

Cálculo de estructuras para semirremolques de pasajeros de grandes dimensiones

L Otero Pereiro, C. Novo Soto, M. Fernández Salgado

Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería Mecánica,
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*, La Habana 19390, Cuba.
E-mail: mecanica@cujae.ispjae.edu.cu

(Recibido el 5 de mayo de 1997; aceptado el 19 de junio de 1997)

Resumen

El Método de Elementos Finitos desarrollado hasta la actualidad es un poderoso sistema de cálculo computarizado empleado en el análisis de tensiones y deformaciones de sólidos y estructuras y mucha literatura ha sido publicada sobre él como método de cálculo,

La necesidad de resolver los problemas de la transportación de pasajeros, principalmente en Ciudad Habana, en las difíciles condiciones del período especial, condujo al desarrollo de un semirremolque con las características necesarias para cumplir esta función, el cual por sus atributos constituye el único en su género para esta finalidad.

Es, por tanto, la primera vez que en nuestro país se realiza el cálculo de una estructura reticulada integral autoportante de semejante magnitud, con resultados concretos satisfactorios.

Se aborda la creación de un modelo fisico-matemático que simula la estructura real, acondicionado a las limitaciones del programa de cálculo, brindando un comportamiento similar en los esfuerzos y deformaciones que se producen, con un estudio de las diferentes variantes de resultados.

En el trabajo se obtienen algunos resultados sobre las posibles consecuencias que puede acarrear la realización del cálculo de la estructura completa o separándola por secciones, siendo necesario el establecimiento de una metodología para la definición de aquellas secciones que pueden ser analizadas por separado, así como el orden de importancia de este análisis.

Se realizó la Determinación experimental del coeficiente de carga dinámica, así como el Establecimiento del modelo fisico-matemático adecuado para el cálculo de la estructura del semirremolque de pasajeros aplicando el Método de los Elementos Finitos.

Efectuar ensayos a carga estática del bastidor para corroborar la validez del modelo fisico-matemático de la estructura.

Proponer una solución técnica dentro de las posibilidades tecnológicas de la empresa constructora para evitar la rotura de la estructura del equipo.

1. Ensayos Dinámicos de la Estructura.

Para la validación del modelo físico - matemático se efectuaron ensayos tensométricos, con empleo de la extensometría eléctrica.

En la ejecución de los experimentos existen dos aspectos fundamentales que deben definirse, pues son de primera importancia para la realización de los cálculos en el modelo físico matemático.

1.- Determinación de los esfuerzos que se generan en los puntos de la estructura por donde se produce la rotura, precisando aquel donde estos sean mayores

2.- Determinar el coeficiente de carga dinámica para evaluar el modelo físico - matemático de la estructura.

Se ubicaron los extensómetros formando el puente de Wheatstone, haciéndose las conexiones para realizar las mediciones a puente completo. Cada uno de ellos de 120 Ω , 5 mm de longitud y factor 2,12. De esta forma pudieron realizarse mediciones en el sentido longitudinal (plano que contiene a la estructura) y en sentido transversal.

La calibración de los extensómetros fue de 1000 $\mu\epsilon$ -4 VOLTS en los canales 4,7,9,10,11 y 12 y de 1000 $\mu\epsilon$ -2 VOLTS en los canales 5,6 y 8 en el plano longitudinal y de 200 $\mu\epsilon$ -2 VOLTS del 4 al 9 y del 11 al 12 y de 200 $\mu\epsilon$ -1 VOLT en el canal 10 para el plano transversal.

En el sistema de medición se empleó un amplificador múltiple KIOWA modelo DPM 602B de 14 canales con una

fuerza incorporada que suministra la alimentación al puente de Wheatstone con un voltaje alterno seleccionable de 2 a 5 volts a una frecuencia de 5 kHz, que actúa como portadora de la señal que será modulada por el puente.

El sistema incluye un registrador magnético KIOWA modelo RPT-600B que recibe la señal del amplificador y la grava en un cassette de cinta magnética en hasta 14 canales, conservando un canal de audio para la grabación de la descripción de los eventos.

Los registros de las pruebas realizadas son transmitidos a la computadora con empleo de una tarjeta análogo digital y la información procesada por un programa de computación para obtener los registros en el tiempo de las deformaciones en microstrain ($\mu\epsilon$)

En el análisis de las mediciones se detectó que los mayores esfuerzos se producían en el punto de medición coincidente con el inicio de la rotura, en el plano longitudinal.

Como resultado de estas mediciones pudo determinarse el coeficiente de carga dinámica para emplearlo en el cálculo del modelo físico-matemático,

Como las mediciones son realizadas en $\mu\epsilon$ (microstrain) se puede plantear:

$$\epsilon = \mu\epsilon / n \cdot 10^6 \quad [4.12]$$

$$\sigma = E (\mu\epsilon / n \cdot 10^6) \quad [4.13]$$

$$\sigma = 0,0505 \mu\epsilon \text{ [M Pa]} \quad [4.14]$$

n número de extensómetros activos

Para la determinación del coeficiente de carga dinámica se efectuó la planificación de un experimento, como el procedimiento de selección del número de condiciones de realización de las pruebas necesarias y suficientes para la solución del problema planteado, con la exactitud requerida; definiéndose:

a).- Elementos que definen el objeto de investigación y lo hacen comportarse de determinada manera. (x)

- Carga sobre el semirremolque (P)
- Velocidad de movimiento (v)
- Estado de la vía (v)

b).- Elementos que son respuesta del desarrollo del proceso (y)

- Deformación en $\mu\epsilon$, obtenida en el punto de medición donde los esfuerzos sean mayores (ϵ)

Empleando un experimento factorial completo donde el número de pruebas es igual a los diferentes puntos del espacio factorial $n=2^3$, la matriz del experimento quedará planteada como:

Tabla 1. Matriz del experimento

| P | v | v |
|---|---|---|
| + | + | + |
| - | + | + |
| + | - | + |
| - | - | + |
| + | + | - |
| - | + | - |
| + | - | - |
| - | - | - |

Se empleará un modelo potencial, razón por la cual no tiene sentido plantear los niveles mínimos como cero en el desarrollo del experimento, además de que físicamente no es totalmente real, pues no habría solución para los niveles mínimos de los factores, razón por la cual se decidió tomar la unidad como valor para P y v, pues además son despreciables respecto a los máximos.

En el caso de la vía (V) se tomó una escala entre uno y cien para baches entre cero y diez centímetros, de forma tal que pueda, posteriormente, hacerse una determinación de la deformación en dependencia de la profundidad de este, siempre que la expresión que se obtenga de la experimentación para la evaluación así lo refleje.

En la tabla 2 se muestran los ocho experimentos realizados así como la codificación de cada uno de los factores (x_i) y el valor promedio de la medición de las deformaciones en el pto. de medición(ϵ)

Tabla 2. Experimentos realizados, codificación de cada uno de los factores (x_i) y valor promedio de la medición de las deformaciones en el pto. de medición(ϵ)

| Exp | Cod | x_1 | Cod | x_2 | Cod | x_3 | ϵ_{prom} | ln ϵ |
|-----|-----|---------------|-----|-----------|-----|------------|-------------------|---------------|
| 1 | + | 189000 | + | 45 | + | 100 | 2124 | |
| 2 | - | 1 | + | 45 | + | 100 | 1020,67 | |
| 3 | + | 189000 | - | 1 | + | 100 | 1285 | |
| 4 | - | 1 | - | 1 | + | 100 | 220 | |
| 5 | + | 189000 | + | 45 | - | 1 | 2502 | |
| 6 | - | 1 | + | 45 | - | 1 | 1084 | |
| 7 | + | 189000 | - | 1 | - | 1 | 1658.33 | |
| 8 | - | 1 | - | 1 | - | 1 | 541 | |

Modelo empleado para el experimento

$$\varepsilon = C_0 P^a v^b V^c \quad [4.15]$$

$$\ln \varepsilon = \ln C_0 + a \ln P + b \ln v + c \ln V \quad [4.16]$$

$$\ln \varepsilon = y$$

$$a = b_1 \quad b = b_2$$

$$c = b_3$$

$$\ln C_0 = b_0$$

$$P = x_1 \quad v = x_2$$

$$V = x_3$$

$$y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + b_3 \ln x_3 \quad [4.17]$$

Se designó

$$P_{\max} = 18.9 \text{ [kN]}$$

$$v = 45 \text{ Km / hrs}$$

Codificando los factores:

Tabla 3. Codificación de factores

| | x_1 | $\ln x_1$ | x_2 | $\ln x_2$ | x_3 | $\ln x_3$ |
|----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| Sup (+1) | 189E3 | 12,15 | 45 | 3,81 | 100 | 4,61 |
| Inf (-1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

$$x_1 = 0,16 \ln x_1 - 1$$

$$x_2 = 0,52 \ln x_2 - 1$$

$$x_3 = 0,43 \ln x_3 - 1$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{13} x_1 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad [4.18]$$

Tabla 4. Valores de las deformaciones para cada una de las réplicas

| No.Exp | ε^1 | $\ln \varepsilon^1$ | ε^2 | $\ln \varepsilon^2$ | ε^3 | $\ln \varepsilon^3$ |
|--------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | 2212 | 7,70 | 2014 | 7,61 | 2146 | 7,67 |
| 2 | 1052 | 6,96 | 990 | 6,90 | 1020 | 6,93 |
| 3 | 1197 | 7,09 | 1368 | 7,22 | 1290 | 7,16 |
| 4 | 220 | 5,39 | 220 | 5,39 | 220 | 5,39 |
| 5 | 2502 | 7,82 | 2502 | 7,82 | 2502 | 7,82 |
| 6 | 1080 | 6,98 | 1088 | 6,99 | 1084 | 6,99 |
| 7 | 1727 | 7,45 | 1594 | 7,37 | 1654 | 7,41 |
| 8 | 537 | 6,29 | 545 | 6,37 | 541 | 6,29 |

$$b_i = \frac{\sum (x_i y_i)}{N}$$

Tabla 5. Coeficientes de correlación.

| b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} | b_{23} | b_{13} | b_{123} |
|--------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| 6,9563 | 0,5563 | 0,3938 | -0,1713 | -0,1663 | 0,1163 | 0,0688 | -0,0938 |

Sustituyendo los coeficientes en la ecuación [4.18].

$$y = 6,9563 + 0,5563x_1 + 0,3938x_2 - 0,1713x_3 - 0,1663x_1x_2 + 0,1163x_2x_3 + 0,0688x_1x_3 - 0,0938x_1x_2x_3$$

$$S^2 \{y\} = \frac{\sum_{v=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{vj} - y_v)^2}{N(r-1)} \quad [4.19]$$

- Determinación de la dispersión de reproducción de los experimentos

- v--orden o número del experimento
- j--orden de repetición

- N--número de experimentos
- r---número de réplicas

Resolviendo se obtiene:

$$S_v = \sum_{v=1}^N \sum_{j=1}^r = 0,0179$$

$$S^2\{y\} = 0,0011$$

$$S\{y\} \pm 0,033$$

Verificación de la homogeneidad de la dispersión según el criterio de Cochran

$$G = \frac{S_v^2 \max}{S_v^2} = 0,2737 \quad [4.20]$$

para los grados de libertad

$$f_{v \max} = r-1 \quad [4.21]$$

$$f_v = N = 8 \quad [4.22]$$

$\alpha = 5\%$ de error

según tabla ^{36,69} :

$$G_{cr} = 0,5157$$

como $G < G_{cr}$ se acepta la hipótesis

-. Verificación de la significatividad de los coeficientes:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{N(r)} = 4,58 \times 10^{-5} \quad [4.23]$$

$$S\{b_i\} = \pm 6,77 \times 10^{-3}$$

$$\text{para } f_e = N(r-1) = 16 \quad [4.24]$$

$$\alpha = 5\%$$

el valor crítico de t de student es $t_{cr} = 2,12$

La mitad de la longitud del intervalo preponderante es:

$$\Delta b_i = t_{cr} S\{b_i\} = 0,0144 \quad [4.25]$$

El coeficiente es significativo si se cumple la condición:

$$\Delta b_i \leq |b_i| \quad [4.26]$$

Aún cuando se obtuvo que todos los coeficientes eran significativos se despreciaron aquellos de menor nivel de significación tales como b_{13} y b_{123} , verificándose la adecuación de tal modelo según el criterio de Fisher, más el problema a resolver posee tal grado de complejidad que se comprobó la imposibilidad de emplear un modelo que no contara con todos los coeficientes de regresión.

Como el modelo empleado posee todos los coeficientes no es necesario verificar su adecuación

Pueden ahora sustituirse en la ecuación [4.16] los coeficientes de correlación y las variables codificadas para obtener la expresión a partir de la cual se determinen las deformaciones para diferentes condiciones de carga, velocidad y vía.

La expresión obtenida es:

$$\varepsilon = 539.2071(a)(b) \quad [4.27]$$

donde:

$$a = \frac{P^{0.0896} * v^{0.182 + \ln \frac{V^{0.047}}{P^{0.006}}}}{V^{0.1936}} \quad [4.27-a]$$

$$b = P(\ln V^{0.0112} - (\ln V \ln v)^{0.0034}) \quad [4.27-b]$$

Empleando esta expresión se obtiene:

$$\varepsilon_{est} \text{ (vía mala)} = 1314,58 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_{est} \text{ (vía buena)} = 539.21 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_{din} \text{ (máxima carga y vía mala)} = 2471,44$$

Según estos resultados puede concluirse del experimento que:

- La deformación máxima obtenida al evaluar la expresión es de 2471,44 $\mu\varepsilon$ lo cual representa un error respecto a las mediciones realizadas de 1,22%, lo que se considera aceptable al estar por debajo del 5%.
- La deformación estática a máxima carga evaluada en la expresión es de 1314,58 $\mu\varepsilon$.
- El coeficiente de carga dinámica evaluado a partir de los resultados obtenidos en a) y b) es de 1,88

Para comprobar la exactitud de este se evaluará el coeficiente de carga dinámica con los valores obtenidos en las mediciones tensométricas, para el punto de medición

donde estos fueron mayores, los que se muestran en la tabla 6

Tabla 6. Mediciones tensométricas

| MEDIC. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | PROM. |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| ε [me] | 1197 | 942 | 1371 | 1180 | 1670 | 998 | 1226,33 |
| σ [MPa] | 60,45 | 47,57 | 69,24 | 59,59 | 84,34 | 50,40 | 61,93 |

Se realizó el procesamiento estadístico de estos resultados para determinar los límites máximos y mínimo del coeficiente de carga dinámica aplicando la distribución t de student para un intervalo de confianza del 95%.

Empleando ecuaciones similares a [4.9] y [4.10]

$$k_d = \bar{k}_d \pm t_{0,95} S_{\bar{k}_d} \quad [4.28]$$

para :

$$t_{0,95} = 2,02$$

$$k_d = 2,04 \pm 0,19$$

$$k_{d\max} = 2,23$$

$$k_{d\min} = 1,85$$

Es decir el coeficiente de carga dinámica puede estar en el intervalo [1.85-2.23] según el análisis estadístico realizado. Esto ratifica la veracidad de la expresión.

Para el tratamiento del modelo físico - matemático se tomará el valor de $k_d = 2$, por el cual serán afectados o bien las cargas estáticas a aplicar, o bien los esfuerzos obtenidos como resultado del cálculo.

2. Conclusiones

Como resultado del trabajo desarrollado en el cálculo de estructuras para vehículos automotores y específicamente en la del semirremolque de pasajeros se han obtenido resultados de índole general, es decir que pueden ser aplicados a la estructura de cualquier vehículo

autopropulsado y otros de carácter particular para el equipo analizado, pero que aún así poseen valor generalizador.

Estos aspectos pueden resumirse en las siguientes conclusiones

1. La planificación del experimento para la determinación de los esfuerzos permitió obtener una expresión matemática con la cuál pueden calcularse las deformaciones para diferentes condiciones de explotación.
2. Se comprobó la validez de la expresión obtenida con los resultados de la experimentación.
3. Se determinó experimentalmente el valor del coeficiente de carga dinámica, además del intervalo de valores en que puede encontrarse.
4. El coeficiente de carga dinámico calculado por la expresión obtenida en la planificación del experimento está en el rango de la experimentación, lo cuál ratifica la validez de la misma.
5. Se verificó una importante influencia de la vía en el coeficiente de carga dinámico, aspecto no definido en la literatura especializada.

Bibliografía

1. Alarcón, E., "Notas sobre el Método de Elementos Finitos", Univ. Politec. de Madrid, secc. de public. Madrid, 1978.
2. Beermann, H. R., "Rechnerische Analyse von Nutz Fahrzeugtragwerken", Verlag Tuv Rheinland GmbH, Koln, 1986. England translation from German to English Language in 1990.
3. Beermann, H. J., "Joint Deformations and stresses of commercial vehicle frame under torsion". Dpto. of vehicle structure, Technical University of Braunschweig, west Germany, Mech. E. 1984.

4. Beerman, H.J., "Static Analysis of commercial vehicle frame: A hybrid-finite element and analytical method. Journal of vehicle design, vol 5, pp 26-52, 1984.
5. Beerman, H. J., "Warping Torsion of Comercial vehicle frames, taking into consideration flexible joints", Int. J. Vehicle Design, vol 1, No. 5, 1980.
6. Benirez, C. F. ,"Análisis del Sistema portante del ómnibus Girón IV, Pub. Transporte y Vías de Comunicación Y, (ISPJAE), 1977.
7. Informe Técnico "Diagnóstico de la Estructura del semirremolque TREN-BUS", CICMA-ISPJAE, 1994.
8. Lopez, P. R., "Diseño estadístico de experimentos", Editorial Cient. Tec., Cuba, 1988.
9. Novo S. C., Véliz, D. J., Otero, P. L., Fdez , S. M., "Cálculo de una plataforma para el varado de embarcaciones de 40 t", Informe Técnico a CEPRONA, ISPJAE, 1993.
10. Novo, s. c. , "Análisis de la resistencia del auto montuno ",Revista Construcción de Maquinaria , Univ. Central de las Villas , Cuba , 1988.
11. Otero , P. L. ,Benítez ,C. F. y Sainz , C. J. , "Sistema integral de cálculo de estructuras metálicas. SICEM." , Proc. VI Conferencia Cient. de Ing. y Arq. , ISPJAE , Cuba , 1990.
12. Otero , P. L. , Novo , S. C. , Fdez , S. M. , "Análisis de la estructura del tren-bus ", Proc. VIII Conferencia Cient. de Ing y Arq. , ISPJAE , 1994. IX Forum Provincial de Cienc. y Tec. Informe técnico para la Empresa Ind. Guanabo

Calculation of structures for semi - trailers of large dimensions using in passengers transportation

Abstract

The Finite Elements Method (FEM) developed until the present time is a powerful computerized calculation system applied in the tensions and deformations analysis of solids and structures and much literature has been published on FEM as calculation method,

The need of solving the problems of passengers transportation, mainly in Havana City, in the difficult conditions of Cuban special period, conducted to the development of a semi - trailer with the necessary characteristics to fulfil this function , which by their attributes constitutes the only one in his gender for this purpose.

It is, the first time that in our country is executed the calculation of a self - potable reticulated structure of similar magnitude, with satisfactory concrete results.

It is approached the creation of a physic - mathematical model that simulates the real structure, conditioned to the limitations of the calculation program, offering a similar behavior in the efforts and deformations that are produced, with a study of the different variants of results.

In the work are obtained some results on the possible consequences the calculation of the complete structure or separating it by sections, being necessary the establishment of a methodical for the definition of those sections that they can be analyzed separately, as well as the order of importance of this analysis.

It was accomplished the experimental determination of the dynamic load coefficient, as well as the establishment of the physic - mathematical model adapted for the calculation of the structure of a semi - trailer for passengers transportation applying the Finite Elements Method.

It was effected a test to statics load del frame to corroborate the validity of the physic - mathematical model of the structure.

Additionally, It is proposed a technical solution within the technological possibilities of the constructing company to avoid the structure breakage of the equipment.