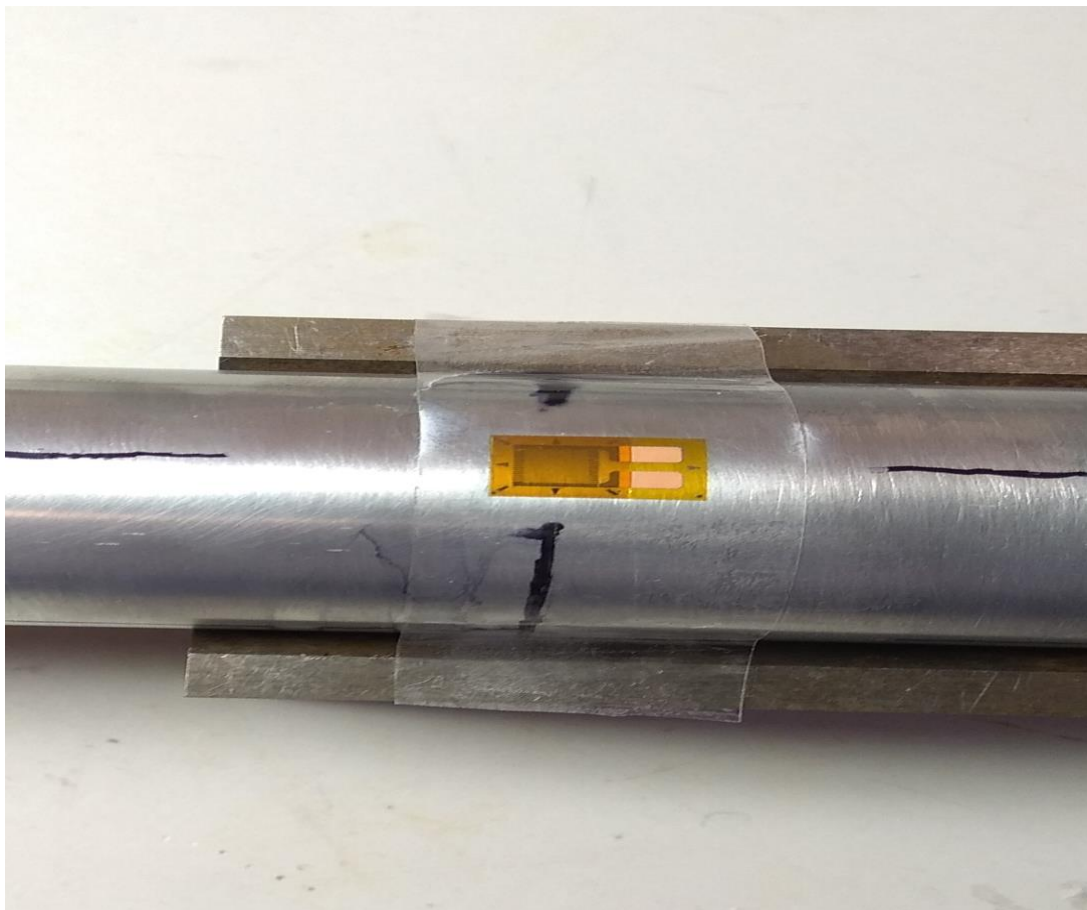


Figura 3-1. Galgas disponibles

En el laboratorio se disponía de una caja compuesta por seis galgas como la que aparece en la figura de arriba, de las cuales solo se hizo uso de cuatro de ellas, puesto que como se demostrará más adelante, son las suficientes para poder obtener las fuerzas buscadas.



Figura 3-2. Quantum

Dicha ilustración muestra el programa de adquisición de datos que va a hacer posible obtener todas las microdeformaciones totales que experimentan las galgas extensométricas durante el ciclo de pedaleo (para la medición dinámica) y cuando el ciclista está simplemente apoyado sobre la bicicleta sin pedalear (medición estática).



Figura 3-3. Sillín disponible

Por último, esta figura muestra el sillín de la bicicleta que se dispone en el laboratorio para llevar a cabo cada uno de los ensayos. Sobre dicho sillín se establecerá un sistema de referencia que será mostrado más adelante.

4. UBICACIÓN Y COLOCACIÓN DE LAS GALGAS

4.1. Zona de colocación de las galgas

Una vez se tienen nociones básicas de los tipos, funcionamiento y utilidad de las bandas extensométricas así como del Puente de Wheatstone, llega la hora de plantearse el lugar, o más concretamente la zona del tubo del sillín de la bicicleta donde se deben situar las bandas de manera que las deformaciones experimentadas por las mismas puedan conocerse de la forma más precisa y eficiente posible.

Para ello, las bandas deben situarse en la zona del tubo que esté sometida a mayor tensión. Considérese el tubo del sillín como una viga en voladizo cuya sección es una corona circular tal y como aparece en las siguientes ilustraciones:



Figura 4-1. Representación tubo del sillín

Dicho tubo puede asumirse que esté sometido a la siguiente distribución de cargas (q_x, q_y, q_z) aplicadas en el extremo opuesto al empotramiento (siendo el extremo empotrado donde aparece reflejado el sistema de referencia $x-y-z$ en la figura 4-2), simulando las fuerzas que el ciclista va a ejercer sobre el tubo del sillín, y siendo "L" la longitud del tubo, es decir, la distancia entre el extremo empotrado y el que sufre las cargas.

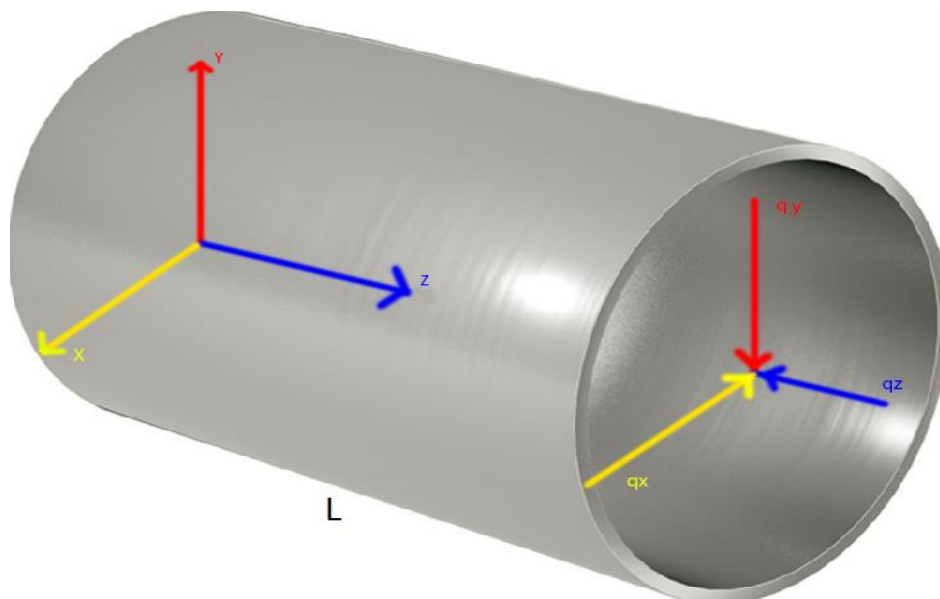


Figura 4-2. Cargas sobre el tubo del sillín

De esta forma, ante ese sistema de referencia tomada en la base del tubo (la cual se encuentra empotrada), y con semejante distribución de cargas aplicadas en el extremo opuesto al empotramiento, puesto que es donde se van a generar todas las cargas durante el pedaleo del ciclista, llega el momento de obtener las zonas del tubo donde se producirán más tensiones (y por consecuente más deformaciones) mediante el cálculo de los diagramas de esfuerzos.

Para ello se debe comenzar con el cálculo de las reacciones que se producen en el tubo. Dichas reacciones serán las que se producen en cada una de las direcciones de los ejes cartesianos (Rx, Ry, Rz) así como los momentos alrededor de dichos ejes (Mx, My, Mz). Tanto las reacciones como los momentos de reacción van a ser consideradas a priori en el sentido de los ejes coordenados que aparece en la ilustración 4-2 y situados en la base de dicho tubo (en la empotrada).

$$\sum F_z = 0; R_z - q_z = 0; R_z = q_z \quad (5)$$

$$\sum F_y = 0; R_y - q_y = 0; R_y = q_y \quad (5)$$

$$\sum F_x = 0; R_x - q_x = 0; R_x = q_x \quad (6)$$

$$\sum M_x = 0; MR_x - q_y L = 0; MR_x = q_y L \quad (7)$$

$$\sum M_y = 0; MR_y + q_z L = 0; MR_y = -q_z L \quad (8)$$

Donde Rx, Ry, Rz, MRx y MRy son tanto las reacciones como los momentos de reacción que tienen lugar en el empotramiento del tubo a estudiar, y siendo “L” la longitud de dicho tubo entre ambos extremos. Conocidas ya las reacciones y quedando todas en función de las cargas aplicadas (genéricas) en el extremo del tubo del sillín, ya podemos averiguar los diagramas de esfuerzos de nuestro problema bajo estudio.

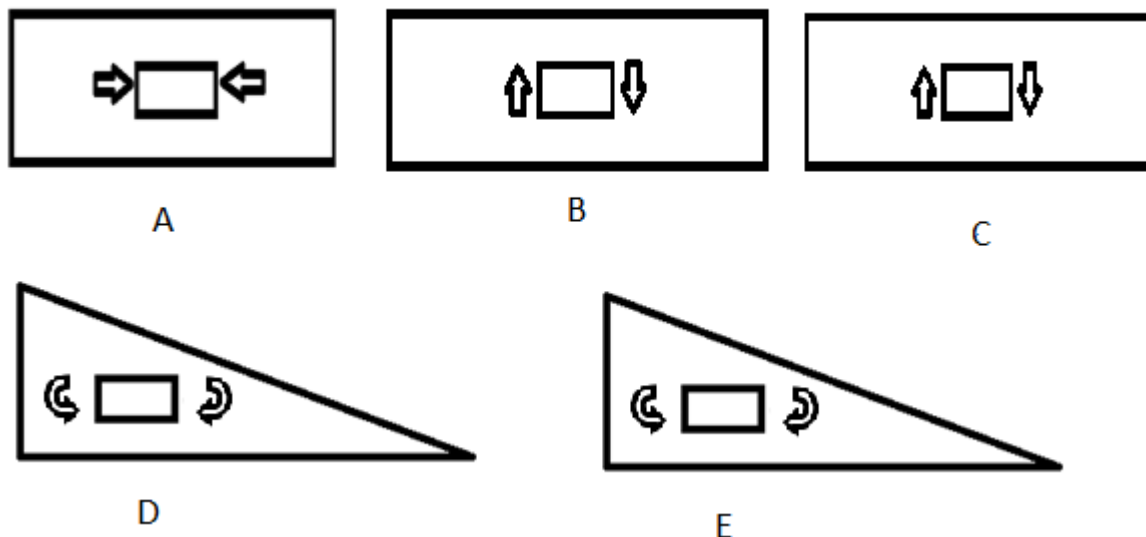


Figura 4-3. Diagramas de esfuerzos

Como puede observarse, la ilustración 4-3-A refleja que el tubo está sometido a compresión en todas las secciones del mismo y el valor máximo del esfuerzo es justamente q_z , siendo este constante a lo largo de todo el tubo (como puede apreciarse). Por lo tanto, para obtener las deformaciones motivadas por el axil daría exactamente igual la zona de colocación de las bandas extensométricas, puesto que el tubo no está sometido a

más esfuerzos en una sección con respecto a otra. Eso sí, las bandas deben situarse a una distancia de manera que cumplan el Principio de Saint Venant, y esta distancia es del orden del diámetro exterior del tubo del sillín, cumpliéndose esto para todos los casos posteriores (todas las bandas deben estar a una distancia mayor o igual que dicho diámetro). Por otra parte, las ilustraciones 4-3-B y 4-3-C representan los diagramas de esfuerzos cortantes, aunque dichos esfuerzos quedan fuera de nuestro objetivo de estudio, centrándonos así en los axiles y flectores tanto por simplicidad como por importancia en los resultados (siendo estos esfuerzos mucho más dominantes que los cortantes y torsores). Por último, las ilustraciones 4-3-D y 4-3-E indican que las galgas destinadas a medir la influencia de los esfuerzos flectores deben situarse lo más próximo posible a la zona del empotramiento (cumpliendo también la distancia de seguridad de Saint Venant), puesto que el valor máximo de esfuerzo tiene lugar justamente en la zona empotrada del tubo, siendo dicho valor (en valor absoluto) el producto de la carga correspondiente (q_y o q_x) por la longitud del tubo (L).

Con estos resultados teóricos basados en la resistencia de materiales ya se conoce dónde sería el lugar idóneo de colocación de las galgas extensométricas, sin embargo, la colocación final de las mismas no se va realizar basándose exclusivamente en la teoría de la resistencia de los materiales por motivos que serán justificados y explicados a continuación a partir de la siguiente ilustración:

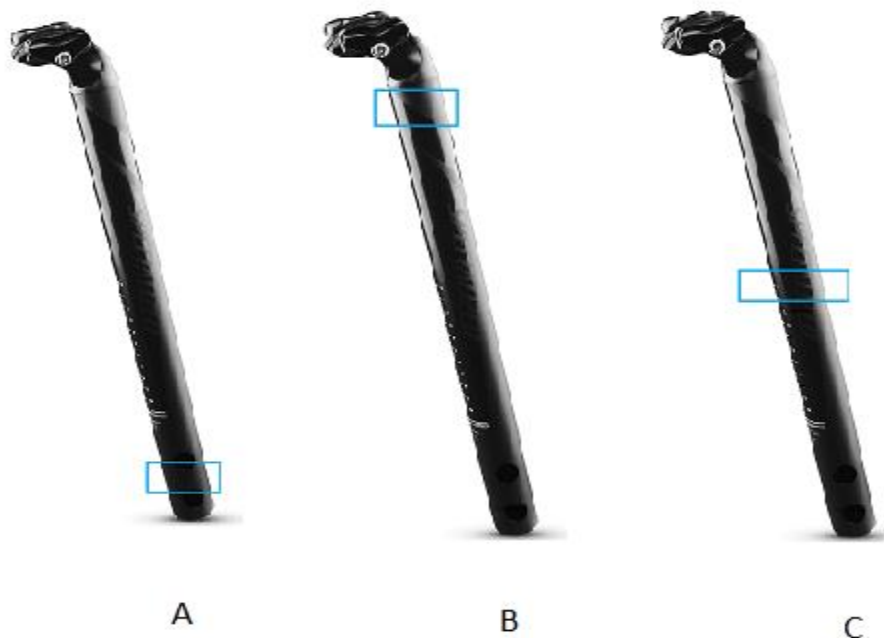


Figura 4-4. Zonas de colocación de las galgas

Siendo el rectángulo celeste que aparece dibujado sobre el tubo del sillín de la bicicleta las diferentes zonas de colocación de las galgas extensométricas. Lo ideal sería (como se ha demostrado anteriormente) colocarlas en la posición 1 (ilustración 4-4-A), sin embargo, al situarlo ahí tan solo podrían montarse sobre la bicicleta personas muy altas para poder estar cómodos durante el pedaleo, es decir, aunque sea la posición 1 la zona en la que se producen más tensiones durante el pedaleo, en este caso sólo pueden pedalear personas muy altas y no se podría realizar el ensayo para obtener las microdeformaciones con comodidad, por lo tanto debemos situarla más hacia arriba del tubo. Por otra parte, si se colocan las galgas en la posición 2 (ilustración 4-4-B), sería una posición muy cómoda en la que casi todas las personas podrían pedalear, pero existe el problema de que situando tan arriba las galgas (justo debajo del sillín) no se producen muchas microdeformaciones, por lo tanto lo más eficiente y óptimo sería situarlas en la posición 3 (ilustración 4-4-C), pues es aquella en la que existe mejor relación entre las deformaciones que se producen y la comodidad de pedaleo.

4.2. Orientación y colocación de las galgas

En este apartado se van a mostrar las posibles diferentes formas de colocación de galgas en función de los esfuerzos en los que estemos interesados y en la precisión de la medida, y se elegirá la configuración más apropiada para el problema bajo estudio.

4.2.1. Mediciones sobre una barra sometida a tracción-compresión

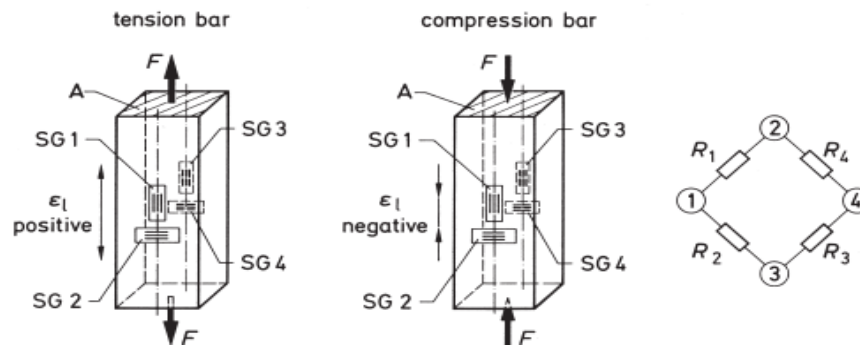


Figura 4-5. Colocación de bandas sobre barra en tracción/compresión.
(Tomado de [3])

En la ilustración 4-5 se muestran las posibles configuraciones de galgas para medir sobre una barra sometida a esfuerzo axial (en nuestro caso a compresión). En la imagen aparecen además bandas autocompensadas térmicamente, las cuales son bandas sobre las que se realizan diferentes procesos de fabricación de manera que se minimice la respuesta a la temperatura para un cierto rango de temperaturas, es decir, reducen el error motivado por la variación de la temperatura soportado por el objeto a ensayar durante la medición.

No obstante, los errores de medición solo ocurren si la temperatura varía durante la medición, y en nuestro caso, la temperatura va a ser prácticamente idéntica durante todo el proceso, por lo tanto elegimos bandas convencionales monodireccionales (que miden en una única dirección) al ser más económicas y porque se ajustan a los niveles de precisión que necesitamos. Asimismo, como se observa en la ilustración, las bandas deben estar orientadas según las direcciones principales de tensión (disminuyendo así los errores).

Si se activan las 4 bandas se estaría en la configuración puente completo, y las deformaciones de flexión se compensan para barras con secciones con simetría especular (nuestro caso, al ser una corona circular), y es una configuración muy adecuada para medir fuerzas normales. Por otra parte, si se activan las bandas 1 y 2 (SG1, SG2) se procedería a la configuración de medio puente, situación en la que las deformaciones de flexión se superpondrían en el resultado y las deformaciones térmicas se compensan muy bien. Por último, si tan solo se conecta (activa) una de las bandas a la superficie del objeto a ensayar (por ejemplo SG1), se pasaría a estar en la configuración de $\frac{1}{4}$ de puente, y en este caso las deformaciones de flexión también se encuentran superpuestas. Con todo ello, teniendo en cuenta que el efecto de la temperatura es despreciable al no existir apenas variación durante la medición y asumiendo también que el tubo va estar sometido a compresión flexión de forma simultánea, la opción más adecuada resulta ser la configuración $\frac{1}{4}$ de puente.

4.2.2. Mediciones sobre una barra en flexión

La siguiente figura muestra cómo deben orientarse las galgas para obtener deformaciones debidas al esfuerzo flector:

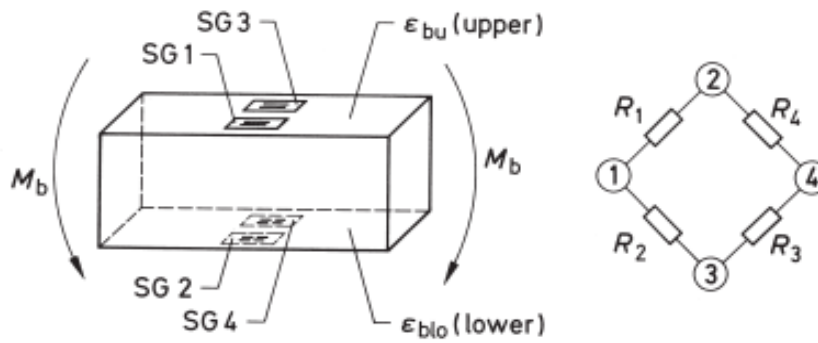


Figura 4-6. Colocación de bandas sobre barra en flexión. (Tomado de [3])

Asimismo, como ocurría en la ilustración anterior, nótese que las galgas están orientadas según la dirección principal de tensión (la longitudinal de la barra en este caso). Si se activan las 4 galgas que aparecen en la figura se estaría en la configuración puente completo (todas las galgas están experimentando microdeformaciones como consecuencia de estar ligadas a la superficie de la barra en cuestión), y en esta situación (así como ocurría en el caso de compresión) las deformaciones normales superpuestas se compensan para barras de secciones transversales simétricas y las deformaciones térmicas también se compensan en gran parte. Por otra parte, si se adoptase la configuración de medio puente (activación de SG1 y SG2, por ejemplo) la superposición de deformaciones normales no se refleja en el resultado, a diferencia de lo que ocurría con la compresión, y las deformaciones térmicas también se compensan muy bien. Por último, si se activa tan sólo una de las 4 bandas (SG1 o SG2), las deformaciones normales superpuestas se reflejan en el resultado. De forma similar a como se procedió en el caso de compresión, el tubo en cuestión, al estar sometido a esfuerzo axial y flector a la vez y la poca influencia de la temperatura en cada ensayo, conducen a la elección de la configuración $\frac{1}{4}$ de puente, la cual es la más sencilla de todas y cumple los requisitos suficientes (desde el punto de vista de los errores en la medición) como para ser la elegida.

4.2.3. Mediciones sobre una barra sometida a esfuerzo cortante o a torsión

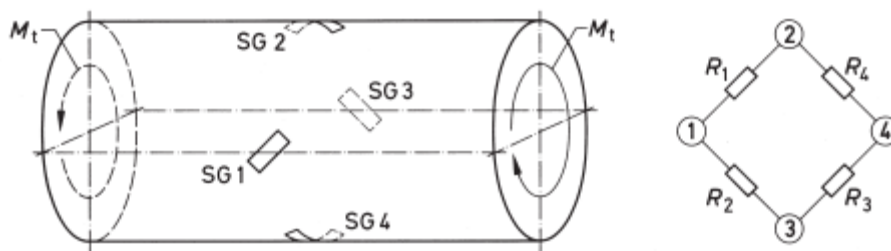


Figura 4-7. Colocación de bandas sobre eje a torsión/esfuerzo cortante. (Tomado de [3])

Aunque la torsión y los esfuerzos cortantes quedan fuera de el problema bajo estudio, la ilustración 4-7 muestra una de las posibles configuraciones de galgas para medir deformaciones sobre barras sometidas a dichos esfuerzos. El puente completo en este caso sería el más apropiado para compensar las señales de interferencia de las cargas normales y de flexión superpuestas.

Con todo lo desarrollado en este apartado, y al estar centrados exclusivamente en mediciones relacionadas con los esfuerzos axiales y flectores (que son los más dominantes) la configuración final que se va a adquirir en el tubo constará de 4 galgas situadas cada una de ellas a 90° entre sí, situadas en la zona media del tubo (en el

último apartado se comentará la posición exacta junto con los parámetros de dicho tubo) y orientadas según la dirección longitudinal del mismo, tal y como aparece en la siguiente ilustración:

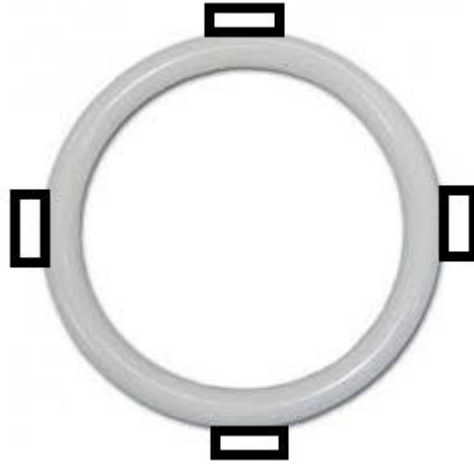


Figura 4-8. Galgas adheridas al tubo bajo estudio

Donde los rectángulos negros representan las galgas colocadas sobre nuestro tubo (visto desde arriba y completamente perpendicular a la sección del mismo), y como puede observarse cumple todo lo mencionado previamente.

4.3. Cálculo previo de microdeformaciones

En este apartado, se van a realizar unos cálculos sencillos aproximados exclusivamente con el objetivo de averiguar si se van a producir microdeformaciones suficientes en el tubo del sillín como para proceder al montaje de las galgas sobre dicho tubo. Para ello se va a considerar la situación menos favorable de todas, es decir, con la longitud del tubo lo más pequeña posible (como si se colocaran las galgas en la llamada posición 2 de la ilustración 4-4-B), pues en esta posición es en la que a menos tensión estarían sometidas las galgas. Para proceder al cálculo de dichas deformaciones se va a suponer que el tubo va a estar sometido a una fuerza (F) en el extremo opuesto al empotramiento en dirección "y" pero sentido negativo con respecto al mismo, como aparece en la siguiente imagen:

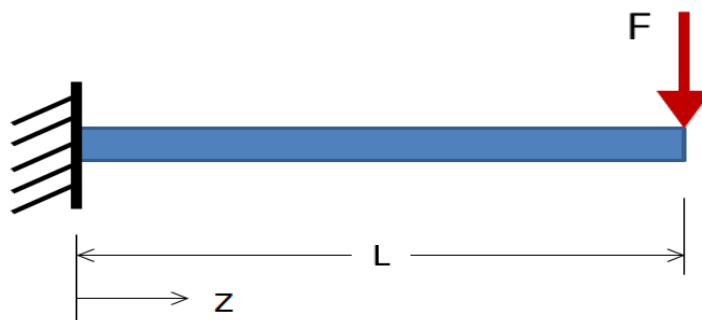


Figura 4-9. Tubo sometido a fuerza en dirección "y"

Teniendo claro la fuerza a la que está sometido el tubo en esta condición más desfavorable de todas ya podemos proceder al cálculo de la tensión máxima de la siguiente manera:

Sea la distribución de tensiones que experimenta dicho tubo la que aparece en la ilustración 4-10, donde se observa que la tensión σ varía exclusivamente con la dirección “y”, la tensión máxima buscada tendrá lugar en la zona más alejada del eje del tubo (esto es justamente en la superficie de dicho tubo, donde se van a colocar las galgas extensométricas, lo cual corresponde con el radio externo del mismo).

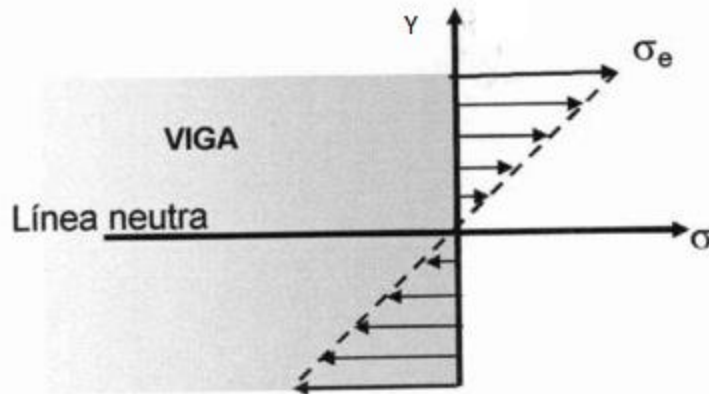


Figura 4-10. Distribución de tensiones sobre viga sometida a flexión

Con ello, la relación existente entre la tensión máxima y el momento que se produce en el tubo viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{MAX} = \frac{FL}{I} y_{MAX} \tag{9}$$

Donde F es la fuerza aplicada (que vamos a suponer F=50 Kg), L es la longitud del tubo en esta situación desfavorable con las galgas lo más próximo posible al sillín (L= 4 cm), y_{MAX} corresponde con el radio exterior de la corona circular ($R_e = 1,5\text{ cm}$; $R_i = 1,3\text{ cm}$) e I es la inercia de la sección, que al ser una corona circular tiene la siguiente forma:

$$I = \pi \frac{(R_e^4 - R_i^4)}{4} \tag{10}$$

Los valores de los parámetros geométricos han sido medidos de forma aproximada, el valor exacto de cada uno de ellos se mostrará en uno de los próximos apartados.

Llegados a este punto ya puede conocerse la tensión máxima que soporta la sección del tubo situada a 4 cm

del sillín (debido a que es la distancia mínima a la que puede bajarse el sillín y que a la vez las galgas cumplan la distancia de seguridad de Saint-Venant, la cual como se dijo en apartados anteriores es del orden del

diámetro de la barra considerada). Dicho valor de tensión sustituyendo los valores en las ecuaciones 11 y después en 10 es $\sigma_{MAX} = 16,96 \text{ N/mm}^2$.

Por último, aplicando la ley de comportamiento (ecuación 12) podemos obtener las microdeformaciones que experimenta dicha sección del tubo:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{MAX}}{E} \quad (11)$$

Donde E es el módulo de Young de nuestro material (Aluminio), por lo que es del orden de 70000 MPa, y ε son las microdeformaciones buscadas, que sustituyendo los valores de la tensión máxima de la ecuación (10) y del módulo de Young del Aluminio en la ecuación (12), se obtiene $\varepsilon = 242$, es decir, en la situación que el tubo está sometido a menos esfuerzos, se obtienen de forma aproximada un valor considerable de microdeformaciones, lo cual quiere decir que situando las galgas en una zona más favorable, es decir, bajando menos el sillín (siendo la longitud del tubo sometida a esfuerzos más larga consecuentemente), éstas estarán sometidas a mayor tensión, y por lo tanto experimentarán más microdeformaciones. De este modo, teniendo ya claro que las galgas van a dar un valor razonable de microdeformaciones (no despreciable), sabiendo la zona, la orientación así como el tipo y número de bandas a colocar, estamos en condiciones de proceder con el montaje de las mismas, lo cual se verá en el siguiente apartado.

5. MONTAJE DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

En este apartado se va a detallar el procedimiento de montaje de las galgas sobre el sólido en cuestión, en este caso sobre el tubo del sillín de la bicicleta, indicando los puntos a tener en cuenta para que se produzcan los menores errores posibles cuando obtengamos las microdeformaciones proporcionadas por las mismas. Dicho esto, procedamos con los detalles de montaje, los cuales serán enumerados por orden a la hora de realizarlos:

-Lijar la superficie del tubo: Este punto es muy importante puesto que hay casos en los que el objeto sobre el que se van a adherir las galgas contienen algún tipo de recubrimiento, como podría ser pintura, lo cual dificulta el pegado de las bandas y principalmente se obtendrían más errores en la medición. En este caso, el tubo de la bicicleta estaba recubierto por una capa de pintura, por lo tanto se ha tenido que lijar lo más minuciosamente posible la superficie de colocación de las bandas, ya que de no lijar correctamente, las galgas tendrían que ser recolocadas de nuevo, lo cual es una tarea bastante tediosa.

-Limpiar cualquier tipo de impureza: Esta tarea es también muy importante si se quiere garantizar la precisión y correcta colocación de las galgas. No basta con lijar, también hay que limpiar la superficie.

-Referenciar el lugar donde van a ir colocadas las galgas: Esto permite que el posterior montaje sea más sencillo y cómodo, por lo tanto es conveniente realizar unas marcas sobre el tubo para facilitar la tarea.

-Posicionar la galga en la posición adecuada con celo: Este paso es necesario para terminar de asegurar que la colocación final de la galga una vez esté adherida sobre la superficie va a ser la adecuada, tal y como aparece en la siguiente ilustración.



Figura 5-1. Posicionamiento de la galga con celo

Nótese también sobre esta ilustración las marcas (pintadas a rotulador) que se ha comentado en el punto anterior a este para facilitar el montaje de las bandas.

-Levantar el celo y aplicar catalizador en la galga: Una vez se posicionó la galga con el celo se ha de despegar dicha banda de celo con la galga extensométrica adherida sobre ella y aplicar catalizador (ilustración 5-2) para facilitar y acelerar el posterior pegado de la galga sobre el tubo en cuestión, y una vez aplicado se ha

de esperar en torno a 30 o 60 segundos para pasar al pegado.

-Poner pegamento en superficie del tubo: Obviamente no basta con el catalizador aplicado sobre la galga, también es necesario aplicar pegamento adhesivo (ilustración 5-2) sobre la superficie y extenderlo adecuadamente para que el pegado sea perfecto.



Figura 5-2. Catalizador y pegamento aplicado sobre las galgas

-Se vuelve a colocar la galga: Una vez aplicado todo lo necesario para que la galga quede adherida sobre la superficie, se procede al pegado de la misma (de nuevo con el celo) y esperamos entre 10 y 20 minutos para garantizar el pegado correcto.

-Retirado del celo a 45° de la banda: Esta pauta es muy importante respetarla puesto que si se retira el celo de cualquier manera, como podría ser en la dirección longitudinal de la banda, es muy probable llevarse de nuevo la galga adherida al celo a pesar de haber aplicado catalizador y pegamento para el pegado sobre la superficie del tubo, sin embargo, si se retira el celo a 45° la banda quedará adherida sobre la superficie. La ilustración 5-3 muestra dicho retirado de celo a 45° con respecto a la galga.

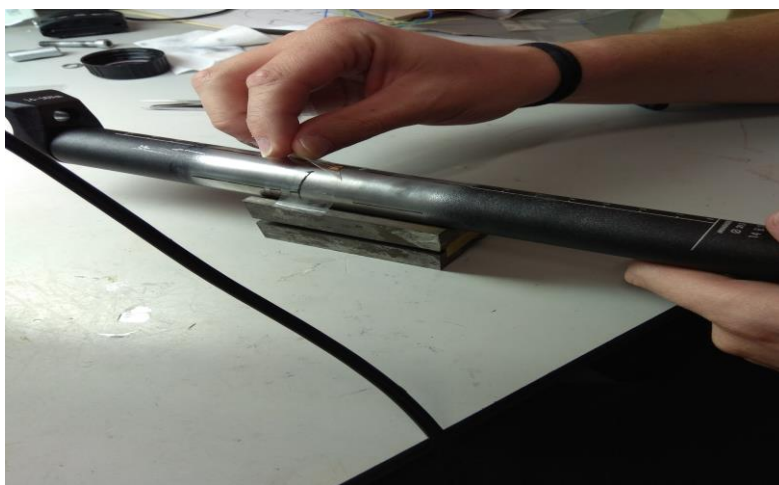


Figura 5-3. Retirada del celo a 45°

El resultado final de la banda extensométrica adherida a la superficie de nuestro tubo aparece en la siguiente ilustración:

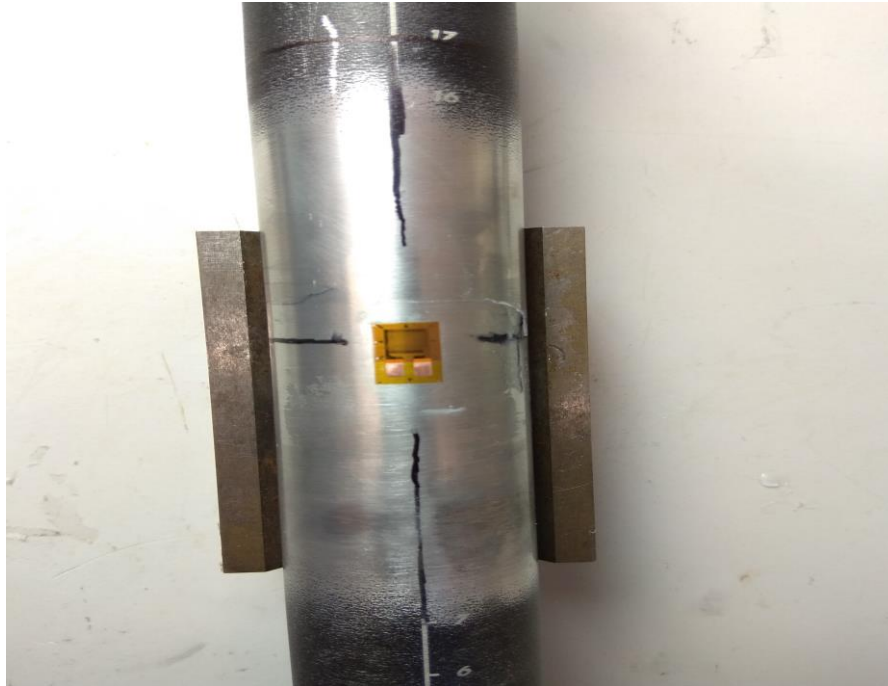


Figura 5-5. Galga extensométrica adherida sobre el tubo del sillín

-Raspado de las patillas de la galga: Ahora es conveniente raspar las patillas de la galga sobre las que van a ir conectadas los cables para cerrar el $\frac{1}{4}$ de puente (en nuestro caso), pero con cuidado de no arañar la resistencia, lo cual supondría un gran error final en la medición.

-Verificamos que la galga mide correctamente: Para ello se emplea un polímetro, y el valor de la resistencia (en ohmios) debe coincidir con el que viene en la caja de procedencia de las mismas (350Ω en este caso).



Figura 5-6. Comprobación de la resistencia de la banda

-Preparación de los cables de montaje y soldado: Cuando sea comprobado que efectivamente la resistencia marca lo que debería, se procede al soldado para establecer la conexión y cerrar el circuito que permite obtener las microdeformaciones buscadas desde el principio (ilustración 5-6).

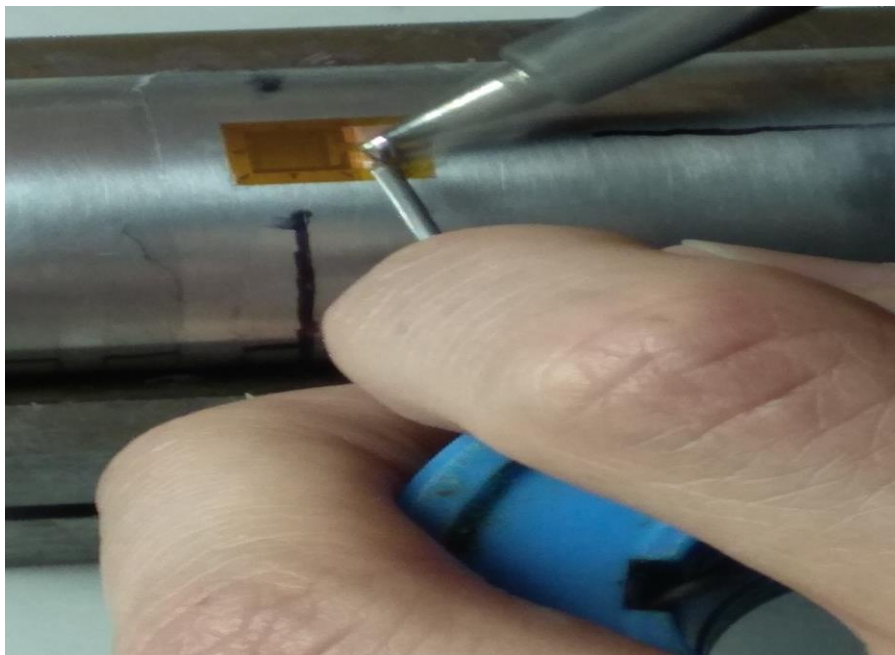


Figura 5-7. Proceso de soldadura de la galga

-Se vuelve a verificar en el extremo de los cables:



Figura 5-8. Verificación tras el soldado

-Aplicamos silicona: Cuando ya se tiene la galga adherida a la perfección y conectada a los cables que cierran el $\frac{1}{4}$ de puente, hay que poner silicona sobre el conjunto para impedir que se separen durante el ensayo y garantizar aún más la protección. Cabe destacar que el procedimiento llevado a cabo para una banda ha de repetirse para las otras tres restantes, dando lugar a este resultado (ya con la capa de silicona aplicada).

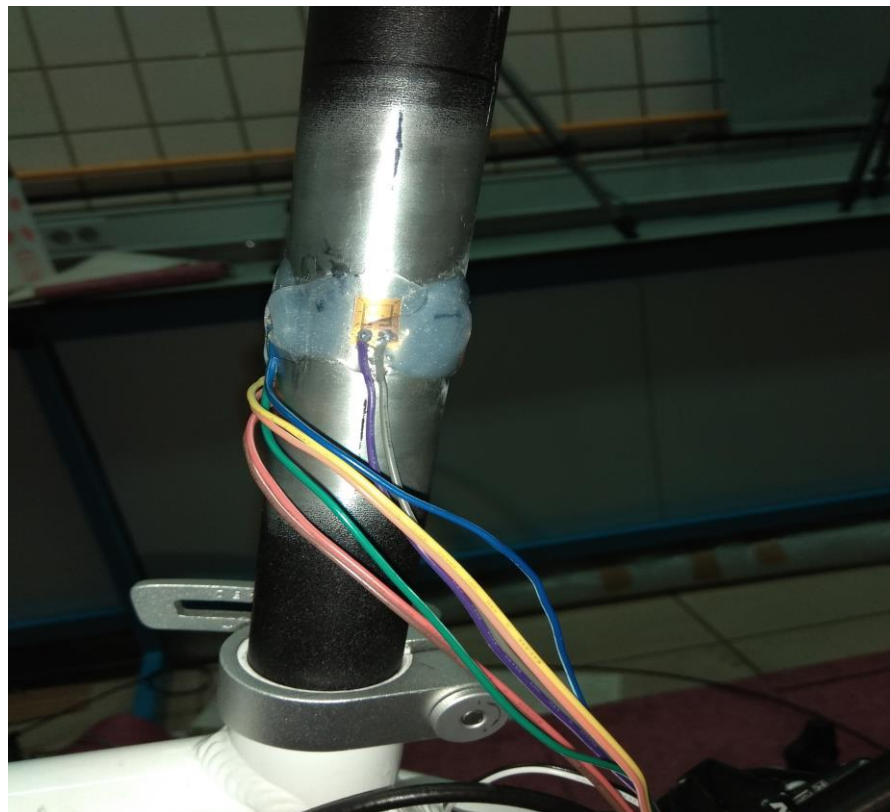


Figura 5-9. Galgas montadas sobre el tubo

6. RESULTADOS

6.1. Método para desacoplar axiles de flectores

Una vez se tienen las galgas colocadas tal y como se ha detallado en el apartado 5, ya se cumplen las condiciones de proceder al cálculo de las fuerzas objeto de nuestro estudio.

En este apartado se va a comentar un procedimiento llevado a cabo a priori pero que finalmente no resultó útil por motivos que serán justificados posteriormente, de forma que el cálculo definitivo de las fuerzas en el sillín se obtendrán en el apartado 6.2. Dicho esto comencemos con el primero de los procedimientos:

La base de este planteamiento consiste en conocer las microdeformaciones que experimenta el tubo del sillín de la bicicleta al estar sometido a flexión (lo más pura que se pueda, ilustración 6-1) y a compresión (también lo más pura que se pueda, ilustración 6-2), y una vez conocidas las microdeformaciones que experimenta el tubo ante fuerzas conocidas (las cuales son masas cuyo valor se conocen) ya podrían conocerse las fuerzas que experimenta el tubo a partir de los valores de microdeformaciones que nos proporcionan las galgas cuando el ciclista se monta en la bicicleta y realiza el ciclo de pedaleo.

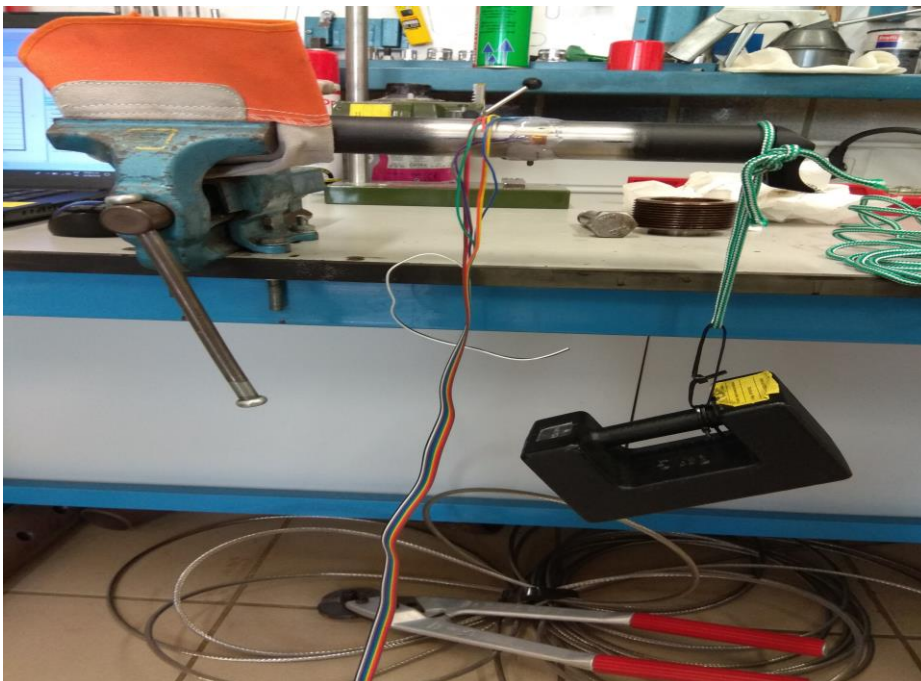


Figura 6-1. Ensayo a flexión "pura"

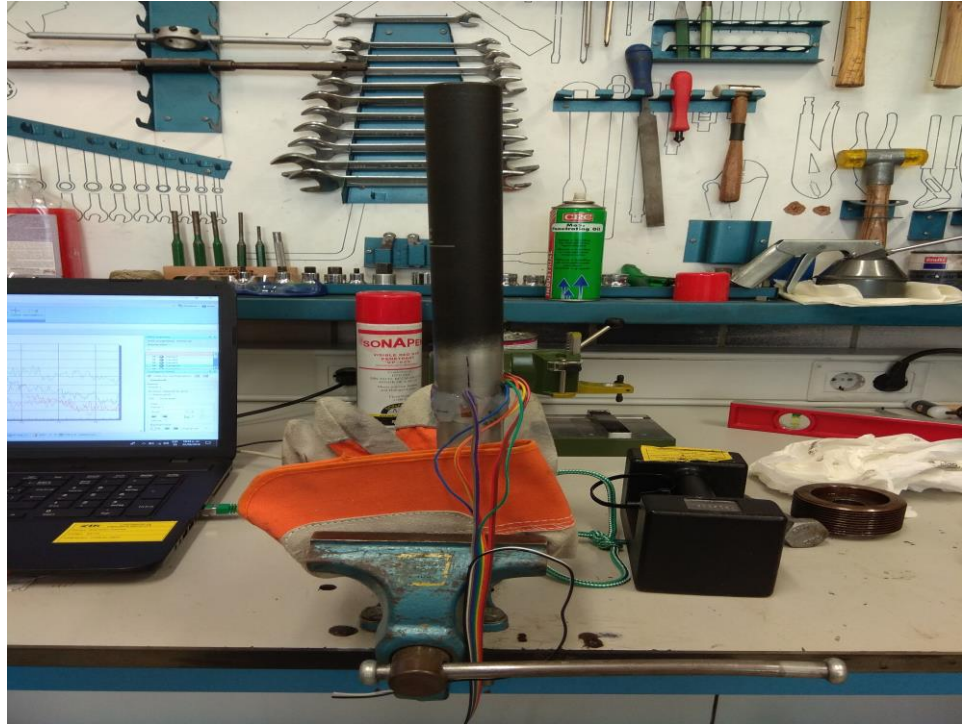


Figura 6-2. Ensayo a compresión "pura"

Para llevar a cabo el ensayo a flexión "pura" se empleó una masa de 5 kg y fue colgada del tubo tal y como aparece en la ilustración 6-2, obteniendo los siguientes valores de microdeformaciones:

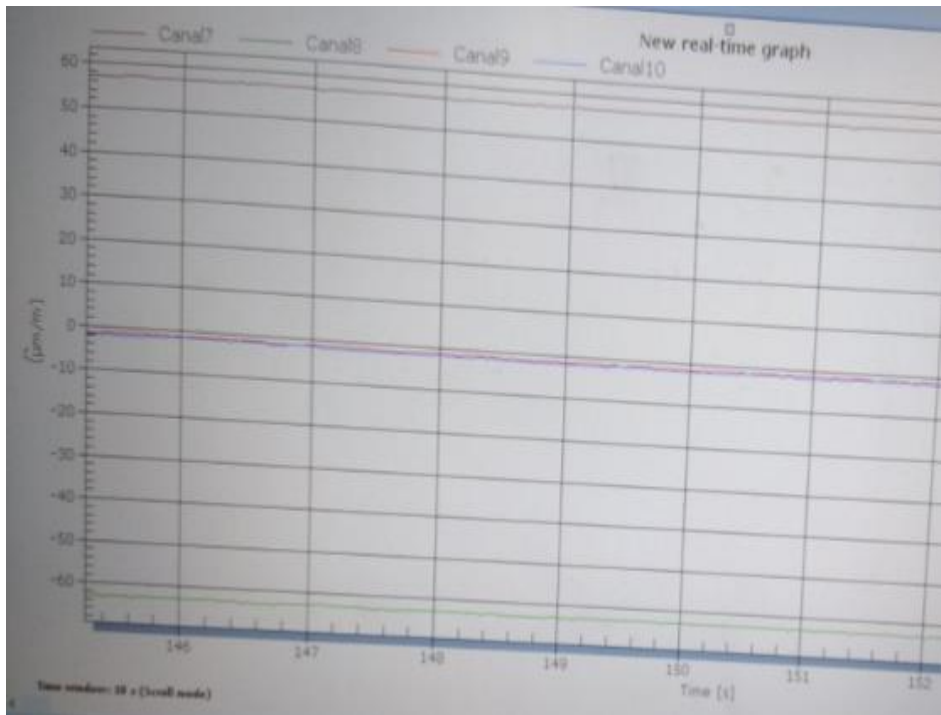


Figura 6-3. Microdeformaciones de ensayo a flexión

La ilustración 6-3 muestra el resultado (microdeformaciones) del ensayo a flexión de nuestro tubo. Como se puede observar, dicho valor ronda entorno a las 60 microdeformaciones para cada una de las galgas que están sometidas a flexión, una en positivo (pues al estar en la parte de arriba del tubo se encuentra a tracción) y el otro valor en negativo al encontrarse la galga en la parte inferior del tubo (compresión). El ensayo se repitió de forma idéntica pero girando el tubo 90° respecto a su eje para que sea el otro par de galgas ahora el que se encuentre sometido a esfuerzo flector, y los resultados también fueron casi iguales (del orden de 60 microdeformaciones). La diferencia de los valores (insignificante) se debe a que es imposible que las galgas estén centradas perfectamente y a que también es imposible colocar el tubo de igual forma de un ensayo a otro. Conocida por tanto la masa con la que se realiza el ensayo así como el valor de microdeformaciones que experimenta el tubo ante dicha carga (60 microdeformaciones), podemos conocer el valor de las fuerzas que experimenta el sillín cuando un ciclista pedalea a partir del valor de microdeformaciones que nos dan las galgas con un simple factor de conversión (o regla de 3).

Por otra parte, para llevar a cabo el ensayo a compresión "pura" cogimos una masa de 20 kg y la colocamos sobre el tubo tal y como aparece en la imagen 6-2 (aunque en dicha ilustración no aparece colocada la pesa encima del tubo, pero fue colocada) y los valores de microdeformaciones obtenidos fueron los siguientes:

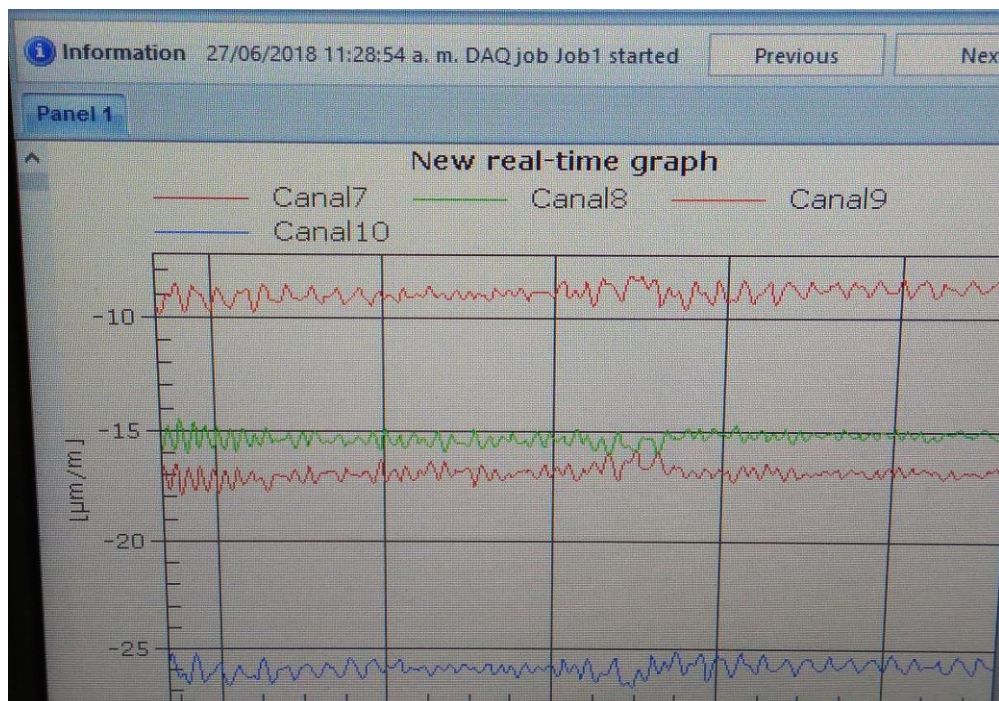


Figura 6-4. Resultado del ensayo a compresión "pura"

Aunque en este ensayo el valor de microdeformaciones debería haber sido el mismo para cada una de las 4 galgas, la mesa sobre la que se hizo el ensayo (que se intuye en las ilustraciones anteriores) estaba ligeramente inclinada, por lo que era imposible que las dos galgas pertenecientes a dicho plano puedan estar sometidas a compresión exclusivamente, sin embargo, el otro par de galgas (perpendiculares al otro par de galgas) si que se puede aproximar bastante. En efecto, los resultados para el par de galgas al que no afectaba dicha inclinación corresponde con las líneas de la zona de en medio de la ilustración 6-4, y dicho valor es de 15 microdeformaciones (que como están sometidas a compresión el valor aparece en negativo). Y este valor debe ser el mismo para todas las galgas, por lo tanto ya se conocen también el valor de microdeformaciones ante un ensayo de compresión pura. No obstante, dicho valor es mucho más pequeño que las microdeformaciones obtenidas ante el ensayo a flexión, por lo que cogeremos el valor mayor para llevar a cabo el factor de conversión y obtener las fuerzas en el sillín ante el pedaleo del ciclista.

Llegados a este punto, y procediendo como se acaba de detallar (multiplicando el valor de microdeformaciones obtenidos de las galgas ante el pedaleo de un ciclista cualquiera por el valor del peso(en Newton) de la carga del ensayo de flexión “pura” (49 N) y dividiendo dicho valor por las 60 microdeformaciones obtenidas), ya tenemos las fuerzas que experimenta el tubo del sillín.

Antes de mostrar los resultados de las fuerzas, es conveniente mostrar el sistema de referencia tomado en el sillín (ilustración 6-5).

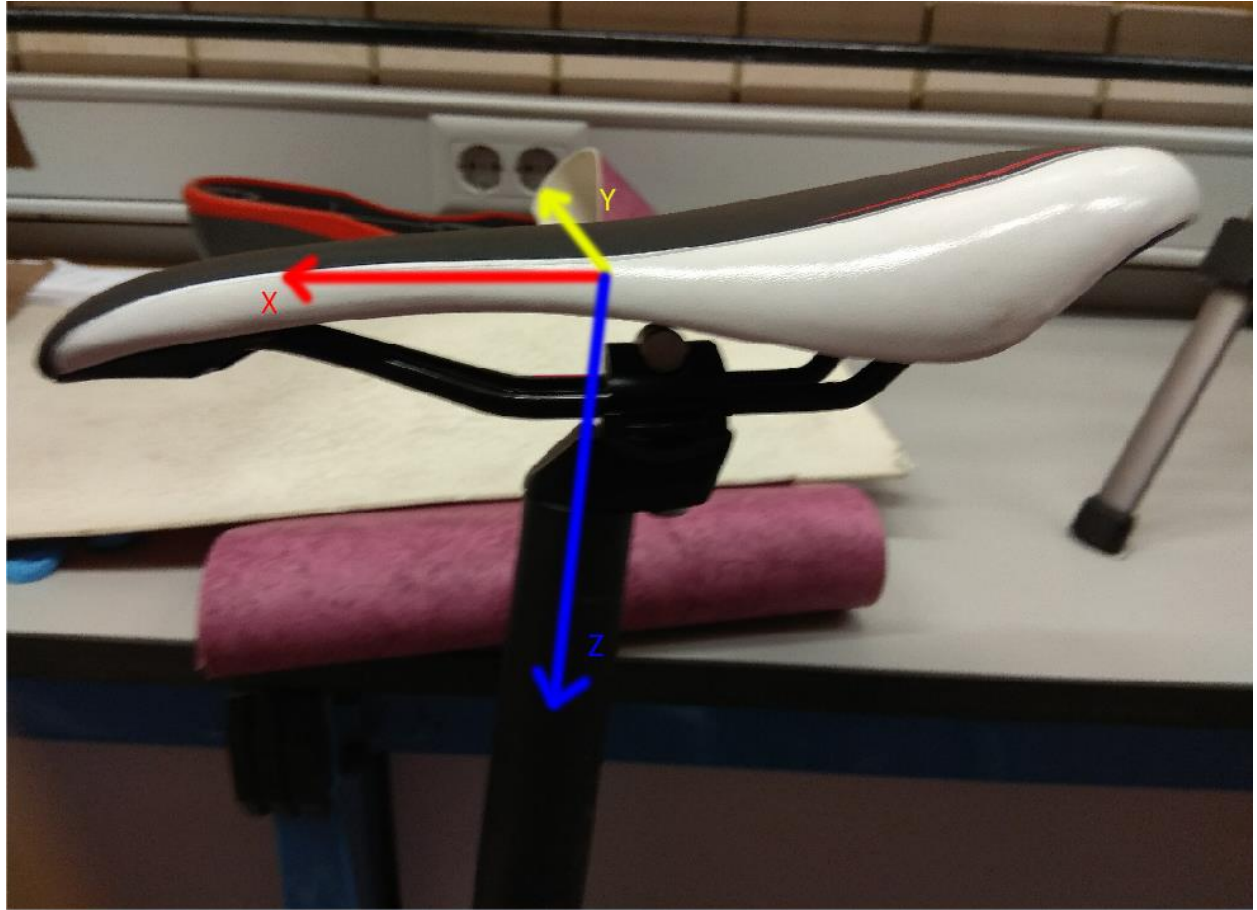


Figura 6-5. Sistema de referencia en el sillín

Siguiendo dicho sistema de referencia, las 4 galgas van a ser nombradas tal y como aparecerán en la ilustración 6-6 a partir de ahora en adelante en función de la posición en la que se encuentra cada una.

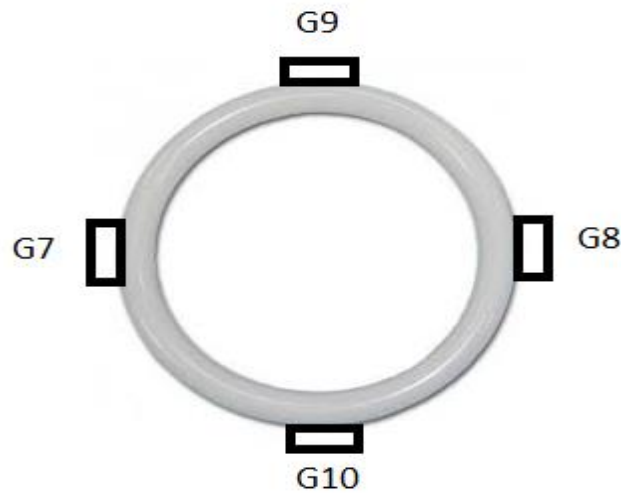


Figura 6-6. Numeración de las 4 galgas

Siendo dicha imagen a la correspondencia de cómo se vería el tubo del sillín visto desde arriba, con el eje “x” dirigiéndose del centro de la corona circular hacia la G7 y el eje “y” dirigiéndose desde el centro hacia la G9 (designando ambos ejes tal y como aparece en la ilustración 6-5).

Sabiendo ya el sistema de referencia tomado así como la numeración y situación de nuestras galgas, pasemos a los resultados de las fuerzas obtenidas a partir de este procedimiento para tres escenarios distintos, es decir, con tres individuos distintos pedaleando sobre la bicicleta:

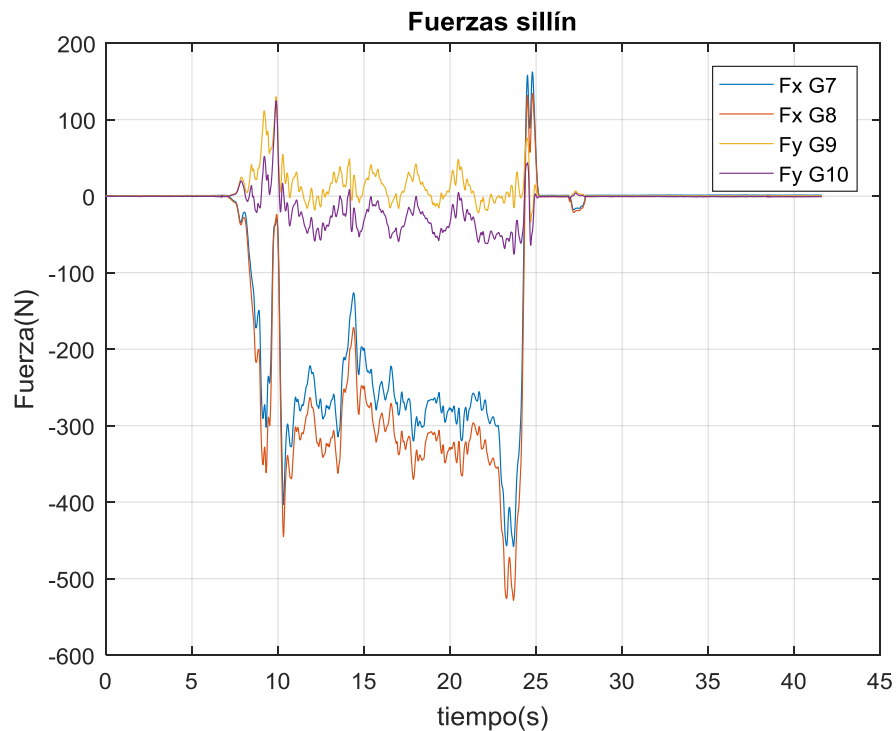


Figura 6-7. Fuerzas del ciclista 1

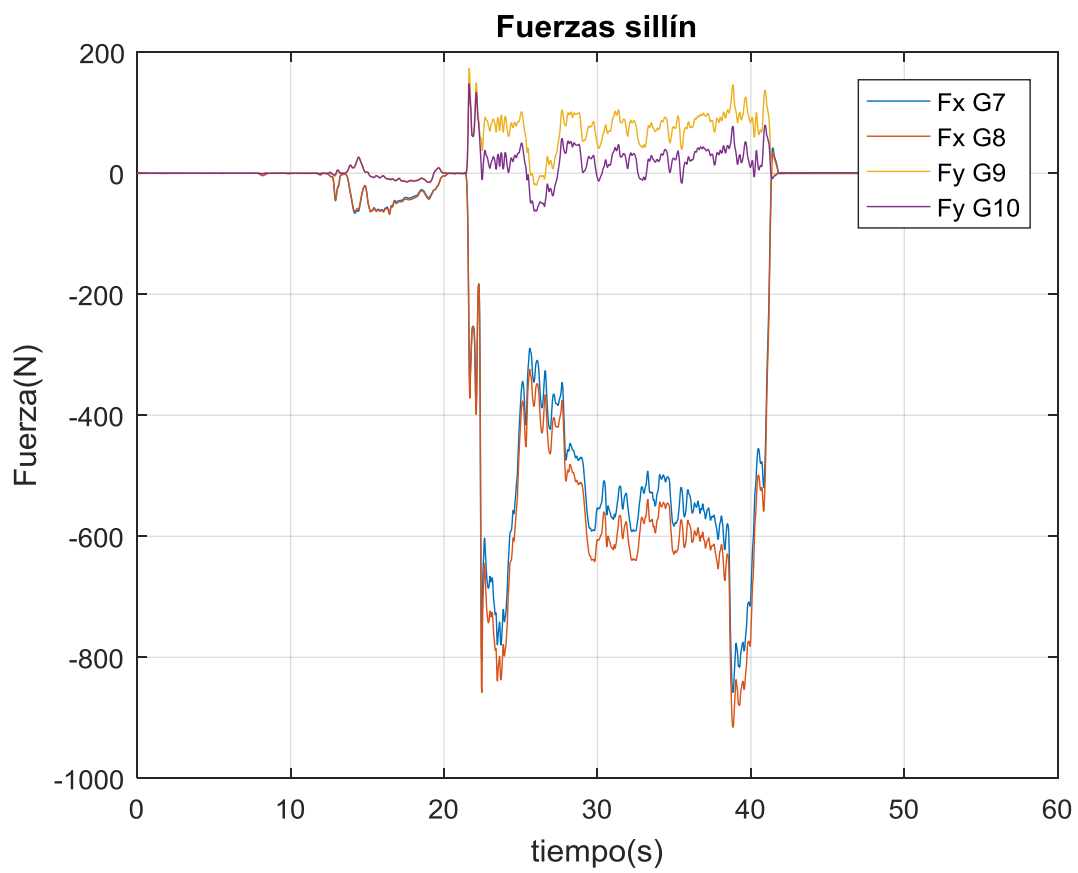


Figura 6-8. Fuerzas del ciclista 2

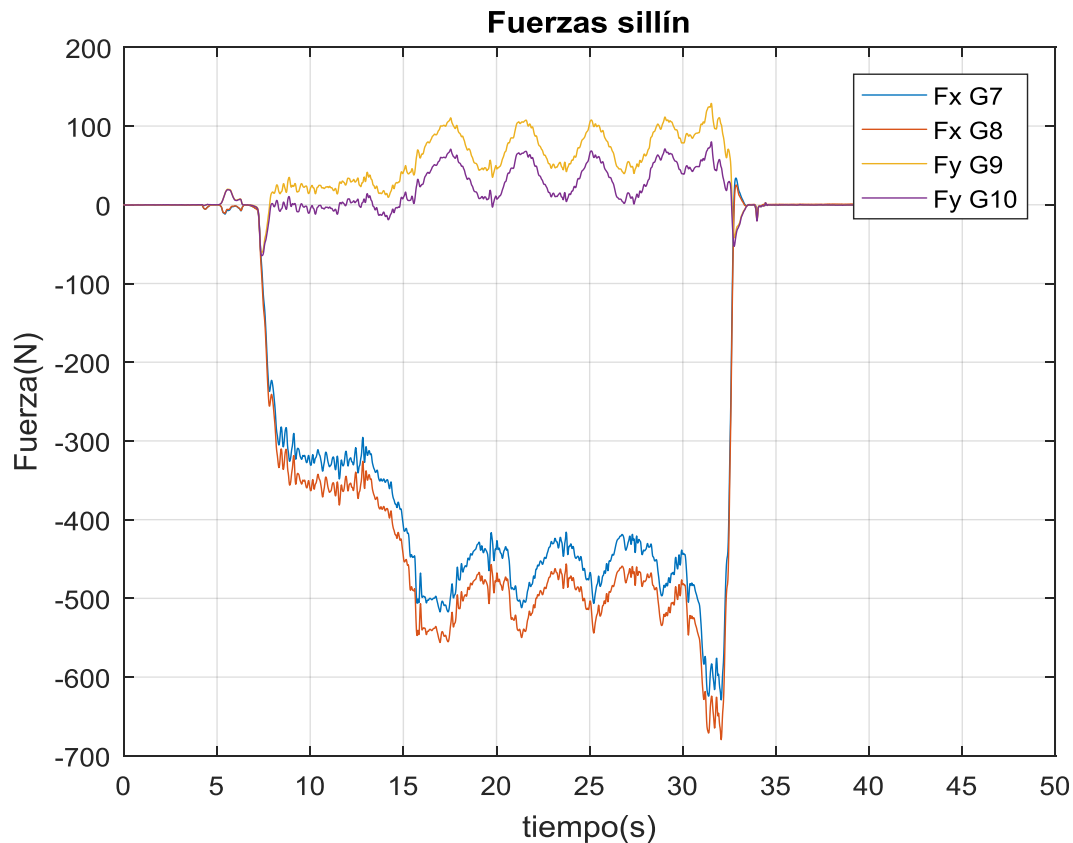


Figura 6-9. Fuerzas del ciclista 3

Como puede observarse, las tres figuras tienen la misma forma aunque difieren en los valores de fuerzas alcanzados (como era de esperar), puesto que el peso de cada uno de los tres ciclistas es diferente, así como la inercia de pedaleo, sin embargo, todas tienen formas similares. Comenzando por la primera de ellas, puede verse que los valores máximos de fuerzas las experimentan las galgas 7 y 8, las cuales están enfrentadas entre sí como aparece en la ilustración 7-6, siendo dicho valor en torno a 280 N para la G7 y en torno a 320 N para la G8, apareciendo ambos valores en negativo, lo cual puede deberse a que el ciclista está situado en la parte más trasera del sillín y por consiguiente la fuerza que experimentan ambas galgas van en dirección negativa del eje x. Asimismo, las fuerzas que experimentan las galgas 9 y 10 son mucho menores que las previamente comentadas, lo cual se debe a que durante el ciclo de pedaleo, el ciclista apenas ha tenido inercia hacia los lados (dirección del eje “y”), y por lo tanto las fuerzas no llegan a los 20 N en ninguna de dichas galgas. No obstante, (y ahora viene el motivo por el cual este procedimiento no es útil para determinar las fuerzas que sufre el sillín) las fuerzas que aparecen en cada una de las tres gráficas de los ciclistas no son únicamente fuerzas de flexión, también aparecen superpuestas las fuerzas de compresión, debido a que las microdeformaciones que experimentan las galgas durante el pedaleo del ciclista son consecuencia tanto de la contribución del esfuerzo axil como del flector, resultando por lo tanto muy difícil separar la fuerza axil y por otra parte la fuerza de flexión, ya que si pudiéramos aislar ambas contribuciones, sí que podríamos obtener las fuerzas que sufre el sillín mediante factores de conversión, pero por lo comentado previamente, resulta muy complicado y más eficiente obtenerlas mediante el segundo procedimiento explicado en el apartado 6-2.

6.2. Procedimiento para el cálculo de las fuerzas

El método que se va a desarrollar en este apartado resulta el más eficiente a la hora de calcular las fuerzas buscadas que se producen en el sillín de la bicicleta durante el ciclo de pedaleo de un ciclista.

Para ello se va a realizar dos sistemas de ecuaciones, donde en cada sistema las incógnitas serán las fuerzas en las tres direcciones, apareciendo la fuerza en dirección “z” repetida en ambos sistemas de ecuaciones, como se mostrará a continuación. Las ecuaciones que vamos a emplear para establecer nuestro sistema de ecuaciones están basadas en la resistencia de materiales, y son las siguientes:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{M}{I} y_{MAX} \quad (14)$$

Centrando la atención en las galgas G7 y G8:

Haciendo uso de la ecuación (13) y la ecuación (14), $\sigma_{axil} = \frac{F_z}{A}$ y $\varepsilon_{flector} = \frac{M}{I} y_{MAX}$. Usando ahora la ecuación (12), sabiendo que M es el momento que experimenta la sección del tubo en la que está colocada la galga, siendo por lo tanto $M = F_x l$ (donde l es la distancia a la que está colocada dicha galga desde el extremo en el que está colocado el sillín) y que y_{MAX} corresponde con el radio externo de la sección cilíndrica (R), la ecuación resultante para la galga G7 es la siguiente:

$$\varepsilon_7 = -\frac{F_z}{E A} - \frac{F_x l R}{I E} \quad (14)$$

Es decir, la deformación total que experimenta la galga G7 (la cual es la que nos proporciona el programa de adquisición de datos llamado quantum), es igual a la deformación debida al esfuerzo axil y al esfuerzo flector, de ahí que sea la suma de ambas. Por otra parte, el signo negativo en ambos sumandos de la ecuación (15) se deben a que la G7 se encuentra sometida a compresión (de ahí que sea negativo el primero de los sumandos) y además, si aplico la fuerza F_x en dirección positiva del eje x (que aparece representado en la figura 6-1-5), la galga G7 estaría sometida a compresión también, de ahí que el segundo sumando también sea negativo. Dicho de otra forma, si aplico la fuerza en dirección x pero sentido negativo, la región del tubo correspondiente a la galga 7 estaría sometida a tracción (por lo que físicamente sería una fuerza positiva) pero sin embargo, al estar la fuerza aplicada en dirección negativa del eje x, hay que cambiarle el signo a las fuerzas que experimenta la galga G7. Dicha ecuación (15) también puede escribirse de la siguiente forma con el objetivo de facilitar el manejo de la misma: $\varepsilon_7 = -\frac{F_z}{a} - b F_x$ donde a y b son parámetros que engloban a las constantes de la ecuación (15).

De igual manera y procediendo de forma idéntica para la galga G8, tenemos la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_8 = -\frac{F_z}{E A} + \frac{F_x l R}{I E} \quad (16)$$

Donde el signo negativo correspondiente al término debido al axil tiene la misma explicación que con la galga G7, y el signo positivo del segundo sumando se debe a que si aplicamos la fuerza en dirección negativa del eje x, la región del tubo correspondiente a la galga G8 estaría sometida a compresión (por lo que físicamente sería negativa la fuerza), pero además, al estar aplicada en dirección x negativa no hay que cambiarle el signo.

El primer sistema de ecuaciones tiene por lo tanto la siguiente forma:

$$\varepsilon_7 = -\frac{F_z}{a} - b F_x \quad (15)$$

$$\varepsilon_8 = -\frac{F_z}{a} + b F_x \quad (16)$$

Como puede apreciarse, dicho sistema de ecuaciones tiene como incógnitas las fuerzas F_z y F_x , puesto que ε_7 y ε_8 son columnas con los valores de las deformaciones totales que han experimentado las galgas (G7 y G8) a lo largo del tiempo y los parámetros a y b son conocidos.

Sin embargo, aún falta por determinar la fuerza F_y , por lo que se tiene que hacer uso de otro sistema de ecuaciones empleando para ello el otro par de galgas (G9 y G10).

Usando exactamente las mismas ecuaciones que para el sistema de ecuaciones anterior y procediendo de igual manera, pero interviniendo la F_y en lugar de la F_x para las deformaciones debida al flector, el sistema de ecuaciones resultante es el siguiente:

$$\varepsilon_7 = -\frac{F_z}{a} - b F_y \quad (17)$$

$$\varepsilon_8 = -\frac{F_z}{a} + b F_y \quad (18)$$

Este nuevo sistema de ecuaciones posee como incógnitas las fuerzas F_y y F_z (de nuevo), pudiendo por lo tanto conocer los valores buscados de las fuerzas en las tres direcciones una vez sepamos el valor de los parámetros que intervienen en ambos sistemas. Dichos valores son los siguientes:

Símbolo	Significado	Valor
R	Radio externo	14.95 mm
r	Radio interno	12.25 mm
l	Longitud galgas-sillín	180 mm
E	Módulo de Young del Aluminio	70000 MPa
A	Área sección	$A=\pi(R^2 - r^2)$
I	Inercia sección	$I=\pi(R^4 - r^4)/4$

Tabla 1. Valores de los parámetros

Con estos datos medidos en el laboratorio ya se conocen el valor de los parámetros a y b sin más que sustituir los valores medidos:

$$a = E A = 16150299,51 \text{ MPa mm}^2 \quad (21)$$

$$b = \frac{l R}{I E} = 1,04 \times 10^{-6} (\text{MPa mm}^2)^{-1} \quad (22)$$

Con todo ya planteado y conocido, se ha realizado un programa en Matlab implementando las ecuaciones y procedimiento explicado anteriormente con el objetivo de conocer las fuerzas F_x , F_y y F_z . Dicho programa se ha realizado en 4 situaciones distintas:

Tres de ellas con tres individuos distintos (uno para cada ensayo) realizando ciclos de pedaleo, es decir, en movimiento, y el otro escenario se ha llevado a cabo con el primero de los individuos montado encima del sillín de la bicicleta pero sin pedalear (en estático). Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

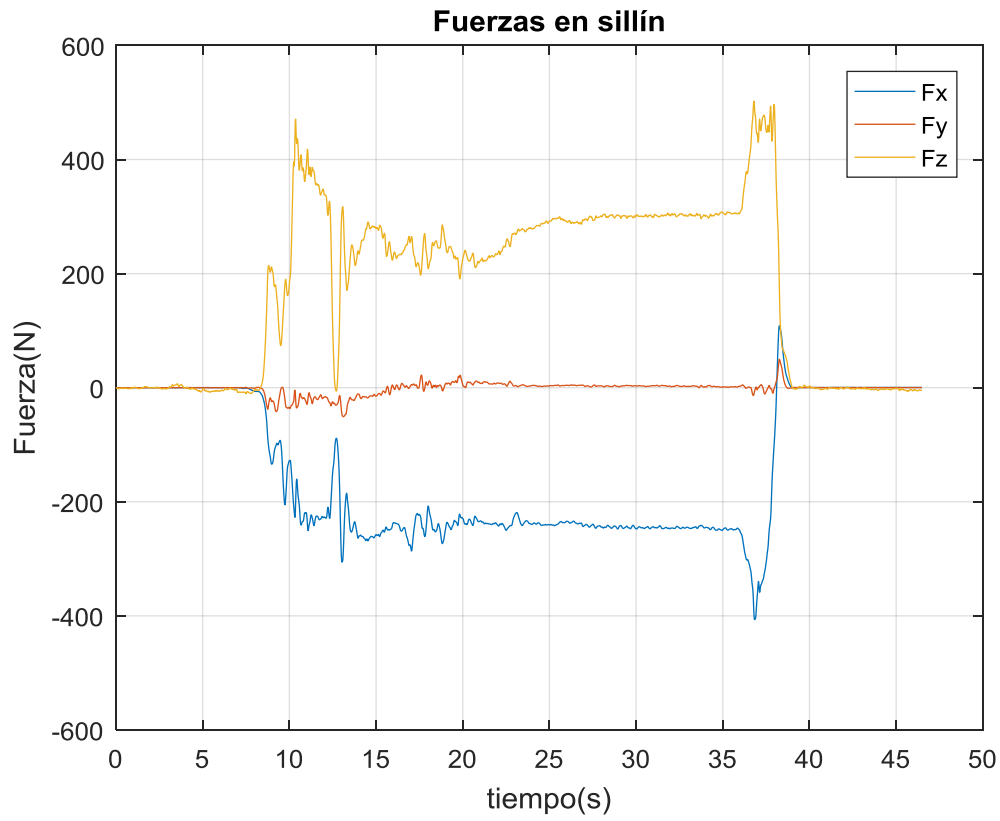


Figura 6-10. Fuerzas en sillín medición estática

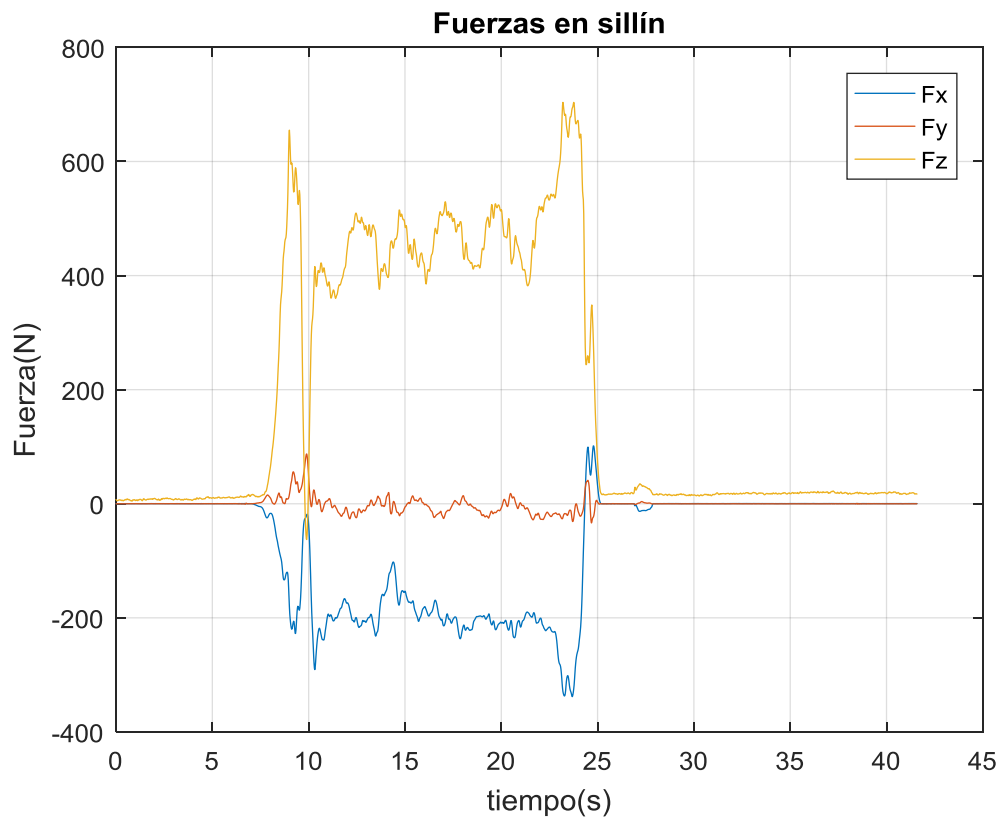


Figura 6-11. Fuerzas en sillín ciclista 1

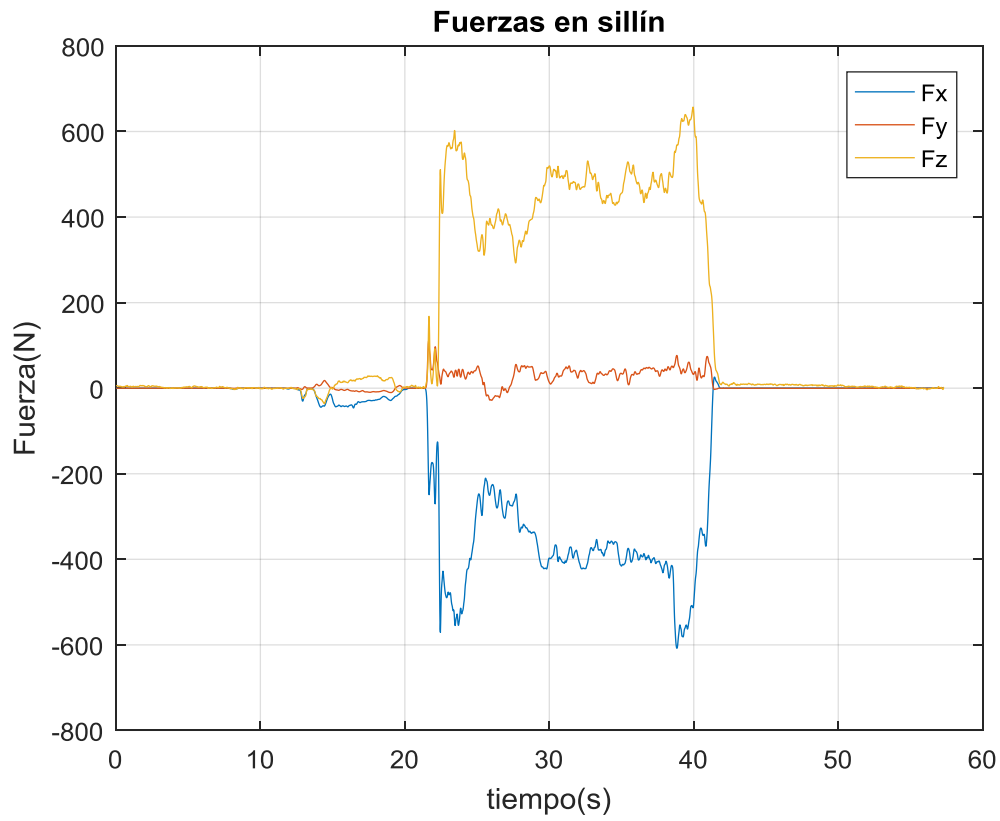


Figura 6-12. Fuerzas en sillín ciclista 2

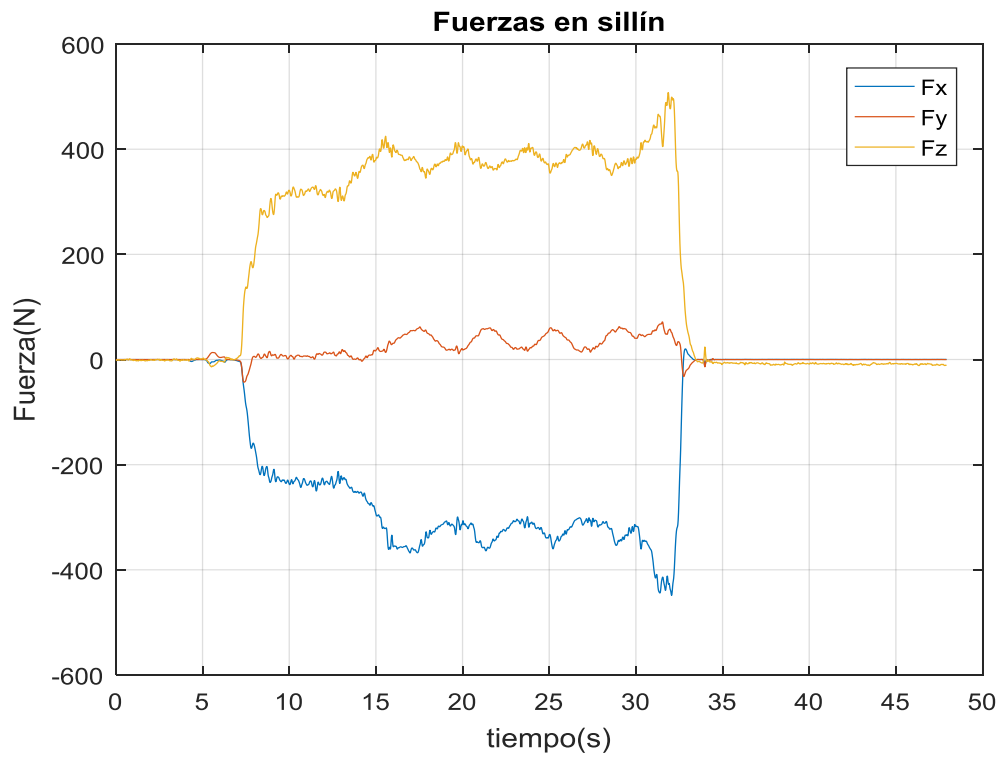


Figura 6-13. Fuerzas en sillín ciclista 3

Comenzando por la segunda de las 4 figuras (ilustración 6-11), los valores válidos de las fuerzas son los que se encuentran entre los segundos 12 y 22 aproximadamente, puesto que hasta llegar a los 12 segundos y a partir de los 22 segundos se producen la subida, acomodación y bajada del ciclista (por lo que no se está pedaleando durante esos segundos). Dicho esto hay que destacar que los valores máximos de fuerzas son las que van en dirección z fundamentalmente y las que van en dirección x, como era de esperar, puesto que los esfuerzos máximos a los que está sometido el tubo del sillín de la bicicleta son al esfuerzo axil (fundamentalmente por el peso del ciclista) así como al esfuerzo flector longitudinal (dirección del eje x), puesto que al realizarse el pedaleo bastante despacio y sin apenas vaivén hacia los lados, la contribución del esfuerzo flector en dirección y (lo cual se refleja en la Fy) es mucho menor que los otros dos (apenas llega a los 10 N). En cambio, la fuerza Fx oscila entre los 200 y 220 N, y la fuerza Fz (que es la máxima para este primer ciclista) oscila en torno a los 450 N aproximadamente durante el pedaleo. Por otra parte, hay que mencionar también que la fuerza Fx aparece en sentido negativo, lo cual puede deberse a que el ciclista iba apoyado más en la parte trasera del sillín y por consiguiente, la Fx se dirige en sentido negativo del eje x (según el sistema de referencia tomado en la ilustración 6-5). La fuerza Fz, por el contrario, aparece como positiva, lo cual tiene sentido puesto que se produce compresión sobre el sillín, y el eje z se encuentra dirigiéndose hacia abajo (aunque ligeramente inclinado).

Pasando a la ilustración 6-12, los valores máximos de fuerzas también se producen en las direcciones “z” y “x” respectivamente, como era de esperar (por los motivos previamente comentados para el caso del primer ciclista). Los valores máximos para este segundo ciclista son también los de la Fz (situados en torno a los 500 N aproximadamente). La fuerza Fx oscila para este ciclista entre los 350 y 400 N aproximadamente, y la fuerza Fy sigue siendo prácticamente nula. A diferencia del caso anterior, los valores válidos de fuerzas están comprendidos entre los segundos 30 y 38.

En lo que respecta a la figura 6-13, los valores de las fuerzas válidos son los situados entre los segundos 16 y 30 aproximadamente, siendo los máximos valores nuevamente las fuerzas en dirección “z” y “x”. La Fx alcanza valores que rondan los 350 N, la Fz alcanza los 400 N y la Fy continúa siendo muy pequeña en comparación de las otras dos.

Por último, con respecto a la medición estática (ilustración 6-10), la cual se ha realizado previamente a las mediciones dinámicas, se reincide de nuevo en que el valor máximo los alcanzan la Fz con 300 N aproximadamente y la Fx con 220 N, donde los valores válidos están situados entre los segundos 25 y 35. Cabe destacar que en este caso, al no producirse pedaleo del ciclista, no se aprecian los picos y valles propios del ciclo de pedaleo, es decir las fuerzas permanecen constantes a lo largo del tiempo, lo que sí se aprecia es el predominante valor de la fuerza Fz al igual que en todos los casos anteriores.

Para finalizar, es aconsejable llevar a cabo un giro del sistema de referencia seleccionado en la ilustración 6-5, con el objetivo de situar al eje x en horizontal y al eje z vertical, por lo que dicho giro se llevará a cabo alrededor del eje y. De esta forma, podremos observar si se producen fuerzas horizontales (Fx) antes de comenzar el ciclo de pedaleo, es decir, cuando el ciclista permanece quieto encima del sillín de la bicicleta. Para ello, no hay más que multiplicar las columnas de fuerzas en las direcciones x,y,z originales por una matriz de giro, de manera que ya tengamos las fuerzas buscadas en el sistema de referencia que queremos.

El ángulo a girar son 18 grados ($\alpha = 18 \frac{\pi}{180}$), y la matriz de giro (M) tiene la siguiente forma:

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

Los resultados de las fuerzas obtenidos multiplicando los valores previamente graficados por la matriz de giro (M), pasando por lo tanto Fx a ser horizontal y Fz completamente vertical son los siguientes:

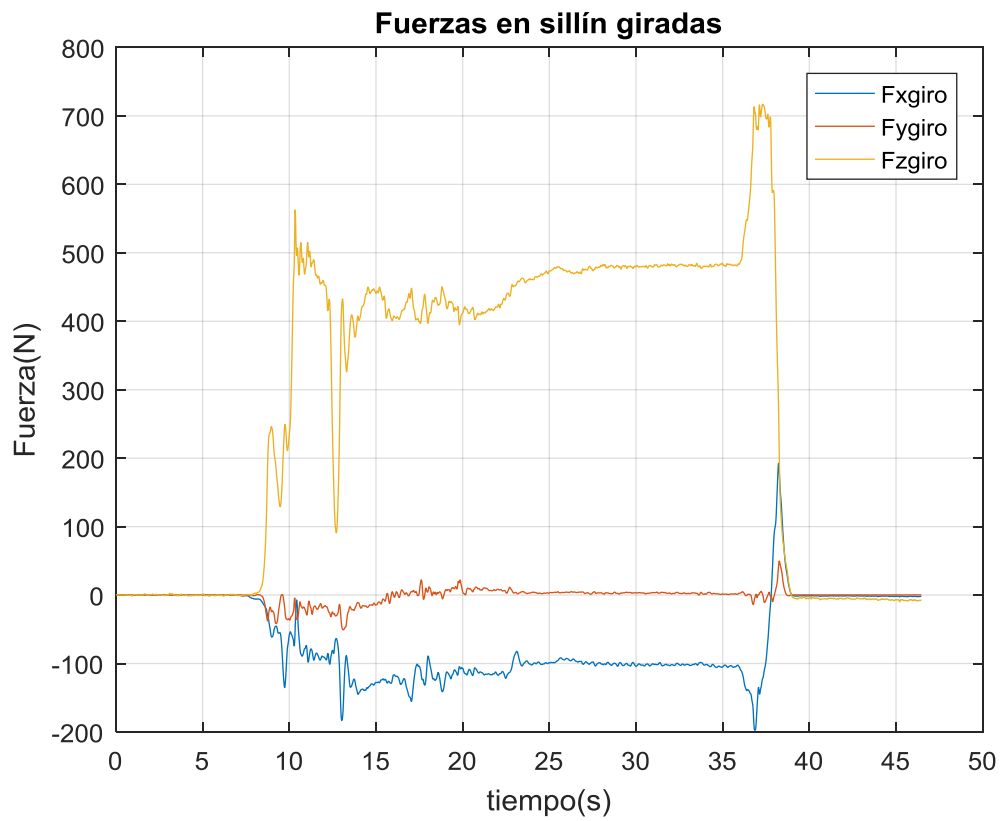


Figura 6-14. Fuerzas giradas en sillín medición estática

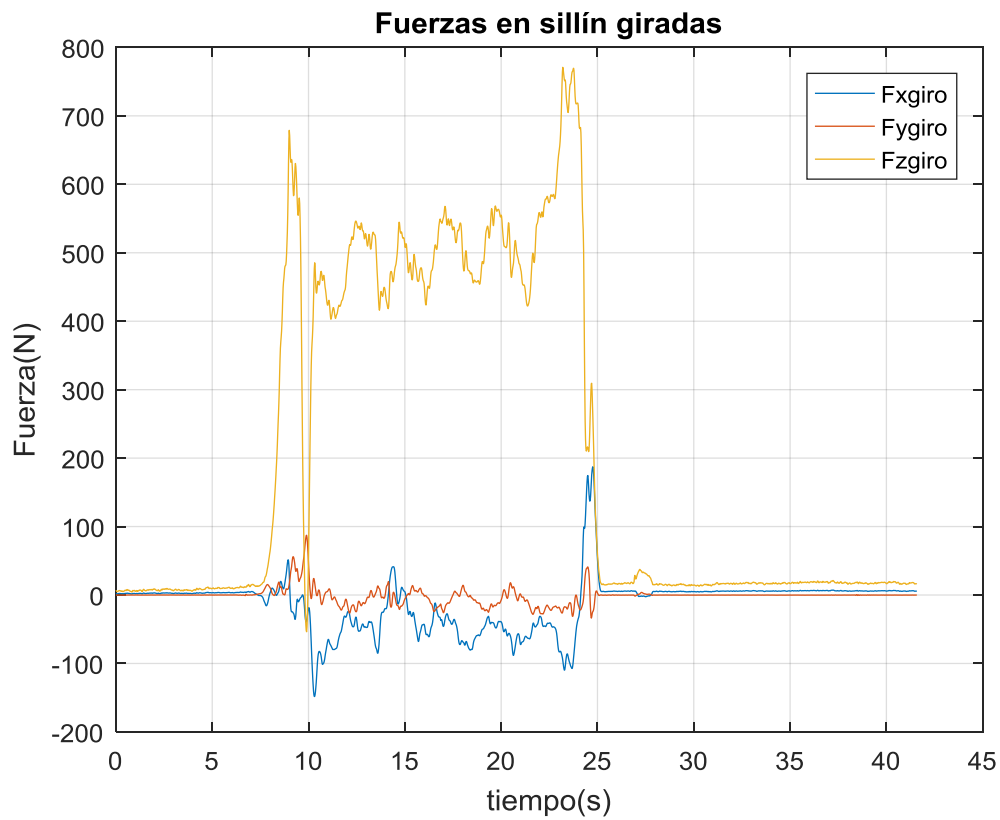


Figura 6-15. Fuerzas giradas en sillín ciclista 1

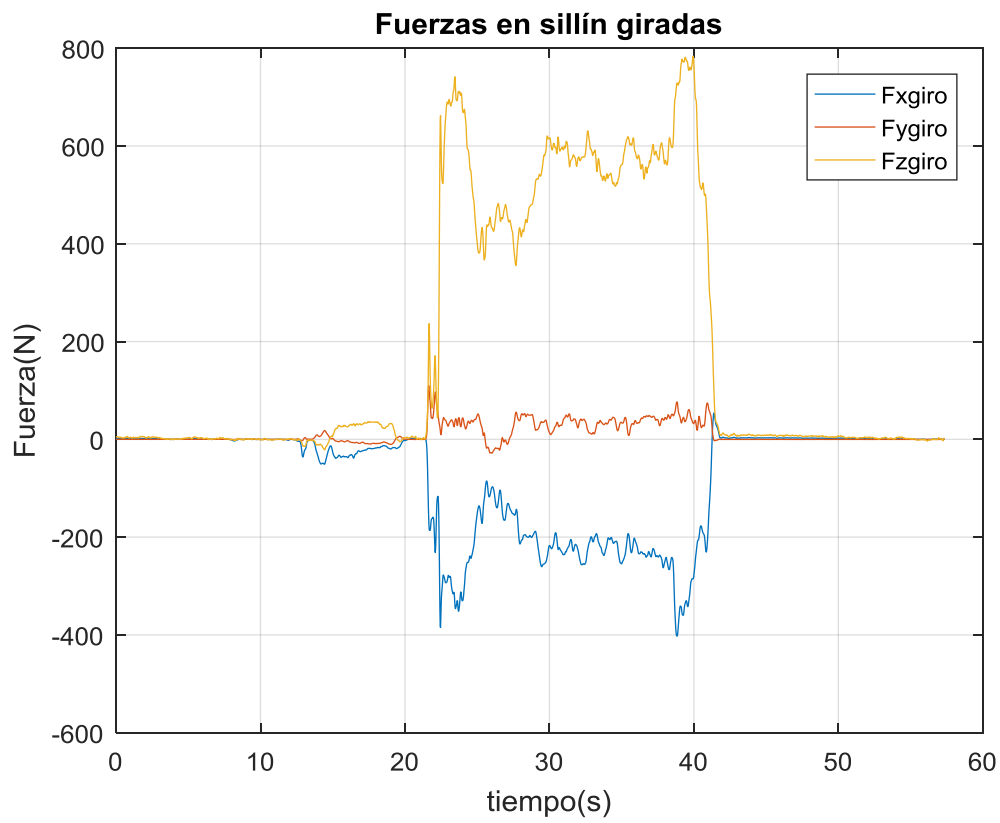


Figura 6-16. Fuerzas giradas en sillín ciclista 2

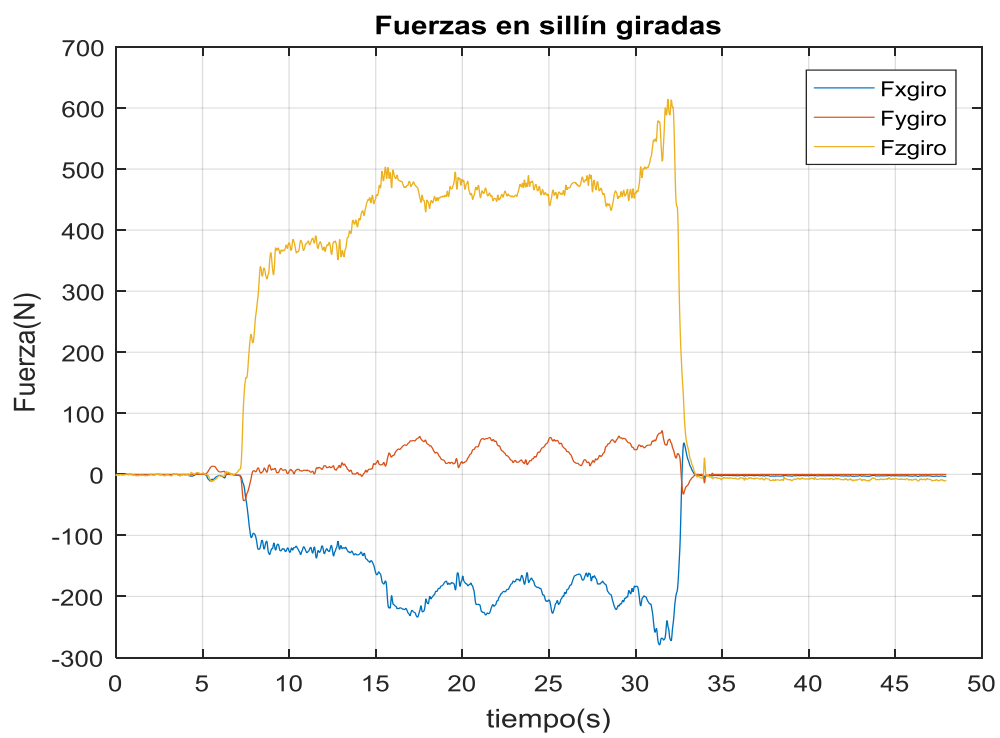


Figura 6-17. Fuerzas giradas en sillín ciclista 3

De forma genérica puede decirse que en cada una de las 4 gráficas, una vez realizado el giro para obtener las fuerzas en el sistema de referencia x-horizontal y z-vertical, se produce un aumento considerable de las fuerzas F_z y una disminución también considerable de las fuerzas en dirección x. Brevemente, en el caso del primer ciclista las F_z aumentan unos 50 N y las F_x disminuyen en torno a 150 N; para el segundo ciclista, las F_z aumentan unos 200 N y las F_x también disminuyen 200 N; en el caso del tercer ciclista las F_z aumentan 150 N y las F_x disminuyen también 150 N, y por último, en lo que respecta a la medición estática las fuerzas verticales aumentan 100 N y las horizontales disminuyen alrededor de 100 N. Ésto se debe a que absolutamente toda la contribución del peso de cada uno de los ciclistas va justamente en dirección vertical (z), y no se reparte nada en la dirección x, por lo tanto parece razonable que todas las fuerzas verticales F_z ya giradas sean mayores que las F_z ligeramente inclinadas (antes del giro). Asimismo, por la misma razón, antes de producirse el giro, parte del peso del ciclista contribuían en las fuerzas F_x , por lo tanto es lógico que las F_x antes de girarse sean mayores que las F_x después del giro, ya que en este último caso, tan solo contribuyen a dichas fuerzas la inercia del pedaleo del ciclista así como la contribución debida al apoyo del ciclista sobre la bicicleta (como aparece reflejado en la figura 6-14), donde a pesar de no estar en movimiento el ciclista se ve una contribución en dirección horizontal de la fuerza del orden de unos 100N. Además en el caso de la medición estática después del giro se observa un incremento de la fuerza vertical de unos 200 N con respecto a la medición sin modificar el sistema de referencia inicial. Por último, para el caso del tercer ciclista las fuerzas verticales aumentan unos 50 N y las horizontales disminuyen hasta 150 N en comparación con las fuerzas en el sistema de referencia sin ser girado.

7 CONCLUSIÓN

Este novedoso trabajo que acaba de desarrollarse, comenzando por el montaje adecuado de las galgas una vez se ha tenido claro el tipo, la ubicación y el número de galgas a colocar (justificado todo ello con base teórica), continuando por los ensayos mediante los cuales diferentes ciclistas se situaban sobre la bicicleta y comenzaban el ciclo de pedaleo (para el caso de la medición dinámica) y finalizando con la extracción de las microdeformaciones que se producían en dichas galgas por medio de un programa de adquisición de datos llamado “Quantum” para la obtención de las fuerzas buscadas en el sillín de la bicicleta mediante el uso de sistemas de ecuaciones basados en la resistencia de materiales (dichas ecuaciones están detalladas en el apartado 6-2).

En términos generales puede decirse que los resultados obtenidos en cuanto a las fuerzas sobre el sillín parecen bastante razonables, puesto que la máxima fuerza que se produce en el mismo es la fuerza vertical (debida al esfuerzo axial), puesto que es la dirección en la que se encuentra el peso de los ciclistas y es mucho más dominante que cualquier otra fuerza en otra dirección. Asimismo, también es lógico que la segunda fuerza más dominante (pero en mucha menor medida que la vertical) sea la fuerza horizontal F_x , motivada por la inercia que se produce durante el pedaleo en dirección longitudinal y también por el simple apoyo del ciclista sobre la bicicleta. Este último hecho aparece reflejado en los resultados de la medición estática una vez se gira el sistema de referencia inicial, al aparecer fuerzas en dicha dirección horizontal sin que se esté ejerciendo pedaleo sobre la bicicleta. En lo que concierne a las fuerzas en dirección “y”, debido a la ejecución del ensayo con un pedaleo bastante controlado y sin apenas movimiento de vaivén hacia los lados, éstas son muy poco apreciables (muy inferiores a las otras dos, especialmente a la vertical).

Para concluir, cabe destacar que a lo largo del desarrollo del procedimiento para el cálculo de las fuerzas se han asumido algunas limitaciones. Así, no se han tenido en cuenta la contribución de los esfuerzos cortantes ni tampoco la torsión, puesto que de haberse contemplado se habría incrementado la dificultad del trabajo sin tener una gran relevancia, porque estos esfuerzos son mucho menos dominantes que los que sí que se han considerado en el desarrollo. Además, de haberlos considerado se habría encarecido considerablemente el ensayo, puesto que deberían haberse comprado otro tipo de galgas. No obstante, la colocación de galgas para medir este tipo de esfuerzos quedan indicados brevemente en la sección 4-2-3, aunque quede fuera de nuestro objetivo.

Consecuentemente, de querer mejorarse este trabajo en un futuro podría llevarse a cabo considerando todos los esfuerzos posibles que se producen en el tubo, obteniendo unos resultados más exactos que los que aquí se desarrollan, e incluso considerando también el efecto de la temperatura (debiéndose por lo tanto hacer uso de las llamadas bandas compensadas térmicamente), ya que nuestros ensayos han sido ejecutados en un laboratorio en el que la temperatura prácticamente no varía.

REFERENCIAS

- [1] Federico París Carballo , «Teoría de la elasticidad,» 2000.
- [2] E.Blanco,S.Oller y Ll.Gil, «Análisis experimental de estructuras,» 2008.
- [3] Karl Hoffmann, «An introduction to Stress Analysis using Strain Gauges,» Federal Republic of Germany , 1989 .
- [4] G.De Bruyne, J.M.Aerts, D.Berckmans, «Efficiency of cycling pads in reducing seat pressure during cycling,» *Advances in intelligent systems and computing*, 777:38-47, 2018.
- [5] M.Menard, M.Domalain, «Influence of saddle setback on knee joint forces in cycling ,» *Sports Biomechanics*, p.1-13, 2018.
- [6] R.Bini,P.A.Hume,A.E.Kilding «Saddle height effects on pedal forces, joint mechanical work and kinematics of cyclists and triathletes,» *European Journal of Sport Science*, 14(1):44-52, 2014.
- [7] J.M.Drouet, Y.Champoux, «Development of a three-load component instrumented stem for road cycling,» *Procedia Engineering* , 34:502-507, 2012.