
RESUMEN

La infraestructura de mayor implantación en el territorio es la carretera. Los tramos en puente y en túnel son los más singulares y costosos, aunque los primeros son más numerosos que los segundos. Hoy en día los puentes de paso superior son uno de los más frecuentes en todas las carreteras importantes. El estribo más recomendable y habitual para este tipo de puentes es el abierto porque, se esconde bajo el terraplén mejorando la visibilidad de los conductores de la vía inferior, y, ahorra materiales respecto al cerrado a partir de una altura de terraplén suficiente. Muchos esfuerzos se han dedicado al cálculo y diseño de los tableros de puente, menos a las pilas, y, aún menos, a los estribos. Esta tesis se ocupa del diseño *óptimo* de estribos abiertos de hormigón armado en puentes de carretera. Se suma a las investigaciones del Grupo de Investigación al que pertenece de Procedimientos de la Construcción, Optimización y Análisis de Estructuras (GPRC); que ya ha optimizado tableros (de losa pretensados y de vigas artesa) y pilas (rectangulares huecas), así como, muros, bóvedas y pórticos.

Los métodos de optimización más antiguos son los exactos pero se complican mucho y pierden eficiencia cuando el número de variables es muy alto y las condiciones que deben cumplir las soluciones (comprobaciones resistentes de los materiales) no son lineales. Por el contrario, con ayuda de los ordenadores actuales, los métodos heurísticos están en gran auge permitiendo con algoritmos sencillos y “mucho coste” computacional, pero en tiempo razonable, resolver de manera automática, problemas tan complejos como los reales, sin simplificaciones, y no sólo optimizando el coste como hasta ahora, si no también, otros criterios o, varios a la vez, con gran facilidad. Los estribos óptimos de la tesis se obtienen mediante estos métodos heurísticos y un programa informático que se ha realizado. Están completamente diseñados para ser construidos, y para ello constan de 40 variables discretas. Los estribos no han sido antes tratados en la bibliografía de optimización. Las funciones objetivo son el coste, la seguridad estructural, la constructibilidad y la sostenibilidad ambiental tanto de forma aislada como por parejas con el coste (con una optimización multiobjetivo híbrida MOSAMO).

Los estribos así obtenidos son diseños óptimos que no han precisado la experiencia previa de un proyectista de estructuras que proponga, como se ha venido haciendo hasta la actualidad, el diseño inicial a comprobar. Si no cumple alguna comprobación resistente (a realizar, bien manualmente, bien, como actualmente, mediante uno o varios programas informáticos de estructuras), el diseño inicial se retoca ligeramente por el ingeniero mediante un procedimiento de prueba y error. Los programas actuales aún no incluyen rutinas de optimización como el de la tesis. Por ello la bondad del diseño final depende mucho del

proyectista que los maneja y de la bibliografía que conoce. La bibliografía sobre el diseño de estribos es escasa y no completa. Este trabajo la amplía aportando las relaciones geométricas, los órdenes de magnitud y los mecanismos resistentes de los estribos óptimos (criterios de predimensionamiento) y los compara con los de la bibliografía y con los de un estribo de referencia ER. Estribo con una altura de 9 m, realmente construido y proyectado por reconocidos ingenieros, respecto al que se han comprobado ahorros económicos superiores al 18% (fundamentalmente en la zapata). Para este ER se ha realizado un estudio paramétrico obteniendo los estribos óptimos con alturas totales entre 6 y 15 m y para tensiones admisibles entre 0,2 y 0,5 MPa.

Se han empleado con éxito algoritmos heurísticos a los estribos de los dos grandes grupos existentes: por un lado, de Búsqueda Secuencial por Entornos o *Hill Climbing*; y, por otro, de los llamados Algoritmos Poblacionales o Evolutivos; en ambos casos, tanto con soluciones factibles como infactibles. En esta tesis, mediante una nueva propuesta de penalización de la función objetivo, se consiguen, ahorros del 60% en tiempo de cálculo. Los algoritmos empleados se basan en el recocido simulado (SAMO) y en la aceptación por umbrales (TAMO). Son dos algoritmos híbridos de escalada estocástica con operadores de mutación basados en los algoritmos genéticos. Las diferencias entre ellos no son significativas, menores del 0.2%. Con un ordenador Intel Core 2 Quad CPU Q6600 de 2.4 GHz y con 3.24 GB de memoria RAM se consigue la optimización (con penalizaciones altas) en tan sólo una ejecución del algoritmo, como novedad frente a otras investigaciones, de 1h 35'(38' con ordenador actual). Dentro del segundo grupo se desarrollan dos nuevas heurísticas HSDLS y HSPDLS basadas en *Harmony Search* e hibridadas con DLS sin y con penalizaciones (y el mismo operador de mutación primer grupo) con las que se consiguen resultados similares pero con tiempos 9 y 6 veces superiores respectivamente.

Tanto la optimización monobjetivo como la multiobjetivo (MO) ponen de manifiesto la equivalencia de optimizar en coste, en CO₂ o en energía con diferencias menores del 1.5%, si bien es, a costa de un elevado número de armaduras pasivas. La optimización MO (coste-barras) ofrece un ahorro medio en barras del 78.4% con un incremento medio de los otros tres criterios de 7.85% siendo el ahorro económico respecto ER todavía de un 12,23%.