

EVALUACION RESISTENCIAL DE HORQUILLAS DE BICICLETAS DE USO PUBLICO MEDIANTE TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

D. Martinez Kraemer^a, G. Elvira^a, O. González^a, D. Russo^a, G. Lafogiannis^a, y C. Percich^a

^a Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica - Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Avenida General Paz 5445 - Buenos Aires - Argentina.

Email: mkraemer@inti.gov.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúan horquillas de acero rígidas y con suspensión.

Se presentan las dimensiones más comunes de los tubos empleados en velas y vainas, los desplazamientos y la rigidez estática para la carga del ensayo de fatiga, el peso promedio de las horquillas y su dispersión, las propiedades mecánicas de los tubos empleados en la fabricación de velas, los resultados correspondientes a los ensayos de impacto y fatiga, además de los tipos de fracturas más frecuentes. Adicionalmente, empleando la técnica de los elementos finitos, se determinaron los estados de tensión para aquellas configuraciones rígidas más comunes.

De los análisis realizados, las conclusiones principales indican que el 100% de las horquillas de acero rígidas de diámetro exterior de vaina 25,4mm, se fracturaron sobre la vaina misma durante los ensayos de fatiga, mientras aquellas de diámetro 28,5mm sólo se fracturaron el 33% siempre sobre la vela, en zonas próximas a su empalme con las vainas o en las marcas producidas por la matriz de expansión, en aquellas horquillas cuya vela presenta una expansión del tubo en la zona de empalme con las vainas.

Finalmente, los estudios por elementos finitos demuestran que la zona de rotura para vainas de 25,4mm de diámetro coincide con las obtenidas durante los ensayos de fatiga.

Palabras clave: bicicletas, horquillas, fatiga, fractura, elementos finitos.

INTRODUCCIÓN

La entrada en vigencia de la Resolución 220/03 de la Secretaría de Industria de Argentina, referida a la certificación obligatoria de requisitos de seguridad para bicicletas de uso público, significó para los laboratorios encargados de efectuar los ensayos, el desarrollo e implementación de una serie de casi cincuenta ensayos, muchos de ellos aplicados a la bicicleta completa, y otros, a componentes de las mismas. Entre estos últimos, la horquilla ocupa un rol preponderante, en lo que respecta a la seguridad del usuario.

La norma Iram 40020 [1], que tiene por objeto fijar los requisitos de seguridad en las bicicletas, establece para la evaluación de las horquillas tres tipos de ensayos, uno de fatiga de aplicación específica y dos de impacto, en los cuales se la valora en forma conjunta con el resto del cuadro.

Dada la casi absoluta falta de antecedentes regionales sobre el citado tema, se evalúan en este trabajo, los tipos de horquillas empleadas en el mercado argentino (Fundamentalmente horquillas de acero rígidas, y en menor proporción horquillas con suspensión), con el objeto de: presentar las geometrías más comunes de los tubos empleados para la fabricación de velas y vainas de horquillas, el peso promedio y su dispersión, los desplazamientos y las rigideces estáticas obtenidas para la carga del ensayo de fatiga, las propiedades mecánicas de los tubos empleados en la fabricación de velas, el estado de tensión obtenido por la técnica de elementos finitos para las dos configuraciones más habituales de horquillas de acero y los resultados estadísticos correspondientes a los ensayos de impacto y fatiga.

La información desarrollada permitirá precisar pautas de diseño para el desarrollo de equipos de ensayo, inferir que tipo de tubos son aptos para el empleo en la fabricación de horquillas de bicicletas, proporcionar datos sobre el comportamiento resistencial a los fabricantes de horquillas e individualizar los tipos más comunes de fallas y las causas que las provocan.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales y procesos

Para la realización de los ensayos involucrados en el presente trabajo, se emplearon veinte horquillas de acero rígidas (8 con vainas $\phi 25,4 \times 1,2$ mm y 12 con vainas $\phi 28,5 \times 1,2$ mm), y cinco horquillas con suspensión correspondientes a bicicletas de distintas procedencias (Fabricantes-ensambladores) y tipos.

Para determinar las dimensiones de las horquillas se utilizó un calibre digital NSK, el peso se controló con una balanza digital Metler mientras para la carga del ensayo de desplazamiento se usó una balanza digital Moretti, para la medición de los desplazamientos un comparador mecánico Tesa, los tubos de vela fueron ensayados en una máquina de tracción Shimadzu UH-1000 KNA, los ensayos de fatiga fueron realizados en una máquina mecánica Turner Bros, la distancia entrecentros en el ensayo de impacto con una regla metálica Diamante y para el cálculo se utilizó el programa de elementos finitos ANSYS (Versión 9.0).

Muestra

Las partes, geometría y dimensiones generales de las horquillas de acero evaluadas son las indicadas en la Figura 1.

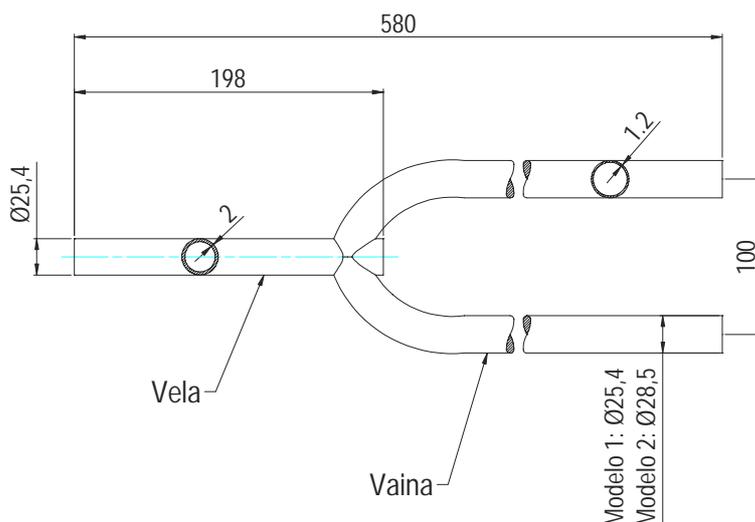


Figura 1. Esquema correspondiente a los tipos de horquillas analizadas.

En la Tabla I se presentan las dimensiones nominales de las horquillas de acero más comúnmente empleadas en bicicletas de uso público (De ahora en más se las denominará modelo 1 y modelo 2).

Tabla I –Diámetros y espesores nominales de las horquillas evaluadas

Modelo	Vela		Vaina	
	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)
1	25,4	2	25,4	1,2
2	25,4	2	28,5	1,2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desplazamientos y Rigidez estática

Se entiende por desplazamiento δ medido en mm, al corrimiento que produce una carga aplicada al extremo de las vainas de la horquilla, medido en la dirección de aplicación de dicha carga, mientras la horquilla se encuentra empotrada por la vela, en un dispositivo que reproduce el caño frontal del cuadro.

Como resultado del mismo ensayo, se puede calcular la rigidez estática K medida en N/mm, entendiéndose por ello, a la relación existente entre la carga aplicada al extremo de las vainas y el desplazamiento δ que esta carga produce.

Para la determinación del desplazamiento experimental δ_{exp} . se empleó la carga de ensayo indicada por la norma IRAM 40020 correspondiente al ensayo de fatiga de la horquilla (Ensayo 2.5.2, 440N), y se emplearon horquillas de acero rígidas, cuyas vainas están fabricadas a partir de tubos de $\phi 28,5 \times 1,2$ mm.

Para el cálculo del desplazamiento teórico δ_t se emplearon los resultados arrojados por la simulación numérica mediante la técnica de los elementos finitos para el modelo 2.

En la tabla II se indican los valores del desplazamiento experimental δ_{exp} . promedio con su correspondiente dispersión porcentual $2*\sigma$, el desplazamiento teórico δ_t (Considerando un voladizo promedio de 415mm), la rigidez estática experimental K_{exp} y la rigidez estática teórica K_t , para horquillas de acero rígidas y con suspensión.

Tabla II – Desplazamientos y rigideces estáticas para diferentes tipos de horquillas

Tipo horquilla	$\delta_{exp.}$ (mm)	$2*\sigma$ (%)	δ_t (mm)	$K_{exp.}$ (N/mm)	K_t (N/mm)
Rígida	4,8	± 23	5,8	91,7	75,9
Con suspensión	7,1	± 23	-----	62,0	-----

Los resultados experimentales del desplazamiento indican una dispersión similar para ambos tipos de horquillas. Además, las horquillas de acero con suspensión alcanzaron en promedio un 48% más de desplazamiento que aquellas rígidas, mientras para la rigidez estática, se verifica la relación inversa.

Respecto de los resultados teóricos, se debe destacar que al no modelizar la presencia de material aportado por soldadura en la unión vela-vainas, se produce una unión menos rígida que conduce a un desplazamiento teórico mayor (5,8mm) que el experimental promedio (4,8mm).

Peso

Se pesaron mediante una balanza de precisión, las horquillas de acero con suspensión y aquellas rígidas cuyas vainas responden a un tubo de dimensiones nominales $\phi 28,5 \times 1,2$ mm.

En la tabla III se muestran los pesos promedios en mN y su correspondiente dispersión porcentual $2*\sigma$, para horquillas de acero rígidas y con suspensión.

Tabla III – Pesos promedios para diferentes tipos de horquillas

Tipo de horquilla	Peso promedio (mN)	$2*\sigma$ (%)
Rígida	9270	± 5
Con suspensión	19930	± 9

Del análisis de los resultados se desprende que las pequeñas diferencias existentes se deben a variaciones en la longitud total de las horquillas y a las diferentes formas empleadas para la realización de los extremos de vainas, y que las horquillas con suspensión presentan un peso en promedio 115% mayor que las horquillas rígidas.

Resistencia de tubos de vela

Los tubos empleados en Argentina para la fabricación de horquillas de bicicletas responden a la norma IRAM-IAS U500-2592 [2], normalmente bajo la denominación TE-20. Dicha norma establece el límite de fluencia (R_e) mínima para estos tubos en 228Mpa y la Resistencia a la tracción (R_m) mínima en 310 Mpa.

A los efectos de comprobar el cumplimiento de estos valores mínimos para los tubos empleados en la fabricación de velas de horquilla y fijar las propiedades mecánicas empleadas en los modelos de elementos finitos, se realizaron ensayos de tracción según la norma IRAM-IAS U500-102 Parte IV [3]. En la tabla IV se presentan los valores experimentales promedio correspondientes a los límite de fluencia R_e y de resistencia a la tracción R_m para muestras obtenidas a partir de 4 tubos diferentes seleccionados al azar.

Tabla IV – Valores experimentales de resistencia para tubos de vela de horquillas

Dimensiones de tubo de vela (mm)	R_e (MPa)	R_m (MPa)
$\phi 25,4 \times 2$	311,2	320

La comparación de los resultados con los valores mínimos de la norma IRAM-IAS U500-2592 indican el cumplimiento de los valores mínimos allí establecidos.

Ensayo de fatiga de horquilla

Con la horquilla en condición terminada, se la fija a un dispositivo soporte que simula el caño frontal del cuadro. Una fuerza alternativa de 440N se aplica en el plano de la rueda y perpendicular al caño del portamanubrio, durante 50.000 ciclos, a una frecuencia de ciclado aproximada de 2 Hz, no debiéndose producir fisuras ni fracturas (Ensayo 2.5.2) [1]. En las Figs. 2, 3, 4 y 5 se presentan las fracturas y fisuras más comunes de horquillas rígidas correspondientes a los dos modelos planteados.



Figura 2. Fractura sobre vaina $\phi 25,4 \times 1,2$ mm.



Figura 3. Fractura sobre soldadura en vela $\phi 25,4 \times 2$ mm



Figura 4. Fractura marca expansión vela $\phi 25,4 \times 2$ mm.



Figura 5. Fisura sobre vela $\phi 25,4 \times 2$ mm.

De aquellas horquillas rígidas de acero ensayadas a fatiga, cuyas vainas fueron de $\phi 25,4 \times 1,2$ mm, se fracturaron en zonas próximas a la de la Fig.2 el 100% de las muestras ensayadas. En otro grupo, cuyas vainas fueron de $\phi 28,5 \times 1,2$ mm no ocurrieron fracturas sobre las vainas. Sólo en el 33%, se produjeron fracturas sobre las velas como las observadas en Figs. 3 y 4.

En las horquillas de acero con suspensión ensayadas, no se produjeron fisuras ni fracturas.

Una revisión de la literatura referida a fallas en horquillas, pone en evidencia que estas fracturas sobre las vainas son una causa común de serios accidentes para los usuarios [4,5].

Ensayos de impacto

La norma IRAM 40020 contempla dos tipos de ensayos dinámicos aplicados al conjunto horquilla-cuadro, los denominados 1) Impacto de masa (Ensayo 2.4.1), en el que el conjunto anterior montado en posición vertical, recibe sobre el extremo de horquilla una masa de 225N desde una altura de 180mm, no debiendo variar la distancia entrecentros de ruedas en más de 40mm ni producirse fisuras en las partes y 2) Impacto del conjunto cuadro-horquilla (Ensayo 2.4.2), en el cual, con el conjunto con capacidad para rotar por el eje trasero, y con una carga de 700N fijada al caño de asiento, se lo deja caer desde una posición tal que el centro de gravedad de dicha masa quede sobre la vertical del punto de rotación. Realizado el ensayo, las partes no deben presentar fisuras ni fracturas.

En la tabla V se presentan los resultados correspondientes a las deformaciones permanentes δ_p promedio para aquellos sistemas horquilla-cuadro sometidos al ensayo de impacto de masa, distinguiendo entre aquellos sistemas cuyas horquillas fueron de acero rígidas y con suspensión.

Tabla V – Deformación permanente δ_p en ensayos de impacto de masa

Tipo de horquilla	δ_p promedio (mm)	$2*\sigma$ (%)	δ admisible (mm)
Rígida	10	± 24	40
Con suspensión	3,5	± 74	40

Los resultados de los ensayos de impacto indican que en ningún caso se produjeron fisuras y/o fracturas en los componentes ensayados. Además, como era previsible, los sistemas con horquillas rígidas presentaron una deformación permanente de un 186% mayor que aquellos con horquillas con suspensión, y los valores δ_p obtenidos se encuentran por debajo del 31% de la deformación permanente máxima admisible.

Simulación numérica

Las propiedades físicas del material, adoptadas en nuestro estudio, fueron las correspondientes a un acero de bajo carbono. Son las siguientes:

Módulo de elasticidad, [MPa]:	210000
Coefficiente de Poisson:	0,3
Límite de fluencia [MPa]:	311

El análisis está basado en hipótesis de linealidad física (material elástico y lineal), lo cual no nos permite representar deformaciones plásticas, y linealidad geométrica (pequeños desplazamientos y deformaciones).

Un modelo de cáscara tridimensional fue utilizado para determinar las tensiones originadas por el estado de carga normalizado analizado (440N aplicados en el extremo de las vainas, en el plano de la rueda y perpendicular al caño del portamanubrio, con el caño de vela empotrado).

En la Figura 6 se presenta una vista del modelo de elementos finitos utilizado durante el análisis.

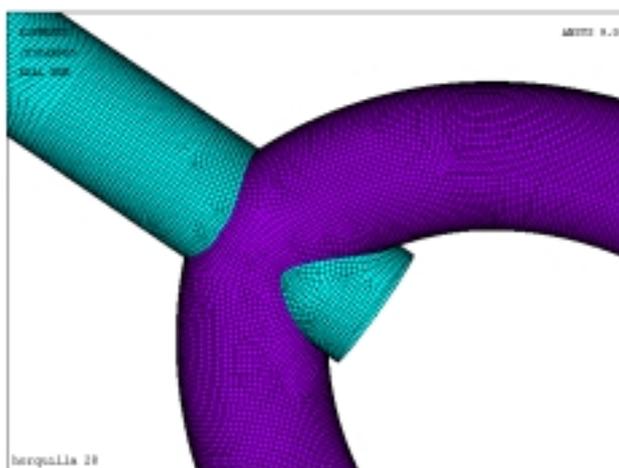


Figura 6 – Modelo de Elementos Finitos

Para el modelado se utilizó el elemento de cáscara de 8 nodos (SHELL93). Estos elementos tienen capacidad de tomar esfuerzos de membrana, de corte y flexión. La cinemática de la cáscara queda definida por los desplazamientos y los giros de los nodos en los tres ejes (UX, UY, UZ, RX, RY y RZ).

En la tabla VI se muestran las características de las mallas de elementos finitos, las cuales permitieron modelar en muy buen grado la geometría del componente.

Tabla VI – Características de las mallas de elementos finitos

Modelo	Nodos	Elementos
1	62880	20895
2	64856	39716

En las Fig.7, se presentan los mapas de tensiones más desfavorables, obtenidas en la simulación para ambos modelos de horquillas, en las caras interiores de los tubos.

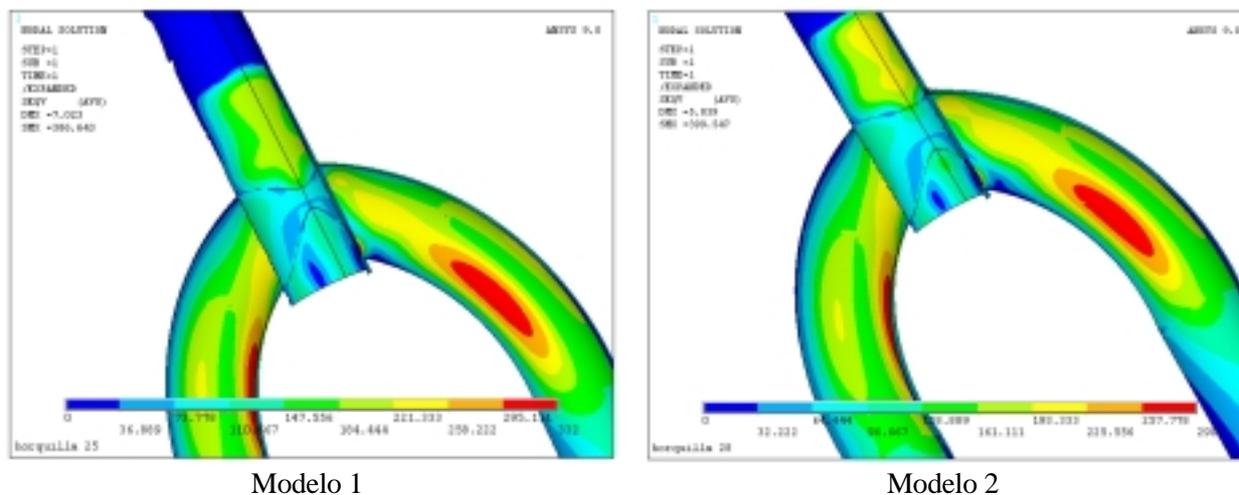


Figura 7. Tensiones de Von Mises (MPa) en caras interiores

Si bien los cálculos realizados corresponden a un análisis estático lineal, la existencia de zonas de las horquillas modeladas con valores de tensión superiores al límite de fluencia del material demuestran la posible aparición de fallas por fisura y/o fractura durante los ensayos experimentales de fatiga. Los mapas de tensiones obtenidos muestran que aquellas zonas más comprometidas (Zonas coloreadas en rojo) en las vainas de $\phi 25,4 \times 1,2\text{mm}$ están sometidas a tensiones en el rango de 295 a 332MPa (Similares y superiores al límite de fluencia del material del caño), mientras aquellas de $\phi 28,5 \times 1,2\text{mm}$ están sujetas a tensiones en el rango de 257 a 290 MPa (Inferiores al límite de fluencia).

Finalmente, cabe destacar que los estados de tensión obtenidos para la zona de unión vela-vainas no deben ser tenidos en cuenta, por cuanto allí hay un exceso de material (Cordón de soldadura), que no ha sido considerado durante el modelado.

CONCLUSIONES

1. Dados los resultados de los ensayos de fatiga, comprobados por la técnica de los elementos finitos, el tubo de acero de $\phi 25,4 \times 1,2\text{mm}$ empleado para la fabricación de vainas de horquillas no es apto para tal destino.
2. La técnica de los elementos finitos ha permitido reproducir con precisión la zona de falla observada en los ensayos experimentales de fatiga (Zona curva de vaina próxima a su empalme por soldadura con la vela) en aquellas horquillas cuyas vainas fueron tubos de acero de $\phi 25,4 \times 1,2\text{mm}$, estableciendo valores de tensión superiores a la fluencia (311 MPa), las que en un proceso de carga alternativa conducirán a la rotura del componente. Dada la hipótesis de comportamiento elástico de la simulación, no se pueden describir las tensiones superiores a la fluencia.
3. Cuando la horquilla está formada por tubos de vaina de acero de $\phi 28,5 \times 1,2\text{mm}$, la falla, en caso de producirse, ocurre indefectiblemente sobre el tubo de la vela.
4. Para aquellas horquillas que presentan una expansión del tubo de vela (ver fig.4), se deben minimizar las marcas producidas por la matriz de expansión, redondeando los fillos de la matriz que originan dichas marcas sobre el tubo.

REFERENCIAS

1. IRAM 40020, Bicicletas, Requisitos de seguridad, Diciembre 1997 (*norma*)
2. IRAM-IAS U500-2592, Tubos de acero al carbono para uso estructural, Abril 2002 (*norma*)
3. IRAM-IAS U500-102 Parte IV, Caños y tubos de acero, Método de ensayo de tracción, Junio de 1987 (*norma*)
4. Shelton H., Sullivan J. O., Gall K., Analysis of the fatigue failure of a mountain bike front shock, Engineering Failure Analysis, June 2003 (*paper*)
5. Kieselbach R., Curious cases of failure, Engineering Failure Analysis, November 2003 (*paper*)