

Comunicación Breve

Análisis comparativo de cálculo momento inicial en pórticos hiperestáticos: Evaluación de métodos manuales y softwares

Comparative analysis of initial moment calculation in hyperstatic frames: Evaluation of manual and software methods

Santos Eloy Lopez Mamani^{1*}, Milan Angel Capari Coyo¹, Jarin Hasbel Alcala Castro^{1,2}
*Autor de correspondencia: bylopez0011@gmail.com

^{1,2} Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Civil, Llallagua, Potosí, Bolivia

² Universidad Técnica de Oruro, Carrera de Ingeniería Civil, Oruro, Bolivia

Recibido: 05/10/2024 Aceptado para publicación: 18/10/2024

Resumen

El cálculo del momento inicial en pórticos hiperestáticos es fundamental en ingeniería civil, ya que afecta la estabilidad estructural. Este estudio compara métodos manuales y software como Ftool y SAP2000. Se analizaron 70 estructuras empleando el método de flexibilidad y ambos programas. Los resultados muestran que los métodos manuales simplifican los cálculos, pero omiten efectos relevantes. Ftool evalúa momentos (Mx) y esfuerzos axiales (Nx), mientras que SAP2000 incluye momentos, esfuerzos cortantes (Qx) y axiales, ofreciendo mayor precisión. La comparación evidencia diferencias significativas, destacando la importancia de seleccionar herramientas según las necesidades específicas del proyecto para garantizar un análisis estructural más confiable. Los hallazgos sugieren que aunque los métodos manuales son útiles para estimaciones rápidas, su simplicidad puede llevar a subestimar ciertas demandas estructurales críticas. Por otro lado, herramientas avanzadas como SAP2000 permiten un análisis integral que optimiza el diseño desde el punto de vista técnico y económico.

Palabras clave: momento inicial, pórticos, Ftool, SAP2000

Abstract

The calculation of the initial moment in hyperstatic portal frames is fundamental in civil engineering, since it affects structural stability. This study compares manual methods and software such as Ftool and SAP2000. Seventy structures were analyzed using the flexibility method and both programs. The results show that manual methods simplify the calculations, but omit relevant effects. Ftool evaluates moments (Mx) and axial forces (Nx), while SAP2000 includes moments, shear forces (Qx) and axial forces, offering higher accuracy. The comparison shows significant differences, highlighting the importance of selecting tools according to the specific needs of the project to ensure a more reliable structural analysis. The findings suggest that although manual methods are useful for quick estimates, their simplicity may lead to underestimate certain critical structural demands. On the other hand, advanced tools such as SAP2000 allow for a comprehensive analysis that optimizes the design from a technical and economic point of view.

Keywords: initial moment, hyperstatic frames, Ftool, SAP2000

Introducción

En el análisis estructural de pórticos hiperestáticos, el cálculo del momento inicial es crucial para evaluar el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones de carga. Históricamente, este análisis se realizaba mediante métodos manuales, que ofrecen una comprensión profunda de los principios estructurales. Como menciona Kassimali (2015), “los métodos tradicionales son efectivos para ilustrar principios fundamentales, pero tienden a subestimar la complejidad real”. Sin embargo, con el avance tecnológico, software especializado como SAP2000 ha facilitado simulaciones más complejas y precisas al incluir múltiples tipos de esfuerzos simultáneamente. La elección del método adecuado depende entonces de factores como la complejidad de la estructura y el nivel de precisión requerido.

Entre los métodos manuales, el Método de Distribución de Momentos (MDM) se destaca por su enfoque iterativo, que evita la resolución de sistemas de ecuaciones complejos. Este método analiza la distribución de momentos mediante rotaciones nodales, como describen Kong y Wong (2014). Su simplicidad es útil para verificaciones preliminares, aunque su proceso iterativo puede ser prolongado (Boyke y Nagao, 2023). Los métodos gráficos, según White, Surovek y Chang (2007), permiten analizar modelos hiperestáticos mediante operaciones gráficas simples, siendo útiles en etapas iniciales de diseño, aunque su aplicación es limitada frente a enfoques numéricos avanzados. Por su parte, el Método de Análisis Directo (DM), según Lacort (2015), introduce reducciones iniciales en la plomada y rigidez, ofreciendo estimaciones más racionales de fuerzas internas, aunque requiere ajustes para sistemas estructurales generales.

El método de la flexibilidad (Condori, 2009) es otra herramienta manual destacada para el cálculo de desplazamientos, basado en el principio del trabajo virtual. Este método considera no solo momentos flectores, sino también esfuerzos cortantes y axiales. Sin embargo, en la práctica profesional, estos últimos suelen subestimarse o ignorarse, lo que puede llevar a evaluaciones incompletas (Kassimali, 2015). Los avances computacionales han popularizado herramientas como el Método de Elementos Finitos (FEA) y software especializado, entre ellos Abaco. Lopes, Santos y Lopes (2011) destacan que el FEA permite análisis detallados, incluyendo condiciones de carga complejas y desempeños sísmicos, aunque exige experiencia técnica y recursos computacionales significativos. Además, Waqas, Uy, Wang y Thai (2019) enfatizan la capacidad de Abaco para analizar relaciones momento-rotación, considerando no linealidades geométricas y materiales, siendo una herramienta confiable para evaluaciones complejas.

En ese contexto, la investigación compara métodos manuales y software para el cálculo del momento inicial en pórticos hiperestáticos. Al identificar ventajas y limitaciones de cada enfoque, se pretende guiar a ingenieros estructurales en la toma de decisiones según las características del proyecto y los recursos disponibles. Además, se enfoca en responder: ¿Cuáles son las discrepancias en el cálculo del momento inicial entre métodos manuales y los resultados de Ftool y SAP2000? Los hallazgos proporcionan el uso de herramientas computacionales en diseño estructural y fomentan la integración de métodos manuales y software especializado, promoviendo decisiones informadas en ingeniería civil.

Materiales y métodos

Para responder la pregunta principal de esta investigación, se analizaron 70 estructuras mediante diferentes métodos de cálculo estructural. Específicamente, se realizaron 48 análisis con el método de la flexibilidad mediante cálculos manuales, 10 con SAP2000 y 12 con Ftool. La elección de estas herramientas responde a su capacidad para considerar efectos axiales y cortantes, especialmente relevantes en estructuras con vigas inclinadas. Se diseñaron 12 estructuras patrón para el estudio, introduciendo variaciones progresivas en la pendiente de sus elementos estructurales. Estas variaciones abarcaron desde inclinaciones nulas en estructuras horizontales hasta configuraciones complejas, como pórticos con elementos peraltados. El método de la flexibilidad se aplicó transformando cada estructura hiperestática en su equivalente isostática. Este proceso incluyó el cálculo de deformaciones provocadas por todas las cargas aplicadas, tratándolas como incompatibilidades geométricas, según las recomendaciones de Hibbeler (2012).

Para corregir estas incompatibilidades, se siguió este procedimiento: Se aplicaron cargas unitarias en las secciones donde se eliminaron restricciones, permitiendo calcular deformaciones mediante el principio de superposición (Condori, 2009). Con estos resultados, se desarrolló un sistema de ecuaciones para determinar las cargas correctivas necesarias. Las reacciones finales de cada estructura se obtuvieron sumando las reacciones de la estructura isostática base y las generadas por las cargas correctivas. Este enfoque permite calcular las sollicitaciones internas, como momentos, fuerzas cortantes y axiales, en cualquier sección de la estructura, garantizando resultados consistentes (Kassimali, 2015).

En el caso de los análisis realizados con Ftool, se siguieron procedimientos específicos que incluyeron: La

verificación inicial del sistema de unidades. La correcta definición de los elementos estructurales, incluyendo las propiedades geométricas y de los materiales. La revisión de las condiciones de apoyo y las cargas aplicadas. (Martha, 2002). Por otro lado, el análisis mediante SAP2000 se enfocó en aprovechar las capacidades avanzadas del software para modelar y analizar estructuras hiperestáticas de manera eficiente. Este proceso implicó: Seleccionar correctamente el plano de trabajo para el modelado tridimensional. Realizar ajustes y verificaciones precisas en las unidades del sistema para asegurar la compatibilidad con las características del diseño. Definir adecuadamente los elementos estructurales y las condiciones de frontera (Suárez, Gerbaudo, & Vázquez, 2008). Además, la combinación de estos métodos permitió validar los resultados obtenidos a través de distintos enfoques, proporcionando una visión integral y robusta del comportamiento estructural en diferentes configuraciones y condiciones de carga. Este análisis comparativo refuerza la importancia de emplear herramientas tanto manuales como computacionales para resolver problemas de análisis estructural complejos.

Resultados

La Tabla 1, presenta las reacciones del apoyo M1 (Momento 1) calculadas mediante diferentes métodos y programas. Los métodos incluyen la resolución manual usando el método de la flexibilidad y los programas de análisis FTOOL y SAP2000, los cuales calculan momentos, fuerzas axiales y desplazamientos en el apoyo. Los resultados de los diferentes métodos son generalmente consistentes, con ligeras variaciones, especialmente para los valores más bajos de la variable en la primera columna. Sin embargo, estas diferencias se reducen a medida que el valor de la variable aumenta.

A medida que la variable en la primera columna incrementa, las reacciones tienden a estabilizarse y los resultados obtenidos mediante los programas y el método manual se acercan entre sí, especialmente a partir de valores como 2,50 o 4,00. Las diferencias son pequeñas en los momentos, fuerzas y desplazamientos calculados, lo que sugiere que, en análisis más complejos o con valores más altos, todos los métodos proporcionan soluciones casi equivalentes. Este comportamiento refleja una mayor precisión y convergencia en los resultados a medida que el sistema estructural se estabiliza. En comparación, aunque el método manual muestra algunas variaciones, especialmente para valores pequeños, los programas FTOOL y SAP2000 ofrecen resultados muy similares entre sí, lo que demuestra su fiabilidad. Para valores más altos de la variable, los resultados de todos los métodos se aproximan, indicando que los programas de análisis computacional son una herramienta eficaz y precisa en la práctica del análisis estructural. La comparación sugiere que el método manual puede ser adecuado para estimaciones rápidas, pero los programas permiten obtener soluciones más detalladas y precisas.

Además, en la Figura 1, se muestra un resumen gráfico de cómo los efectos de momentos (M_x), fuerzas cortantes (Q_x) y fuerzas axiales (N_x) influyen en las reacciones del apoyo M1, considerando diferentes combinaciones: solo momentos (M_x), momentos y cortantes (M_x, Q_x), momentos, cortantes y axiales (M_x, Q_x, N_x), y momentos con fuerzas axiales (M_x, N_x). También, presenta variaciones de estas reacciones en función de una variable, con magnitudes numéricas que reflejan los cambios específicos para cada caso analizado.

Discusión

Las diferencias observadas en el cálculo del momento inicial varían considerablemente dependiendo del método y la herramienta utilizada. Por un lado, los métodos tradicionales de análisis manual, aunque útiles para fines académicos o de comprensión teórica, presentan limitaciones significativas al simplificar los modelos y no considerar todos los efectos relevantes en el comportamiento de las estructuras. Según Hibbeler (2012), estos métodos tradicionales son efectivos para ilustrar principios fundamentales pero tienden a subestimar la complejidad de los sistemas estructurales reales, lo que puede afectar la precisión del diseño. Asimismo, Kong y Wong (2014) destacan cómo el Método de Distribución de Momentos, si bien es un enfoque clásico y práctico, está limitado en escenarios donde se requieren análisis más detallados de interacciones estructurales complejas.

Por otro lado, herramientas como Ftool, es utilizadas en entornos educativos y profesionales (Martha, 2002), ofrecen un análisis más automatizado y eficiente. Sin embargo, Ftool tiende a simplificar los problemas estructurales al centrarse principalmente en los esfuerzos axiales (N_x) y los momentos flectores (M_x), dejando de lado otros factores importantes como los esfuerzos cortantes (Q_x). Este enfoque parcial puede ser adecuado para configuraciones simples, pero resulta insuficiente en escenarios más complejos donde las interacciones entre diversos esfuerzos son críticas para una evaluación precisa. Lopes, Santos y Lopes (2011) confirman que, aunque las herramientas basadas en formulaciones matriciales son valiosas para análisis rápidos; sus aplicaciones prácticas pueden estar limitadas si no se consideran todos los efectos de carga relevantes.

Tabla1. Resumen de reacciones del apoyo M1 (Momento 1), con resolución de programas y manual

Pendiente (m)	Resolución manual método flexibilidad				Programas	
	Mx	Mx, Qx	Mx, Qx, Nx	Mx, Nx	FTOOL	SAP2000
0,000000	-400,000	-399,222	-399,222	-400,000	-400,000	-399,222
0,000025	-57,143	-57,639	-399,222	-400,000	-400,000	-----
0,000250	-57,143	-57,639	-399,221	-399,999	-399,999	-----
0,002500	-57,143	-57,639	-399,127	-399,907	-399,907	-399,127
0,025000	-57,144	-57,640	-389,980	-390,904	-390,904	-389,979
0,25	-57,740	-57,740	-147,863	-149,004	-149,004	-147,863
0,50	-58,019	-58,019	-85,983	-86,102	-86,102	-85,983
0,75	-58,418	-58,418	-71,486	-71,356	-71,356	-71,486
1,00	-58,874	-58,874	-66,501	-66,318	-66,318	-66,501
1,25	-59,341	-59,341	-64,462	-64,278	-64,278	-64,462
2,50	-61,147	-61,276	-63,259	-63,143	-63,143	-63,259
4,00	-62,594	-62,675	-64,151	-64,076	-64,076	-64,151

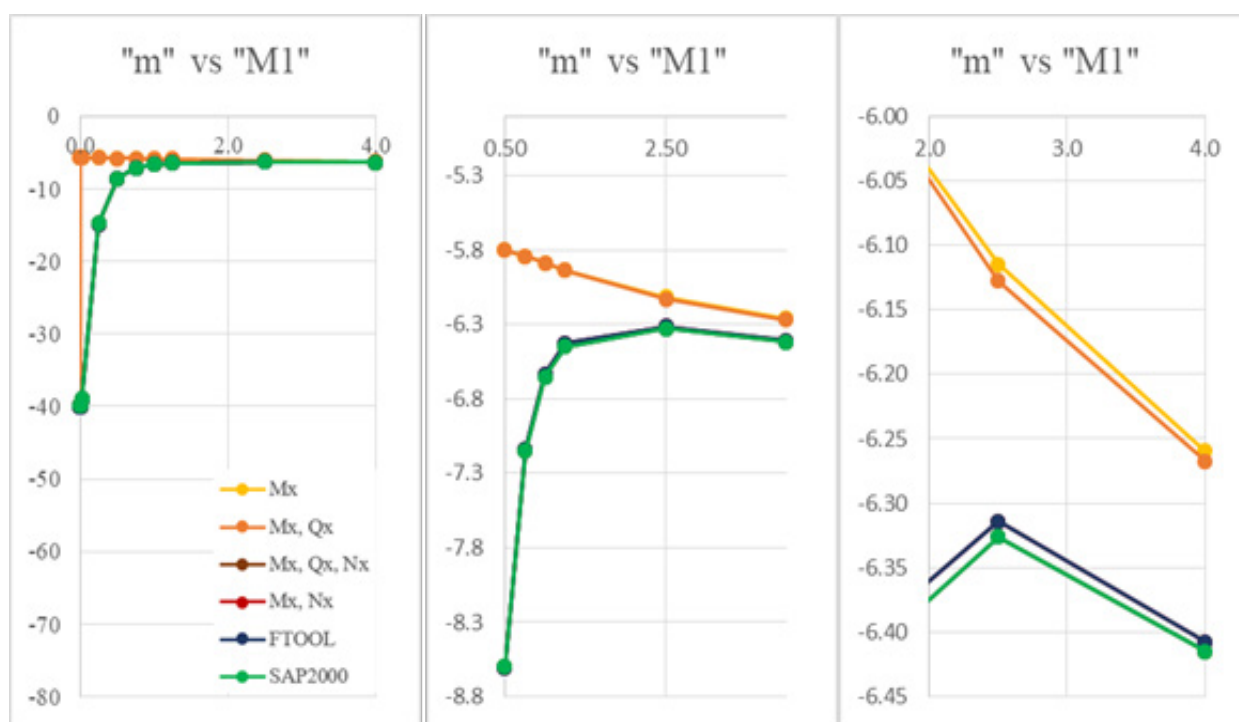


Figura 1: Representación gráfica del resumen de reacciones del apoyo M1 (Mx: efecto de momentos, Mx, Qx: efecto de momentos y cortantes, Mx, Qx, Nx: efecto de momentos, cortantes y axiales, Mx, Nx: efecto de momentos y axiales).

En contraste, programas avanzados como SAP2000 adoptan un enfoque integral que permite incluir simultáneamente los efectos combinados de los momentos flectores (Mx), los esfuerzos axiales (Nx) y los esfuerzos cortantes (Qx). Suárez, Gerbaudo y Vázquez (2008) subrayan cómo SAP2000 facilita un análisis estructural más detallado al incorporar no solo las interacciones entre esfuerzos, sino también factores como cargas dinámicas y efectos de segunda orden. Esto permite capturar con mayor fidelidad las condiciones reales a las que se enfrentan las estructuras. Según Mercado (2001), la inclusión de no linealidades geométricas y análisis dinámicos en herramientas avanzadas mejora significativamente la confiabilidad de los resultados, lo que es crítico para el diseño de estructuras hiperestáticas.

Esta diferencia en el nivel de detalle y precisión tiene implicaciones directas en las decisiones de diseño y en la interpretación de los resultados del análisis. Por ejemplo, al usar herramientas más simplificadas, es posible subestimar o sobreestimar ciertas demandas estructurales, lo que podría derivar en diseños sobredimensionados, costosos e ineficientes, o, en el peor de los casos, en estructuras inseguras (Kassimali,

2015). En cambio, un análisis más completo, como el que permite SAP2000, contribuye a optimizar los diseños desde el punto de vista técnico y económico, asegurando al mismo tiempo niveles adecuados de seguridad.

A partir de estos hallazgos, se recomienda llevar a cabo estudios comparativos adicionales que incluyan un mayor número de configuraciones estructurales y casos prácticos. Estos estudios permitirían validar las observaciones iniciales y profundizar en el entendimiento de las diferencias metodológicas entre herramientas y enfoques. Boyke y Nagao (2023) argumentan que la evaluación del rendimiento sísmico y la comparación entre enfoques pueden ofrecer perspectivas cruciales para mejorar las decisiones de diseño estructural. Asimismo, sería pertinente explorar otros programas disponibles en el mercado, como ETABS, Robot Structural Analysis o MIDAS, para evaluar si pueden aportar perspectivas complementarias o confirmar los resultados obtenidos con SAP2000.

Otro aspecto clave a investigar es cómo las diferencias en los cálculos de análisis estructural impactan en las decisiones prácticas durante el desarrollo de proyectos reales. Factores como los costos de construcción, la eficiencia en el uso de materiales, la sostenibilidad del diseño y, sobre todo, la seguridad estructural, deben ser cuidadosamente evaluados. White, Surovek y Chang (2007) enfatizan que un análisis más detallado no solo optimiza el uso de materiales, sino que también mejora la sostenibilidad y seguridad del diseño estructural. Finalmente, se plantea la necesidad de promover la capacitación continua en el uso de herramientas avanzadas como SAP2000 y en la comprensión de sus diferencias frente a los métodos tradicionales o simplificados. Esto permitiría a los profesionales de la ingeniería civil tomar decisiones más informadas y fundamentadas, maximizando así el valor agregado en cada etapa del proyecto, desde el diseño conceptual hasta la construcción y el mantenimiento de la estructura.

Conclusiones

La precisión en el cálculo del momento inicial en estructuras depende significativamente del método utilizado. Los métodos manuales, aunque simplificados, pueden omitir efectos importantes. Herramientas como Ftool se limitan a considerar momentos flectores (M_x) y fuerzas axiales (N_x), mientras el software SAP2000 ofrece una mayor precisión al incluir tanto momentos flectores (M_x) como cortantes (Q_x) y fuerzas axiales (N_x). Esto permite un análisis más detallado de los esfuerzos internos en la estructura. Para mejorar aún más la precisión en proyectos estructurales, se recomienda explorar otros software especializados y ampliar los estudios sobre métodos de cálculo avanzados que consideren deformaciones grandes y efectos no lineales.

Declaracion de conflictos

Los autores no tenemos conflictos de interes

Contribuciones de los autores

S.E.L.M. diseñó el estudio, realizó cálculos manuales y con software, interpretó los resultados y redactó el artículo. M.A.C.C. colaboró en los cálculos manuales y con software, además de apoyar en la interpretación de resultados. J.H.A.C. contribuyó a la interpretación y redacción de los resultados.

Referencias

- Boyke, C., & Nagao, T. (2023). Seismic performance assessment of pile-supported wharfs: 2D frame analysis method considering both inertial and kinematic forces. *Applied Sciences*, 13(6), 3629. <https://doi.org/10.3390/app13063629>
- Condori Chambi, D. (2009). Análisis estructural. Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro.
- Hibbeler, R. C. (2012). Análisis estructural (8ª ed.). Pearson.
- Kassimali, A. (2015). Análisis estructural (5ª ed., O. Martínez, Ed.). Cengage Learning.
- Kong, J., & Wong, S. H. (2014). Revisiting the moment distribution method: Examples of a one-step approach. *HKIE Transactions*, 21(2), 117-121. <https://doi.org/10.1080/1023697X.2014.908997>
- Lacort, A. G. (2015, June). A graphic, exact method for analyzing hyperstatic spatial pergolas. In *MSLB First International Congress* (pp. 1271-1278).
- Lopes, A. P., Santos, A. A., & Lopes, R. C. (2011). A matrix formulation for the moment distribution method applied to continuous beams. *Advances in Civil Engineering*, 2011(1), 725395. <https://doi.org/10.1155/2011/725395>
- Martha, L. F. (2002). FTOOL: Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas (Versão educacional 2).
- Mercado C., H. (2001). Análisis matricial de estructuras. Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro.
- Suárez, L. E., Gerbaudo, G. M., & Vázquez, D. (2008). Introducción visual a SAP2000.
- Waqas, R., Uy, B., Wang, J., & Thai, H. T. (2019). In-plane structural analysis of blind-bolted composite frames with semi-rigid joints. *Steel and Composite Structures*, 31(4), 373-385. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.31.4.373>
- White, D. W., Surovek, A., & Chang, C. J. (2007). Direct analysis and design using amplified first-order analysis Part II: Moment frames and general framing systems. *Engineering Journal*, 44(4), 323-340.