

Diseño del marco externo de una máquina de pesos muertos de 10 kN en el CENAMEP AIP

Saavedra, Victoria

Centro Nacional de Metrología de Panamá AIP (CENAMEP AIP)
Panamá, Panamá
ORCID: 0009-0007-2484-8099

Kuruc, José

Centro Nacional de Metrología de Panamá AIP (CENAMEP AIP)
Panamá, Panamá
ORCID: 0000-0001-5038-7766

Abstract

Force measurement is a fundamental pillar for ensuring quality and safety in production systems, materials testing, structural design, and mechanical component evaluation. Currently, the National Metrology Center of Panama (CENAMEP AIP) calibrates testing machines using validated methods compared with other National Metrology Institutes (NMI), achieving uncertainties of less than 0.15%. However, secondary laboratories are providing calibration services to materials testing machines with high-accuracy force transducers, whose traceability is sought outside the country, making services more expensive for local industry. For this reason, a strategy was planned that establishes force metrology capabilities for 2030. The technical approach includes the incorporation of a deadweight machine with uncertainties of 0,002% to calibrate class 00 transducers according to ISO 376, for ranges from 0,1 kN to 10 kN. This work presents the structural design of the load frame and upper plate, scaled from a previous 25 kN design generated by CENAMEP in 2023. In this new version, the structural joints of the beams were defined, and the static analysis of the design was further developed. In addition, there are plans to provide services for ranges from 5 kN to 200 kN and from 100 to 1000 kN using transfer machines. This research is an important step toward offering high-accuracy force calibration services, reducing outsourcing costs faced by secondary laboratories, and strengthening the country's Quality Infrastructure (QI) in sectors dependent on materials testing.

Keywords: Structural analysis, Ansys Mechanical, Deadweight Force Machine, structural joint, Force Metrology.

Resumen

La magnitud de fuerza es un pilar fundamental para garantizar la calidad y seguridad en sistemas de producción, ensayo de materiales, diseño estructural y evaluación de componentes mecánicos. Actualmente el Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP) calibra máquinas de ensayo con métodos validados y comparados con otros Institutos Nacionales de Metrología (INM), alcanzando incertidumbres inferiores al 0,15%. No obstante, los laboratorios secundarios están brindando servicios de calibración a máquinas de ensayo de materiales con transductores de fuerza de alta exactitud, cuya trazabilidad se busca fuera del país, encareciendo los servicios a la industria local. Por esto se planificó una estrategia que establece las capacidades en metrología de fuerza al 2030. El enfoque técnico contempla la incorporación de una máquina de pesos muertos con incertidumbres del 0,002% para calibrar transductores clase 00 según la norma ISO 376, para alcances en el rango de 0,1 kN a 10 kN. Este trabajo presenta el diseño estructural del marco de carga y el plato superior, escalados de un diseño previo de 25 kN generado por el CENAMEP AIP en 2023. En esta nueva versión, se definieron las uniones estructurales de las vigas y se profundizó el análisis estático del diseño. Además, se planea cubrir servicios para alcances de 5 kN a 200 kN y de 100 a 1000 kN mediante máquinas de transferencia. Esta investigación es un paso importante para ofrecer servicios de calibración de alta exactitud en fuerza, reducir los costos de externalización que afrontan los laboratorios secundarios y fortalecer la Infraestructura de la Calidad (IC) del país en los sectores dependientes del ensayo de materiales.

Palabras claves: Análisis estructural, Ansys Mechanical, máquina de pesos muertos, conexión estructural, metrología de fuerza.

1. INTRODUCCIÓN

Los laboratorios secundarios que brindan trazabilidad en metrología de fuerza en Panamá han tenido un auge, ofertando servicios con capacidades similares a la del CENAMEP AIP. Como Instituto Nacional de Metrología, CENAMEP AIP reconoce su responsabilidad para cubrir esta demanda. Por ende, está diseñando la estrategia para fortalecer los servicios en metrología de fuerza.

Un pilar importante de esa estrategia es contar con un patrón primario de fuerza, en este caso, una máquina de pesos muertos que sea capaz de calibrar transductores de diferentes alcances, y este trabajo presenta un avance en el diseño.

1.1 Antecedentes del marco externo

En 2023 se realizó un estudio para definir los requisitos mínimos para el diseño de una máquina de pesos muertos en el laboratorio de Fuerza del CENAMEP AIP. En este estudio se definió la geometría, altura máxima de la máquina, materiales y perfiles del marco externo con un alcance máximo de 25 kN [1]. También se sugirió un control semiautomático para el proceso de calibración. No obstante, este diseño sólo cubría transductores de 1 y 25 kN. En esta nueva versión, el diseño propuesto presenta cuatro puntos de calibración para transductores con alcances máximos de 1 kN, 2 kN, 5 kN y 10 kN.

También se remarcó la importancia de prevenir las fuerzas laterales como el pandeo local y deformaciones excesivas en la columna e inestabilidad del marco externo, que pueden las cargas dinámicas durante el proceso de calibración de los transductores. Un método que suele utilizarse en edificios de gran altura es la incorporación de vigas de arriostre [2]. De hecho, las simulaciones del estudio de 2023 demostraron que la deformación y el pandeo local de las columnas disminuyó significativamente cuando se colocó una línea intermedia de vigas de arriostre entre las columnas. Es por esto que, en este estudio se decidió añadir otra línea de arriostre intermedia entre las columnas, con un total de 4 líneas de arriostres equidistantes a lo largo de las columnas del marco externo, tal como se observa en los diagramas de las simulaciones, mostrados en la sección de resultados.

1.2 Antecedentes de las conexiones

En 2020, Eduardo Nuñez y su equipo hicieron el estudio experimental y numérico del Comportamiento Cíclico de la Conexión Momento Viga-Columna de Sección Hueca, donde utilizaron dos conexiones de “end plate” (placas terminales por su traducción a español) para unir una viga y una columna. Una placa fue soldada al extremo de la viga y la otra a la columna [3]. El tipo de conexiones end – plates permite transmitir los esfuerzos axiales, cortantes y de flexión de manera estable de las vigas a las columnas.

2. MÉTODO

A. Análisis teórico del marco externo

Se analizó estáticamente el marco externo de la máquina para comprobar que es capaz de soportar la carga máxima de diseño. En este proceso se aplicó la metodología descrita en el estudio de 2023 [1] para los tres componentes principales: vigas, columnas y placa de apoyo del transductor.

B. Análisis de las conexiones vigas - columna

La metodología utilizada para el diseño de la conexión entre vigas y columnas del marco de carga se realizó siguiendo las recomendaciones de [4] y [5]. El diseño de la conexión en sí consta de uniones: a) fijas: soldadura de la placa terminal a la columna y otra placa de refuerzo soldada a la viga y; b) móvil: pernos para unir las placas de la viga a la columna. El diseño se basa en un sistema de uniones tipo end - plate (placas terminales) soldadas a lo largo de columna en posiciones equidistantes. Las vigas también constan de placas terminales en sus extremos que se unen a las placas terminales de las columnas con pernos. Definición de la geometría de las uniones. Cada unión se modeló como una placa rectangular de acero estructural, con dimensiones de 74 mm x 63,84 mm, soldadas a los soportes de las columnas.

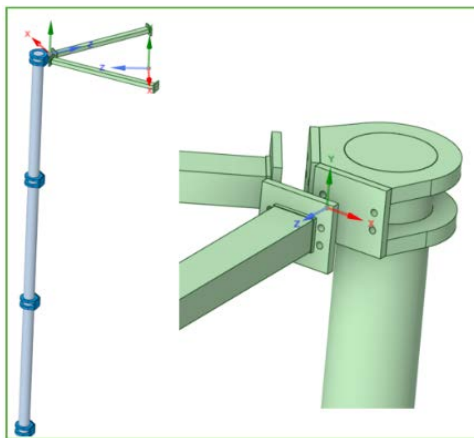


Figura 1. Diseño propuesto con uniones de placas terminales.

En estas placas se fijan las placas terminales de las vigas mediante pernos distribuidos simétricamente en las esquinas de la placa.

Determinación de cargas en la unión. Las cargas transmitidas a cada conexión fueron tomadas del análisis estructural teórico del marco externo.

Cálculo del espesor de las placas terminales.

El espesor mínimo se estimó mediante el equilibrio de momentos entre la fuerza en los pernos y el momento máximo transmitido,

para $t = \sqrt{\frac{6M}{f_y b^2}}$, donde: M = momento máximo en la unión; f_y = límite elástico del acero, b =ancho de la placa.

El espesor calculado fue de 3 mm, pero se adaptó al siguiente valor estándar, de 4 mm para dar mayor holgura a la resistencia plástica a flexión y evitar deformaciones locales en los puntos de mayor concentración de esfuerzos en la placa.

Selección de pernos. Se emplearon cuatro pernos M6 de acero clase 8,8 ubicados equidistante en la placa, garantizando una separación mínima de dos veces el diámetro del perno, como indica la norma Eurocode 3. El esfuerzo por cortante en cada perno se verificó mediante la expresión:

$V_{Rd} = \frac{f_{v,Rd}}{\gamma M^2}$, donde: V_{Rd} = capacidad a cortante por perno; $f_{v,Rd} = 0,6 f_u A_s$ es la resistencia de diseño al cortante y; γM^2 = coeficiente parcial de seguridad para pernos.

Factor de seguridad. Se verificó el factor de seguridad en cortante para pernos mediante la relación:

$\frac{4 V_{Rd}}{F_{joint}}$, donde: 4 es la cantidad de pernos por unión y $F_{joint} = 3333$ kN es la carga por unión.

C. Análisis de cuerpos lineales del marco externo en ANSYS

Para el análisis de la estructura se utilizó diferentes paquetes del software ANSYS. Se dibujó la estructura del marco externo, la placa y las uniones en Ansys SpaceClaim, incluyendo las restricciones del diseño. El marco externo se diseñó como cuerpo lineal y los perfiles obtenidos en [1] fueron asignados de la librería Eurocode. Finalmente, se compartió la topología para enmarcar la conexión entre los vértices de la estructura.

Después se creó el flujo de trabajo del primer grupo de simulaciones en Ansys Workbench para evaluar la deformación, momentos flectores y fuerza axial del marco externo comprendido por las vigas y columnas. Se crearon dos bloques de análisis estáticos para comparar las siguientes cargas: a) Inerciales: se observó el comportamiento de la estructura sólo con el peso de los componentes y; b) estáticas: se incluyó la carga máxima de 10 kN. Seguidamente se generó el modelo en Ansys Mechanical considerando las condiciones de frontera definidas analíticamente.

D. Análisis 3D de la placa principal

Los valores obtenidos fueron simulados en el software Ansys Mechanical y se utilizó soportes fijos en los lados de la cara inferior de la placa.

3. RESULTADOS

A. Análisis teórico del marco externo

Tabla 1. Resultados del análisis teórico para el marco de carga y la conexión viga – columna.

Elemento	Placa	Vigas de arriostre	Columna	Conexión: Placas terminales / pernos
Condiciones de contorno	viga con extremos: empotrado y simplemente apoyado; carga puntual.	viga con extremos empotrados; carga triangular uniformemente distribuida.	Columna con apoyos fijos, esbelta con carga excéntrica.	Placas terminales soldadas a los conectores de las columnas.
Ecuaciones del modelo	$M_{max} = \frac{2}{3}Ph$ $t = 2\sqrt{\frac{6M_{max}}{\sigma b}}$	$M_{max} = \frac{5}{96}w_b L^2$ $S_{min} = \frac{ M_{max} }{\sigma_{perm}}$	$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I}$ $\frac{\frac{P}{A}}{\sigma_{perm\,carga}} + \frac{\frac{Mc}{I}}{\sigma_{perm\,par}} \leq 1$	$t = \sqrt{\frac{6M}{f_y b^2}}$ $V_{ED} = \frac{f_{v,Rd}}{\gamma M^2}$
Espesor / diámetro mínimo	24 mm	14 mm	57 mm	t=8 mm / 4 pernos M6 clase 8,8 por unión.

NOTA: En la Tabla 1, es el momento máximo en el punto de mayor esfuerzo de la placa y la viga, es el espesor mínimo de la placa para tolerar el momento flector máximo. En la viga es el módulo de sección mínimo admisible para una geometría cuadrada. En la columna se refiere al esfuerzo normal para una columna con carga excéntrica.

B. Análisis 3D de la placa en ANSYS Mechanical

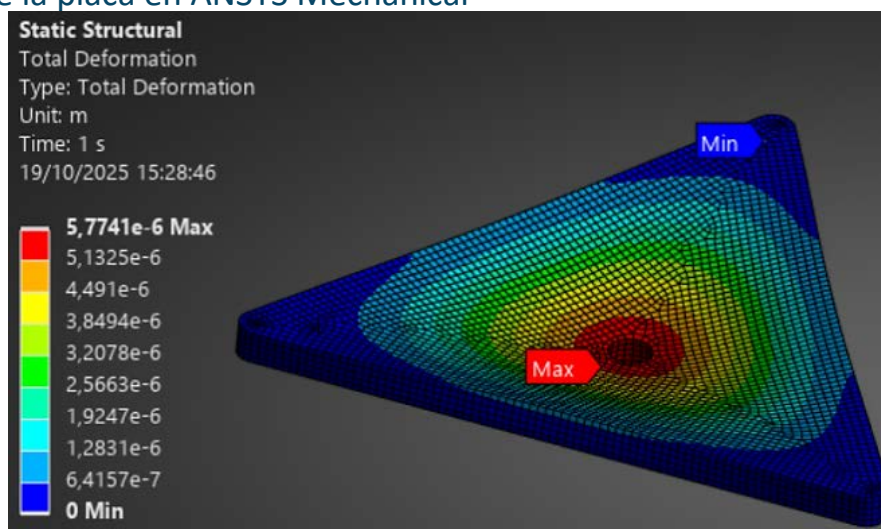


Figura 2. Diagrama de la deformación total de la placa para un espesor $t = 40$ mm.

La deformación total máxima de ≈ 0.00577 mm en el centro de la viga refleja que la estructura se comporta como un cuerpo muy rígido frente a la carga aplicada y altamente resistente. El punto de mayor deformación en la placa coincide con los resultados obtenidos en el estudio de 2023.

C. Análisis de cuerpos lineales en el marco externo

Los resultados que se presentan en la Figura 3 y 4 demuestran que la estructura es estáticamente segura y estable para bajo la carga máxima. La deformación total máxima es de aproximadamente 0,27 mm. Un valor muy por debajo de los criterios de servicio definidos para controlar deformaciones excesivas con $L/200 = 4,2$ mm (respecto a la viga que es donde ocurre la deformación máxima). Respecto a la columna, la deformación máxima representa el 0,009% de la longitud total.

B	Results	Minimum	Maximum	U...	Time (s)
	Total Deformation	0.	4.4178e-006	m	1.
	Axial Force	-374.38	0.58804	N	1.
	Total Bending Moment	1.5292e-002	2.4836	N·m	1.
	Torsional Moment	-5.0709e-002	6.9402e-002	N·m	1.
	Total Shear Force	2.3817e-003	25.781	N	1.
C	Results	Minimum	Maximum	U...	Time (s)
	Total Deformation	0.	2.6994e-004	m	1.
	Axial Force	-3708.1	119.83	N	1.
	Total Bending Moment	0.16055	146.62	N·m	1.
	Torsional Moment	-3.6676	3.6666	N·m	1.
	Total Shear Force	4.6284e-003	1271.4	N	1.

Figura 3. Análisis de B) cargas inerciales y C) cargas estáticas del marco externo; columnas de 60 mm y vigas de 40 mm x 30 mm.

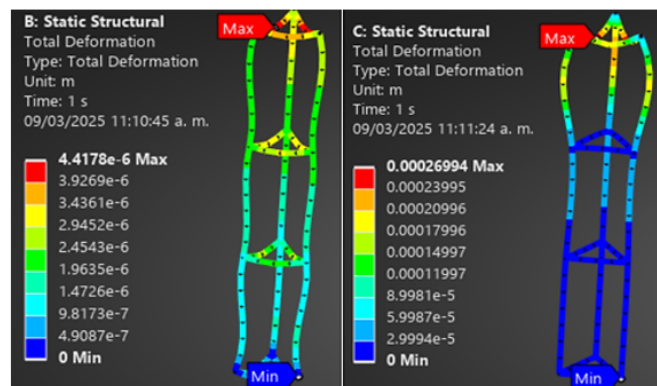


Figura 4. Diagrama de la deformación total en el marco externo para una carga máxima de 10 kN

4. CONCLUSIONES

Las simulaciones mostraron que la nueva línea de vigas de arriostre mejoró significativamente el pandeo local a lo largo de la columna. Los resultados del análisis teórico y simulados en Ansys para el marco externo demostraron que los perfiles definidos garantizan deformaciones mínimas, con una deformación total máxima de $\sim 0,27$ mm, indicando suficiente resistencia y rigidez frente a la carga máxima de 10 kN con perfiles de vigas rectangulares de 40 mm x 30 mm, columnas circulares de 60 mm y placa principal de 40 mm. El diseño propuesto para la conexión viga – columna presenta uniones tipo “end – plate” donde una placa va soldada a la viga, otra a la columna y se unen mediante pernos para garantizar una unión móvil.

En caso de requerir una reducción en el aporte de incertidumbre estructural al presupuesto de incertidumbre total de la máquina, se recomienda aumentar la sección de las vigas y columnas para incrementar la rigidez del conjunto. También se sugiere utilizar un mallado

refinado y, comparar los resultados con los de este estudio con el objetivo de evaluar la convergencia. Finalmente, se recomienda modelar las conexiones empleando las uniones y soportes sugeridas en este estudio considerando las condiciones de borde, para contar con un análisis mecánico global del marco externo.

Referencias

- [1] V. Saavedra, D. Vega, A. Candelaria, y J. Kuruc, «Requerimientos mínimos para el diseño de una máquina de Pesos Muertos en El CENAMEP AIP», Congr. Nac. Cienc. Tecnol. – APANAC, pp. 289-295, sep. 2023, doi: 10.33412/apanac.2023.3949.
- [2] S. M. Razak, T. C. Kong, N. Z. Zainol, A. Adnan, y M. Azimi, «A Review of Influence of Various Types of Structural Bracing to the Structural Performance of Buildings», en E3S Web of Conferences, N. Mohamed Noor y A. W. Azhari, Eds., 2018, p. 01010. doi: 10.1051/e3sconf/20183401010.
- [3] E. Nuñez, N. Boainy, F. González, R. Torres, R. Picón, y N. Guerrero, «Cyclic Behavior of Hollow Section Beam–Column Moment Connection: Experimental and Numerical Study», Metals, vol. 10, n.o 12, p. 1608, dic. 2020, doi: 10.3390/met10121608.
- [4] Eurocode 3: Steel Structure Joint Design - BS EN 1993-1-8», studylib.net. Accedido: 18 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.net/doc/26148084/bs-en-1993-1-8-2005>
- [5] [R. Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2.a ed. México: Prentice Hall, 1992.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.