

Criterios socioeconómicos para la aplicación de cimientos laminares

Yoermes Glez Haramboure

Correo electrónico:yoermes@civil.cujae.edu.cu

Artículo de Reflexión

Willian Daniel Cobelo Cristiá

Correo electrónico:wcobelo@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Resumen

El presente trabajo argumenta la pertinencia de la investigación y uso de los cimientos laminares, a partir de una revisión bibliográfica que distingue el desarrollo teórico y práctico alcanzado por la ingeniería civil cubana en el tema. Se identifican varias obras cubanas de gran importancia social y económica en las que el empleo de cimientos laminares permitió reducir el costo de construcción y refutó las dificultades constructivas atribuidas a su ejecución. Se enuncian los principales aportes teóricos y estudios que establecieron formulaciones y métodos de cálculo de las láminas aplicadas a cimentaciones de estructuras esbeltas. Mediante la comparación en términos de volúmenes de materiales, costos, volúmenes de combustible consumido y CO₂ emitido a la atmósfera en producción de cemento, se concluye sobre las ventajas económicas y ambientales de la aplicación de cimientos laminares con respecto a los tradicionales de base plana, en depósitos elevados tipo güira y chimeneas para centrales azucareros.

Palabras clave:cimientos laminares, criterios socioeconómicos, depósitos elevados, chimeneas

Recibido: 22 de agosto del 2012

Aprobado: 13 de noviembre del 2012

INTRODUCCIÓN

Los cimientos constituyen elementos estructurales imprescindibles en las obras civiles e hidráulicas pero son, al mismo tiempo, los de mayor dificultad de diseño y construcción. Ello se debe a que involucran un material natural cuyo comportamiento resulta siempre difícil de pronosticar: el suelo. A diferencia del hormigón, el acero o el agua, las propiedades físicas y mecánicas del suelo están en función de diversas condiciones, destacándose la influencia de la historia geológica, la ubicación geográfica y la relación con la hidrosfera. La variedad de condiciones naturales en que se deben proyectar y ejecutar los cimientos se conjuga con diferentes morfologías de edificaciones, en dependencia de las necesidades que motivan su creación. Como resultado, cada obra constructiva requiere implementar una solución particular de cimentación. Existe la posibilidad de "tipificar" una solución de cimentación, que implica la revisión de su

estabilidad geotécnica y estructural ante las condiciones más desfavorables de trabajo dentro de la variedad de estructuras en que será aplicada, pero trae consigo un sobredimensionamiento y excesivo gasto de materiales en los casos en que las condiciones de estabilidad sean más favorables.

En la práctica de la ingeniería civil en Cuba resulta habitual la proyección y ejecución de estructuras tipo *torre* (morfología esbelta, predominio de la altura en detrimento del área de la base), entre las que se destacan las chimeneas de centrales azucareros, centrales termoeléctricas y otras industrias, así como los depósitos elevados tipo güira, muy útiles en el abastecimiento de agua a comunidades e instituciones, y que constituyen *identidad de la ingeniería civil cubana*. En todas estas estructuras es común la aplicación de cimentaciones circulares aisladas que requieren grandes volúmenes de hormigón y acero.

En el sector de las construcciones se hacen esfuerzos por reducir el costo de las obras que constituyen la infraestructura del desarrollo y el bienestar social. En ese sentido, una acción importante consiste en reducir la cantidad de materiales a utilizar y el tiempo de ejecución. La solución al problema del uso excesivo de materiales de construcción en la cimentación de estructuras esbeltas existe desde mediados del pasado siglo. Incluso desde igual fecha se aplicó en el territorio cubano, y contó con ingenieros precursores de las cimentaciones laminares, las cuales permiten un ahorro en el orden del 50 % de los materiales que se emplearían al aplicar la solución de cimentación masiva. [1-4] Sin embargo, la aplicación de las cimentaciones laminares se ha limitado por criterios discutibles que, en el contexto socio-económico actual, requieren un nuevo enfoque. Dichos criterios se agrupan en dos vertientes: Las posibles dificultades constructivas y el estricto control de ejecución que requieren las estructuras laminares, y las limitaciones del diseño por desconocimiento del comportamiento tenso-deformacional de las láminas con interacción suelo-estructura, y con la acción de considerables valores de carga ecológica de viento.

Sobre la base de tales criterios, el presente estudio tiene por *objetivo*: "argumentar la pertinencia de la investigación científica y la aplicación de las cimentaciones laminares, a partir de las experiencias y los beneficios sociales, económicos y medioambientales reconocidos en favor de esta tipología de cimentación".

CONTEXTO HISTÓRICO-SOCIAL DE LA APLICACIÓN DE CIMENTACIONES LAMINARES EN CUBA

La historia de las cimentaciones laminares es tan amplia como la de muchas otras estructuras constructivas. Su estabilidad estructural se basa en la redistribución de esfuerzos hacia la superficie media y el trabajo a compresión, similar a lo que ocurre en arcos y bóvedas. Este principio de funcionamiento tan simple fue aprovechado, con altas dosis de empirismo, por los ingenieros de la antigüedad, para aplicarlas como bases de templos y monasterios, las más pesadas obras de esos tiempos (figura 1), por lo que la construcción de cimientos laminares puede calificarse como *una técnica que antecedió a la ciencia*. [5]

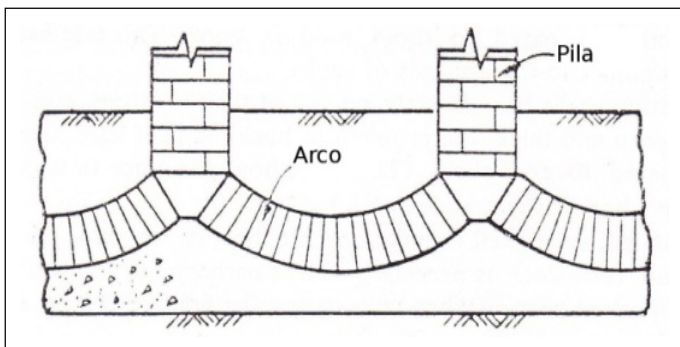


Fig. 1. Primeras estructuras laminares de cimentación. [2]

Ejemplos de aplicación de las estructuras laminares en cimentaciones durante el siglo XX resultan las torres de televisión de Stuttgart (211 m de altura), Hamburgo (271 m de altura), Viena (252m de altura), Moscú (533 m de altura), Berlín y Múnich (figura 2). Estas estructuras, verdaderos colosos ingenieriles de su época, fueron dotadas de un conjunto de elementos laminares con discreto volumen y forma troncocónica para facilitar la transición de las cargas actuantes a nivel del fuste hasta la base de la cimentación, minimizando con esta solución el consumo de materiales.

La aplicación de cimientos laminares en Cuba se inicia con la construcción de una monumental obra de la ingeniería civil: el edificio de 24 plantas actualmente sede del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias (MINFAR, figura 3), a cargo del eminente ingeniero y doctor Sixto Ruíz Alejo. La tipología de cimiento laminar de placa poligonal fue aplicada por primera vez a un edificio de tal altura (94 m sobre el nivel de base), acontecimiento que fuera refrendado por la publicación del American Concrete Institute. [6]

A partir de este hecho, otro eminente ingeniero y científico cubano, el doctor José "Pimpo" Hernández Pérez, desarrolló el método de cálculo basado en coordenadas relativas (generalizando el *método de solicitaciones proyectadas* sobre un plano cartesiano, [7]) que aplicó al diseño de depósitos elevados tipo güira* (figura 4a) como alternativa más económica (fundamentalmente en términos de encofrado) que los depósitos tipo Intze** (figura 4b), lo que impulsó una nueva tipología constructiva mediante la tecnología de moldes deslizantes. [8,9]

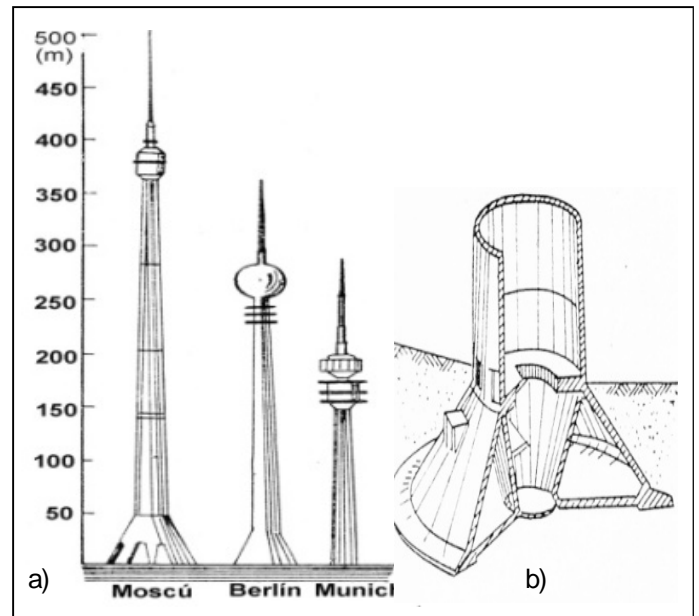


Fig. 2. a) Altura de torres de televisión sobre cimientos laminares construidas en el siglo XX, y b) detalle del cimiento de la torre de Berlín. [2]

* El nombre de esta tipología de depósitos se asocia a su forma geométrica, similar al fruto del árbol de güira (figura 4a).

**El ingeniero alemán Otto Adolf Ludwig Intze (1843-1904) fue el diseñador de los primeros depósitos elevados nombrados con su apellido (figura 4b).

La continuidad de las investigaciones sobre este método de cálculo permitió, entre otros importantes resultados, su unificación con los métodos tradicionales de la geometría diferencial de estructuras laminares [10] y su extensión para láminas de espesores medio y gruesos, [11,12] contribuyendo a su comprensión y utilización.



Fig. 3. Edificio sede del MINFAR, de 24 plantas (94 m de altura), primero de su tipo construido sobre cimiento laminar. Vista actual.

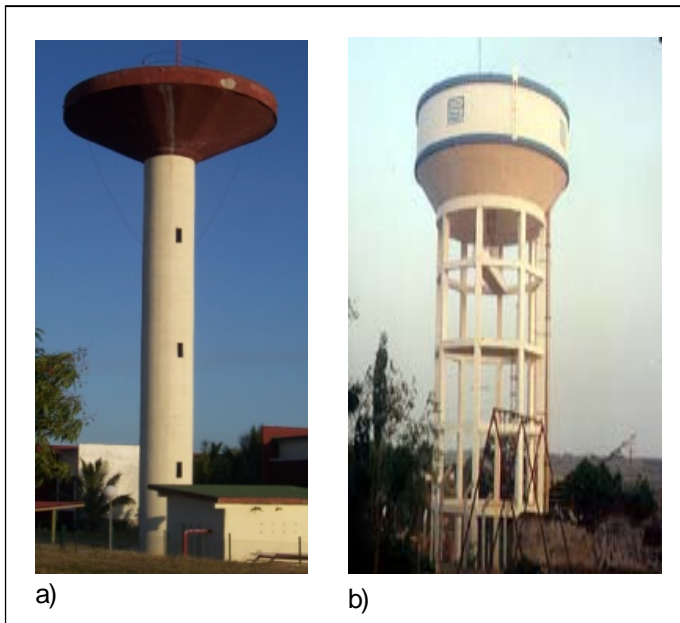


Fig. 4. a) Depósito elevado tipo güira; b) Tipo Intze.

Sin embargo, la política de pago de las construcciones en función del volumen de hormigón puesto en obra limitó, a partir de la década de 1980, la aplicación de soluciones ingenieriles que minimizaran su consumo, quedando abandonados proyectos de cimientos y otras estructuras

laminares que por entonces se gestaban en esta Universidad para su aplicación a depósitos elevados y chimeneas. [13-15] Una forma de revertir dicha situación, es retribuir a proyectistas y constructores la implementación de técnicas de diseño y procedimientos que signifiquen ahorro sustancial de recursos y tiempo en la ejecución de obras civiles, así como reduzcan los impactos negativos en el medio ambiente.

A lo largo de más de 50 años de ingeniería civil revolucionaria, en Cuba se han creado las tres fuentes que sustentan la tecnología para la aplicación de cimientos laminares: [16] *el conocimiento científico* (la teoría membranal con efecto de alteración simple, aplicada a través de los procedimientos matemáticos de coordenadas relativas desarrollados primeramente por el doctor José "Pimpo" Hernández [17] y perfeccionadas por el doctor Ángel Emilio Castañeda Hevia; [18-22]) *el quehacer tecnológico* (en la continua búsqueda de conocimientos y experiencias en el tema, respaldada por la elaboración de numerosos proyectos y tesis de grado que garantizan la reducción de costos en términos de volumen de materiales de construcción) y *la práctica concreta* (reflejada en la construcción de edificios, depósitos elevados tipo güira y chimeneas para la industria azucarera, así como la ejecución de varias de estas estructuras [6,8] sobre cimientos laminares).

Con la tutoría del doctor Ángel Emilio Castañeda Hevia, la ingeniería geotécnica cubana ha tenido importantes avances científicos en la rama de cimentaciones laminares, consistentes en nuevas formulaciones que interpretan más acertadamente el comportamiento geotécnico y estructural de esta tipología de cimentaciones. Se hace referencia a los resultados de varias investigaciones de maestría [3,4,15,23] y una importante investigación doctoral concluida, [24] que corroboran el incremento de la capacidad de carga y el mejor comportamiento tenso-deformacional del suelo bajo los cimientos laminares en comparación con lo que ocurre en cimientos de base plana e igual área, [25-28] llegando a establecer formulaciones que facilitan su diseño y aplicación. A estas investigaciones científicas contribuyeron sistemáticamente numerosos trabajos de diploma (10 de ellos realizados en el período 2002-2012), que hicieron aportes al desarrollo de las formulaciones y exploraron las modernas herramientas computacionales de análisis matemático: GeoSlope, PLAXIS y ABAQUS. Un compendio de medio siglo de importantes avances en el conocimiento y la aplicación de estructuras laminares en Cuba puede apreciarse en el artículo publicado sobre este tema en la *Revista Ingeniería de Construcción*. [29]

El proceso de generación y desarrollo de la tecnología de cimientos laminares tiene como punto de partida las necesidades sociales y económicas de construir depósitos elevados y chimeneas, entre otras estructuras esbeltas. En las actuales condiciones económicas de Cuba es necesario que el nuevo modelo de desarrollo económico sea sostenible

también con un análisis integrado de aspectos que consideren los temas de ahorro de recursos, beneficios sociales e impacto ambiental; la experiencia demuestra que un problema de innovación tecnológica no puede estar ajeno a las condiciones del sector productivo, cuyas características nacionales en la rama de las construcciones civiles se resumen a:

1. La disponibilidad de un capital humano capacitado para aplicar nuevas tecnologías, gracias al alto nivel educacional de la universidad técnica cubana. Una parte de este capital humano se encuentra hoy fuera del sector productivo para el que está capacitado lo que constituye un problema social. Otra parte se encuentra en universidades y demás instituciones de enseñanza, en las que no constituye hábito o se ha erradicado la participación de los profesionales en procesos inversionistas y productivos.

2. La baja eficiencia resultante de aplicar conceptos y tecnologías atrasadas, obligados por el bloqueo imperialista, y también por concepciones erróneas en la aplicación de métodos de construcción, entre las que se destaca el "pago de ejecución por volumen de hormigón puesto en obra", política empresarial asociada a la complejidad del proceso que inicia con la elaboración del hormigón y las armaduras, traslado y colocación, hasta la obtención del elemento estructural, que pasa por alto la influencia de la modernización y eficiencia actual del equipamiento para realizar este proceso, así como la fuente de recursos que se distingue en el ahorro de materiales de construcción.

3. La frecuente primacía de cumplir el factor *tiempo de construcción* de las obras, en detrimento de la calidad y el costo económico de las mismas.

En términos de *paradigma*, se trata de transformar la concepción en la ejecución de estructuras en las que costo económico es eclipsado por el concepto de seguridad, por un nuevo concepto de reducción de costos con iguales o superiores factores de seguridad. Al respecto, el propio doctor Sixto Ruiz Alejo expresó: "La mayor dificultad que tienen las estructuras laminares en nuestro país, es la tendencia que existe a continuar haciendo aquello que estamos acostumbrados a hacer". Las chimeneas de centrales azucareros y los depósitos elevados tipo güira, constituyen cultura tecnológica establecida por más de cuatro décadas en la ingeniería civil cubana. Por tanto, se trata de la extensión, hasta el cimiento, de la *identidad cultural ingenieril* que constituyen las estructuras laminares aplicadas al fuste y al depósito. [30]

APORTE ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE CIMIENTOS LAMINARES EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS ESBELTAS

El primer ejemplo de aporte económico obtenido al aplicar una cimentación laminar en Cuba se remonta al año 1958, cuando por razones puramente económicas se decidió la

aplicación del cimiento laminar de placa poligonal al edificio de 94m de altura actual sede del MINFAR. [6]

La solución de cimentación de la torre constituyó el problema central, debido a que la carga total dividida por la capacidad portante del suelo daba un área mayor que el área de la proyección horizontal de la estructura, y a esto habría que sumarle el efecto de la carga de viento. Se plantearon dos alternativas: balsa plana soportada por pilares profundos, y balsa tipo lámina quebrada (Folded Plate Slab, figura 5). La balsa tipo lámina quebrada fue escogida por encima de la balsa plana ya que los cálculos económicos apuntaban a una voluminosa cimentación en balsa tradicional que fue estimada en \$ 252 052,03 según costos de la época. Se concibió entonces la idea de usar el mismo principio de apoyo virtual que se aplica para las cubiertas tipo losa quebrada, construidas con estructuras laminares ligeras trabajando a flexión en dos direcciones. La solución era entonces una lámina de 0,45 m de espesor y vigas profundas, cuyo costo fue de \$ 175 055,00, es decir, 30 % menor que la tradicional. Cuenta el propio doctor Sixto Ruiz Alejo que su convicción y argumentos ingenieriles al exponer la solución (pionera de su tipo en Cuba y en el mundo) lograron el "cambio de mentalidad", que sirvió de base a la escuela cubana para la utilización de las estructuras laminares también como fundación de edificaciones.

La lámina quebrada se diseñó de forma tal que su superficie inclinada de apoyo se pudo conformar fácilmente con una motoniveladora y la losa pudo ser hormigonada sin usar cofre superior, haciendo aún menores los costos de ejecución, aunque los mismos no se cuantificaron.

Sobre la base de esta experiencia económica, se construyeron otras tres obras con cimientos laminares entre los años 1960 y 1980. La primera de estas es el depósito elevado tipo güira de la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos, de 300 m³ de capacidad y 20 m de altura, cuyo cimiento se caracteriza por una sección transversal en forma de campana de Gauss con espesor de lámina de apenas 20 cm y núcleo de suelo configurado a partir del terreno natural (figura 6), lo que permitió economizar energía en volumen de excavación y resultando un domo que sus constructores denominaron "helado de chocolate".

Este depósito elevado está constituido completamente (cimiento, fuste y tanque) por estructuras laminares de diferentes curvaturas cuyo análisis permitió a su autor, el doctor José "Pimpo" Hernández Pérez, perfeccionar el método matemático de las coordenadas relativas. Acerca de la experiencia adquirida en esta obra, el eminente ingeniero expresó: "Se debe analizar siempre ante un proyecto la posibilidad de emplear estructuras, tanto laminares, como tradicionales, *porque el ingeniero, cuando está en función total como proyectista, tiene que anteponer la necesidad social contra la cual está proyectando, fundamentalmente ante su gusto personal. Cada cosa tiene*

su uso, cada material tiene su función y cada tipo de estructura tiene su necesidad. [...] Las estructuras laminares no son solo de interés para arquitectos y diseñadores, sino también de los ingenieros estructurales, ya que *todos están llamados a resolver una necesidad social*. [...] Desde luego, existen dificultades reales en las estructuras laminares, en cuanto a que son de verdad más difíciles de construir y prefabricar, pero la economía de materiales es tal, por ejemplo, en el caso de la cimentación puede llegar hasta 50 %, que sería de gran provecho desarrollar este campo". [13] En contraposición a las dificultades constructivas enunciadas por el ingeniero "Pimpo" Hernández, el constructor a cargo de esta obra, Abilio Luis, expresó al respecto: "La solución dada a ese cimiento fue la mejor, tanto desde el punto de vista de ahorro de materiales, como en las facilidades del trabajo, sobre todo en el replanteo. Otra solución, por ejemplo, una tradicional, hubiese resultado más difícil. Este es el mejor de todos porque sale de una vez". [13]

El segundo depósito elevado tipo güira, de 280 m³, sobre cimiento laminar (en este caso de geometría tronco-cónica, figura 7), fue construido en el Instituto de Ciencia Animal (ICA), en Catalina de Güines. En la construcción de este depósito se perfecciona la geometría de su precedente, la que finalmente se adoptó en los demás depósitos de su tipo construidos en Cuba y en el resto del mundo.

La tercera estructura esbelta, en este caso un faro de 50 m de altura (figura 8), se construyó en Cayo Guano del Este (Isla de la Juventud), también sobre cimiento laminar tronco-cónico, similar al caso anterior.

De los casos antes mencionados, que son parte del patrimonio construido, no se encuentran documentos que precisen el aporte económico de las soluciones de cimentación adoptadas en comparación con las tradicionales. Sin embargo, a continuación se citan los resultados de los estudios económicos realizados por el doctor Willian Daniel Cobelo Cristiá y el máster William Gándara Hidalgo en sus tesis de maestría, aplicados a soluciones de cimentación de chimenea corta y depósito elevado tipo güira, respectivamente.

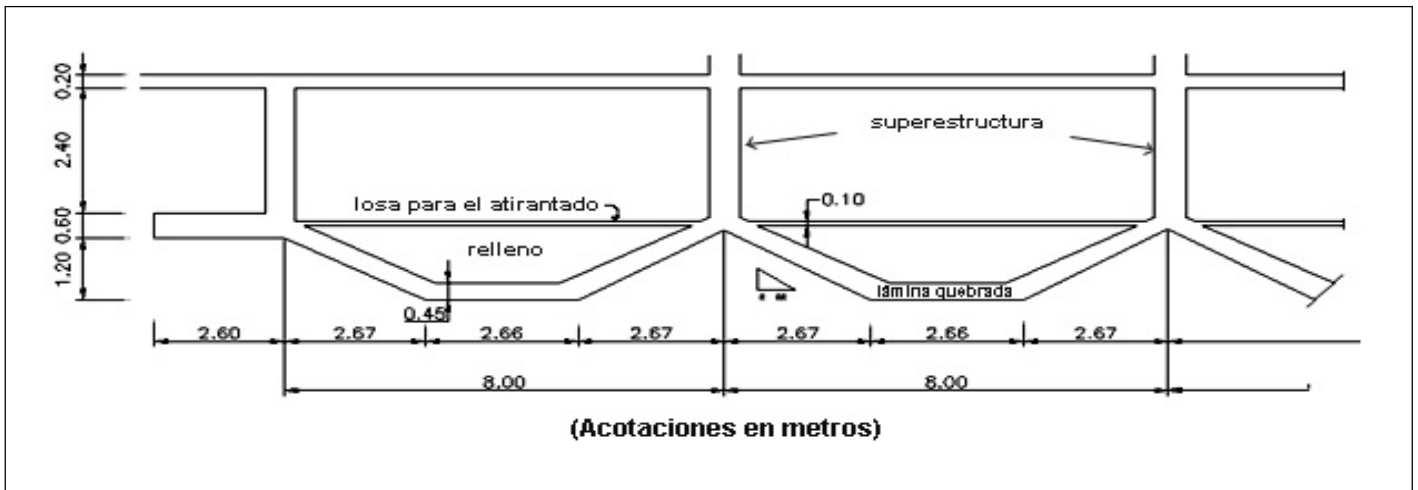


Fig. 5. Cimiento tipo lámina quebrada aplicado al edificio de 94 m de altura. [6,29]

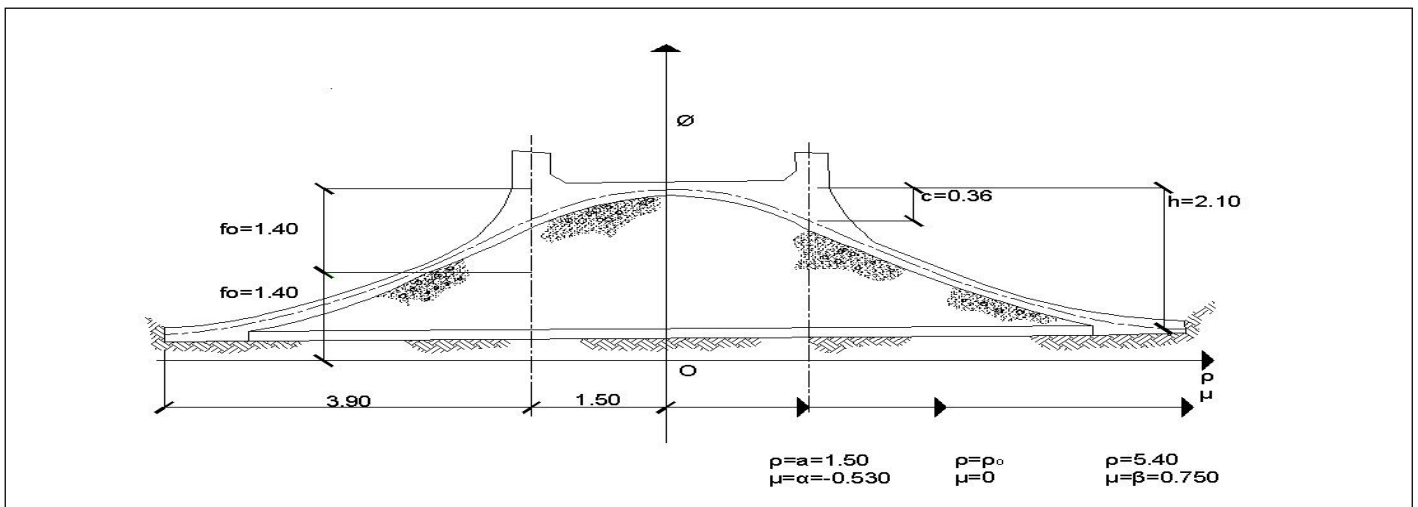


Fig. 6. Cimiento en forma de campana de Gauss del depósito elevado tipo güira construido en la sede universitaria de Matanzas. [8,36]

La chimenea corta (de 74,5m de altura) es típicamente utilizada en la industria azucarera. Las ventajas económicas de la solución de cemento laminar de revolución para esta chimenea respecto a la solución tradicional de cimentación en iguales condiciones geotécnicas se cuantifican en la tabla 1 (los costos en pesos, moneda nacional, se refieren al año en que se realiza el estudio: 1996). Los aportes con signo positivo (en volumen de hormigón, costo de hormigón y costo total de la solución) significan un valor de ahorro de recursos (materiales y monetarios). En general, el cemento laminar solo alcanza el 44,7 % en costo del cemento tradicional plano. En el caso del depósito elevado tipo güira, la inversión de recursos materiales y monetarios de cimentación se compara en la tabla 2. En este caso, el cemento laminar alcanza el 77,6 % del costo total del cemento tradicional plano.

La ventaja de aplicar la solución de cemento laminar en chimeneas cortas y depósitos elevados tipo güira se puede traducir en ahorro de combustible (fuel oil y crudo nacional) para producir aglomerante (cemento Portland), ya que permite un menor consumo del mismo. Para un análisis más detallado de este aspecto, téngase en cuenta que se requieren 310 kg de cemento P-350 para obtener 1 m³ del hormigón de 25 MPa que exigen las estructuras de cimentación. En Cuba se aplican además dos formas o vías de producción del cemento Portland: húmeda y seca, utilizándose para ello fuel oil o crudo nacional. A continuación se muestran los volúmenes de combustible (expresados en toneladas) que dejan de consumirse en la fabricación de cemento Portland, con la aplicación de un cemento laminar en la construcción de chimenea corta (tabla 3) y depósito elevado tipo güira (tabla 4).

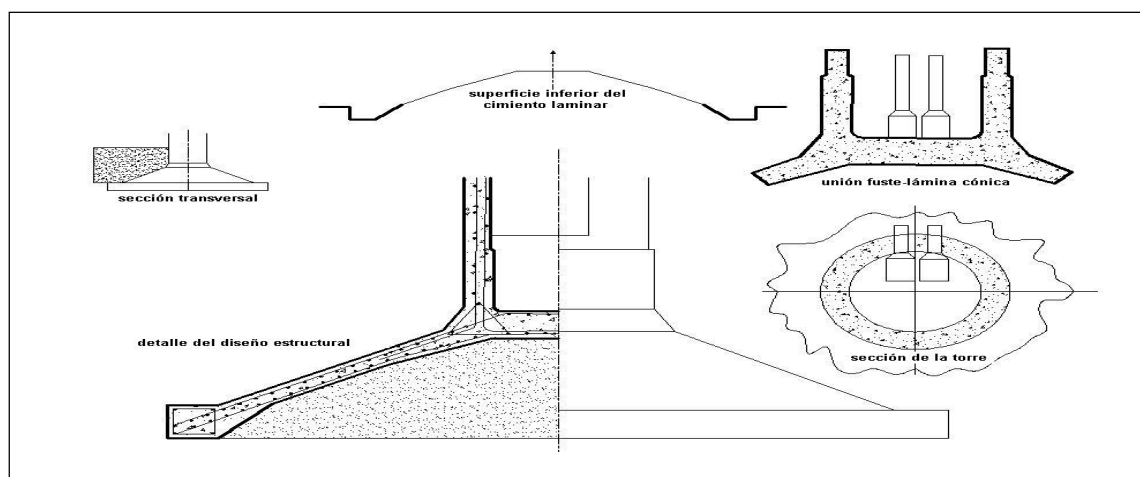


Fig. 7. Detalles del cemento aplicado en la construcción del depósito elevado tipo güira del Instituto de Ciencia Animal, en Catalina de Güines. [8,29]



Fig. 8. Faro de 50 m de altura sobre cemento laminar, construido en Cayo Guano del Este.

En términos de impacto ambiental, es posible valorar la ventaja de aplicar una estructura de cimentación que requiere menor consumo de cemento en su construcción, teniendo en cuenta que, en general, se emiten a la atmósfera aproximadamente 0,90 t de CO₂ por tonelada de cemento producida con la tecnología disponible actualmente en el país (independientemente del tipo de proceso de producción: vía húmeda o vía seca). Toda acción que contribuya al máximo aprovechamiento del cemento Portland resulta valiosa, teniendo en cuenta la agresividad medioambiental de esta industria. La tabla 5 compara los volúmenes de CO₂ emitidos a la atmósfera en el proceso de producción del cemento que demandan los cimientos laminares y sus equivalentes planos para chimeneas y depósitos elevados.

La cantidad de CO₂ que se genera en la producción de cemento para suplir la demanda de construcción de cimientos tradicionales de chimenea corta es más de cinco veces la que se genera para suplir la de construir cimientos laminares. En el caso de los depósitos elevados tipo güira, la utilización de cimientos tradicionales implica la emisión de más del doble de CO₂ por fabricación de cemento, respecto a la aplicación de cimientos laminares.

Tabla 1
Volumen y costo de materiales en la aplicación de dos soluciones de cimentación: laminar tronco-cónico y tradicional plano, a chimenea corta

Solución de cimentación	Volumen de hormigón (m³)	Costo total del hormigón (\$)	Masa total de acero (t)	Costo total del acero (\$)	Costo total de la solución (\$)
Laminar tronco-cónico	81,90	2 492,22	19,41	5 918,86	8 411,08
Tradicional plano	446,00	13 571,78	17,28	5 228,98	18 800,76
Aporte económico (laminar vs. tradicional)	+364,10	+11 079,56	-2,13	-689,88	+10 389,68

Tabla 2
Volumen y costo de materiales en la aplicación de dos soluciones de cimentación: laminar tronco-cónico y tradicional plano, a depósito elevado tipo güira

Solución de cimentación	Volumen de hormigón (m³)	Costo total del hormigón (\$)	Masa total de acero (t)	Costo total del acero (\$)	Costo total de la solución (\$)
Laminar tronco-cónico	28,91	879,73	4,27	1300,03	2 179,76
Tradicional plano	64,86	1 973,89	2,76	834,90	2 808,79
Aporte económico (laminar vs. tradicional)	+35,95	+1 094,06	-1,51	-465,13	+629,03

Tabla 3
Volumen de combustible (fuel oil o crudo nacional) que deja de consumirse en producción de cemento Portland, por cada cimiento laminar aplicado a chimenea corta

Cantidad de combustible que se ahorra (t)	En producción de cemento P-350	
	Vía húmeda	Vía seca
Fuel oil	19,53	13,09
Crudo nacional	20,43	13,66

Tabla 4
Volumen de combustible (fuel oil o crudo nacional) que deja de consumirse en producción de cemento Portland, por cada cimiento laminar aplicado a depósito elevado tipo güira

Cantidad de combustible que se ahorra (t)	En producción de Cemento P-350	
	Vía húmeda	Vía seca
Fuel oil	1,93	1,29
Crudo nacional	2,02	1,35

Tabla 5
Comparación de los volúmenes de CO₂ emitidos en producción de cemento Portland en función del tipo de cimiento y la superestructura

Solución de cimentación	Cantidad de CO ₂ emitida en producción de cemento para un cimiento (t)	
	Para chimenea corta	Para depósito elevado tipo güira
Laminar tronco-cónico	22,85	8,07
Tradicional plano	124,43	18,09

De las estadísticas referidas puede afirmarse que la ingeniería civil cubana puede contribuir al desarrollo sostenible, mediante la aplicación de cimientos laminares, pues con ello "satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias". [31]

CONCLUSIONES

La aplicación de cimentaciones laminares a estructuras esbeltas en Cuba constituye cultura tecnológica establecida y enriquecida a través de investigaciones teóricas y procedimientos particulares de análisis y diseño de cáscaras, divulgados en defensas de tesis de grado y publicaciones relevantes, entre los que se distinguen el método de las coordenadas relativas, su unificación y generalización con los métodos tradicionales de la geometría diferencial de cáscaras de diferentes espesores, y los nuevos criterios definidos a través de la aplicación de herramientas computacionales de análisis matemático teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura y el efecto de cargas de viento.

La experiencia práctica adquirida en cuatro obras específicas refuta el criterio de dificultad que se atribuye a la ejecución de bases laminares. La comparación cuantitativa entre volúmenes de materiales e impacto ambiental de las tipologías tradicional y laminar de cimentación aplicadas a chimenea y depósito elevado tipo güira arroja un saldo positivo en favor de esta última, que garantiza una reducción de costo entre 55 % (en el caso de la chimenea) y 25 % (en el depósito elevado tipo güira), introduciendo el concepto de economía junto al de seguridad. El estricto control de ejecución, la pericia de los constructores y el dominio de las bases de cálculo por parte de los proyectistas continúan siendo tareas pendientes, cuya solución encuentra marco propicio en la actualización del modelo económico cubano.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los profesores del Departamento de Ciencias Sociales de la Cujae, quienes realizaron una profunda revisión de este trabajo y propusieron recomendaciones sobre los conceptos aplicados en el mismo y al doctor Sixto Ruiz Alejo, por su valioso testimonio.

REFERENCIAS

1. **CIESIELSKI, R.** "Shell Foundations for Tower-Shaped Structures". *Proc. of the Symposium on Tower-Shaped Steel and Reinforced Concrete Structures*. Bratislava. Czechoslovakia, pp. 337-346, 1966.
2. **KURIAN, N.** *Modern Foundations. Introduction to Advanced Techniques*. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1983.
3. **COBELO, W. D.** "Solución de cimiento laminar de revolución para chimeneas cortas". Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 1996.
4. **GÁNDARA, W. J.** "Soluciones de cimentación para depósitos elevados tipo güira en condiciones geotécnicas medias". Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 1997.
5. **ALMAGUER RIVERÓN, C.** "Universidad y Cultura de tecnología apropiada". *Tecnología y Sociedad*. t 1, La Habana, Cuba, 1998. ISBN 959-16-0021-6.
6. **RUIZ ALEJO, S.; MARTIN, I.** "Folded Plate Raft Foundation for 24-Story Building". *Journal of the American Concrete Institute*. vol. 31, núm. 2, USA, August, 1959.
7. **PÜCHER, A.** *Über den Spannungszustand in dekrümmten Flächen*, Beton und Eisen, 1934.
8. **HERNÁNDEZ PÉREZ, J. E.; RUBIERA, J. R.** "Depósito elevado totalmente laminar". *Revista Ingeniería Civil*, Órgano Oficial del Colegio de Ingenieros Civiles. vol. XVIII, núm. 12, diciembre, La Habana, Cuba, 1968.
9. **HERNÁNDEZ PÉREZ P.; ESCALONA, F.; RONDA A.** "Estructuras laminares: Teoría y aplicaciones", *Revista Ingeniería Civil*, núm. 4-1973; núm 2-1974; núm. 5-1974; núm. 4-1975 y núm. 6-1975. Centro Técnico Superior de la Construcción, Instituto del Libro, La Habana, Cuba, 1973-1975.
10. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Unificación de las coordenadas relativas con los métodos tradicionales de análisis de las cáscaras", *Ingeniería Estructural*, vol. V, núm. 1, La Habana, Cuba, 1984.
11. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Análisis de la analogía estático-geométrica de la teoría de las tensiones y las deformaciones". Tesis de Doctorado, Instituto de Ingeniería de la Construcción de Moscú, URSS, 1985.
12. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Coordenadas relativas entre dos medios tridimensionales". *Ingeniería Estructural y Vial*. vol. XVI, núm. 1, La Habana, Cuba, 1995.
13. **FLEITES FUNES, A.; FERRO MIRANDA, Y.** "Aplicación de estructuras laminares en cimentaciones de depósitos elevados tipo güira en Cuba". Trabajo de Diploma, Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 1979.
14. **NGOC, P.** "Análisis de cimiento laminar con anillo de borde". Tesis de Diploma. Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 1982.
15. **FERREIRO, Y.** "Proyecto de cimentación laminar de depósitos apoyados de 5 000 m³ y 10 000 m³ de capacidad". Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 1996.
16. **SAÉNZ, T. W.** "Ingenierización e innovación tecnológica". *Tecnología y Sociedad*. t 1, Cujae, La Habana, Cuba, 1998. ISBN 959-16-0021-6.
17. **HERNÁNDEZ PÉREZ, J. E.** "Unified Approach to the membrane Theory of Shells". *Revista Tecnología*. Serie 2: Ingeniería Civil, núm. 11, Universidad de La Habana, Cuba, octubre, 1970.
18. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Método de cálculo de cáscaras en coordenadas relativas con deformaciones proyectadas". Tesis de Candidatura. Instituto de Ingeniería de la Construcción de Moscú, URSS, 1982.
19. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Teoría membranal de las cáscaras en coordenadas relativas con deformaciones proyectadas". *Revista Ingeniería Civil*, vol. XXXIII, núm. 5, La Habana, Cuba, 1982.
20. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Teoría general de las cáscaras elásticas en coordenadas relativas con deformaciones proyectadas (1ra. parte)". *Ingeniería Civil*, vol. XXXIV, núm. 1, enero-febrero, La Habana, Cuba, 1983.
21. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Teoría general de las cáscaras elásticas en coordenadas relativas con deformaciones proyectadas (2da. parte)". *Ingeniería Civil*, vol. XXXIV, núm. 2, marzo-abril, La Habana, Cuba, 1983.
22. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.** "Condiciones de borde de las ecuaciones generales de las cáscaras en coordenadas relativas". *Ingeniería Estructural*, vol. IV, núm. 3, La Habana, Cuba, 1983.
23. **HARAMBOURE GLEZ, Y.** "Estudio comparativo de cimientos laminares bajo carga axial-simétrica para torres de chimenea de 74,5m en Cuba". Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 2010.
24. **COBELO, W. D.** "Contribución al análisis estructural y al diseño geotécnico de cimentaciones tronco cónicas bajo carga axial-simétrica en estructuras tipo torre". Tesis de Doctorado, Cujae, La Habana, Cuba, 2004.
25. **RAHMAN, M. A.** "Geotechnical Behavior of Shell Foundations". Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concordia, Montreal, Canadá, 1996.
26. **HUAT, B. B. K.; MOHAMMED, T. A.** "Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings". *Journal of Computer Science*, vol. 2, núm.1, pp. 104-108, 2006. ISSN 1549-3636.

27. **ESMAILI, D.; HATAF, N.** "Experimental and Numerical Investigation of Ultimate Load Capacity of Shell Foundations on Reinforced and Unreinforced Sand". *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, vol. 32, núm. B5, pp. 491-500, República Islámica de Irán, 2008.
28. **YAMAMOTO, K.; LYAMIN, A. V.; ABBO, A. J.; SLOAN, S. W.; HIRA, M.** "Bearing Capacity and Failure Mechanism of Different Types of Foundations on Sand". *Journal of Soil and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, vol. 49, núm. 2, pp. 305-314, 2009.
29. **CASTAÑEDA HEVIA, A. E.; COBELO CRISTIÁ, W. D.; HARAMBOURE GLEZ, Y.; ÁLVAREZ PÉREZ, J.** "Una mirada a medio siglo de cimentaciones laminares, métodos de cálculo e investigaciones asociadas en Cuba". *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 26, núm.3, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2011. ISSN 0718-5073.
30. **ARANA ERCILLA, M.; CALDERÍN GONZÁLEZ, C.; VALDÉS MONTALVO, N.** "La cultura tecnológica en el ingeniero y el cambio de paradigma". *Tecnología y Sociedad*, t 1, Cujae, La Habana, Cuba, 1998. ISBN 959-16-0021-6.
31. **ARANA ERCILLA, M.; VALDÉS ESPINOSA, R.** "Tecnología apropiada: una concepción para una cultura". *Tecnología y Sociedad*, t 1, Cujae, La Habana, Cuba, 1998. ISBN 959-16-0021-6.

AUTORES

Yoermes Glez Haramboure

Ingeniero Hidráulico, Máster en Ingeniería Civil, Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Willian Daniel Cobelo Cristiá

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Social-Economic Criteria about the Application of Shell Foundations

Abstract

This paper provides arguments about the relevance of research and application of shell foundations, from a literature review that sets the theoretical and practical development attained by Cuban civil engineering in this field. It identifies several Cuban buildings with great social and economic importance, where the use of shell foundations helped to reduce the construction cost, and construction difficulties attributed to its execution were refuted. Are mentioned the main theoretical contributions and studies that established equations and calculation methods applied to shells for «tower» structures foundations. By comparison in terms of volumes of materials, costs, volumes of fuel consumed and CO₂ emitted into the atmosphere in cement production, this article concludes on economic and environmental advantages of implementing shell foundations with respect to traditional flat base foundations in elevated tanks type «Güira» and chimneys for sugar industries.

Key words: shell foundations, social-economic criteria, elevated tanks, chimneys