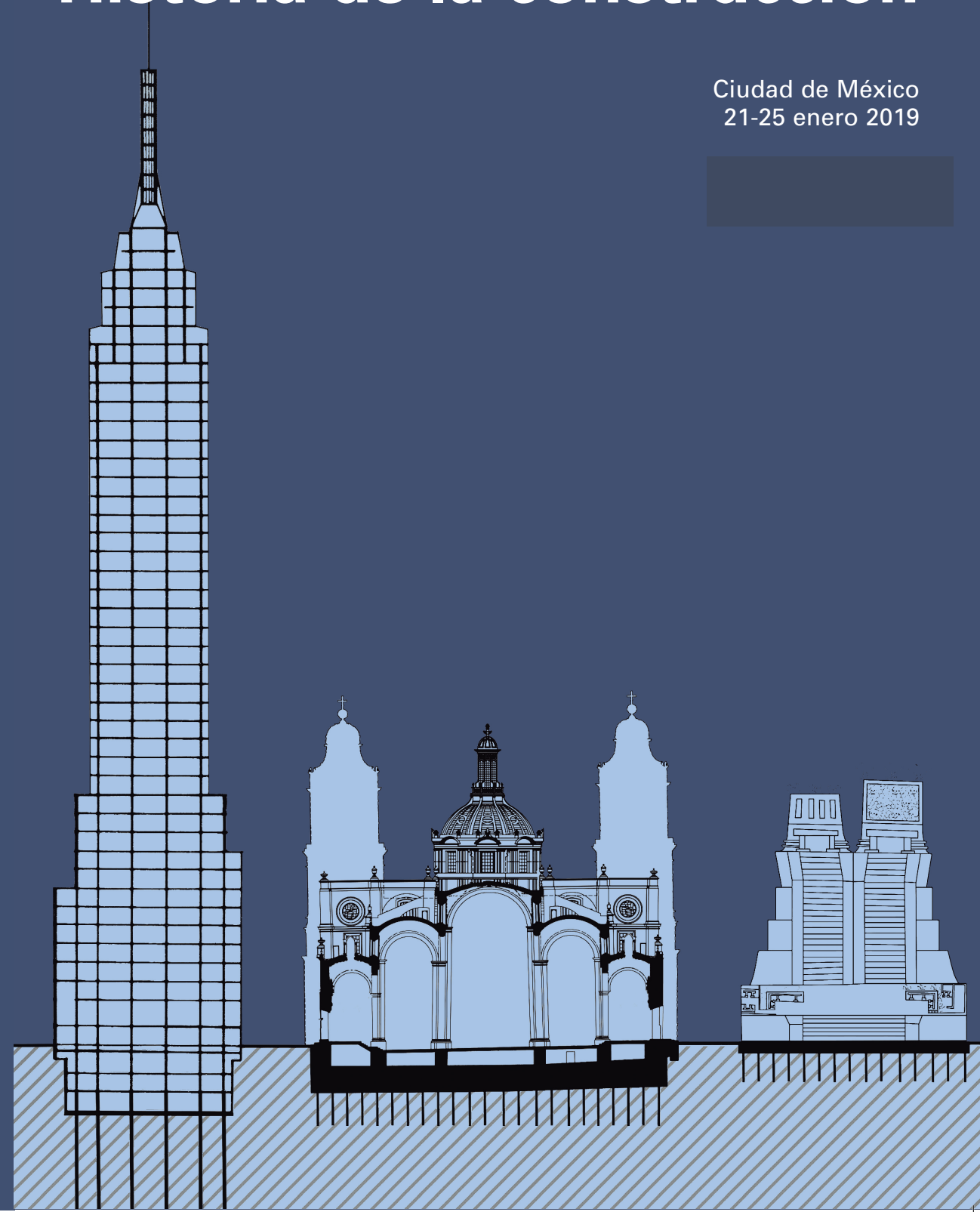


Tercer Congreso Internacional Hispanoamericano de
Historia de la construcción

Ciudad de México
21-25 enero 2019

Tercer Congreso Internacional Hispanoamericano de
Historia de la construcción



ISBN: 978-84-9728-571-1



9 788497 285711

TEXTOS SOBRE TEORÍA E HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES
Colección dirigida por Santiago Huerta

- M. Arenillas et al. (Eds.). **Actas del V Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- F. Bores et al. (Eds.). **Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- A. Buchanan et al. (Eds.). **Robert Willis. Science, Technology and Architecture in the Nineteenth Century**
- A. Casas et al. (Eds.). **Actas del I Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- A. Choisy. **El arte de construir en Roma**
- A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio**
- A. Choisy. **El arte de construir en Egipto**
- A. Choisy. **Historia de la arquitectura** (en preparación)
- Del Cueto Ruiz-Funes, J. I. et al. (Eds.). **Actas del III Congr. Int. Hispanoamericano de Historia de la Construcción**
- I. J. Gil Crespo. (Ed.). **Historia, arquitectura y construcción fortificada**
- J. Girón y S. Huerta. (Eds.) **Auguste Choisy (1841-1909). L'architecture et l'art de bâtir**
- A. Graciani et al. (Eds.). **Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- R. Guastavino. **Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura**
- J. Heyman. **Análisis de estructuras: un estudio histórico**
- J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica**
- J. Heyman. **Geometry and Mechanics of Historic Structures**
- J. Heyman. **La ciencia de las estructuras**
- J. Heyman. **Teoría básica de estructuras**
- J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. 2 vols.**
- J. Heyman. **Vigas y pórticos**
- S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas**
- S. Huerta (Ed.). **Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VI Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- S. Huerta y F. López Ulloa (Eds.). **Actas del VIII Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
- S. Huerta y P. Fuentes (Eds.). **Actas del I Congreso Int. Hispanoamericano de Historia de la Construcción**
- S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del II Congreso Int. Hispanoamericano de Historia de la Construcción**
- S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América**
- S. Huerta (Ed.). **Essays in the History of the Theory of Structures, in Honour of Jacques Heyman**
- S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the 1st International Congress on Construction History**
- J. Monasterio. **Nueva teórica sobre el empuje de las bóvedas** (en preparación)
- J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII**
- H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción** (en preparación)
- G. E. Street. **La arquitectura gótica en España**
- H. Thunnissen. **Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura**
- A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas**
- E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval**
- R. Willis. **La construcción de las bóvedas en la Edad Media**

Actas del III Congreso Internacional Hispanoamericano de
Historia de la Construcción

TERCER CONGRESO INTERNACIONAL HISPANOAMERICANO DE HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN
Ciudad de México, 21 –25 enero 2019

Organizado por:

Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional
Autónoma de México (FA-UNAM)
Sociedad Española de Historia de la Construcción

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la
Universidad Politécnica de Madrid
Instituto Juan de Herrera

Colaboran y auspician:

División de Educación Continua y Actualización Docente
(DECAD FA-UNAM)
Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y
Paisaje (CIAUP FA-UNAM)
Instituto de Ingeniería, UNAM (II-UNAM)
Instituto Nacional de Antropología e Historia
Instituto Nacional de Bellas Artes

Instituto Politécnico Nacional
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco
Universidad Autónoma de Yucatán
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Presidente

Xavier Cortés Rocha

Director

Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes

Coordinación General

Isaura González Gottdiener
Jimena Torre Rojas
Valeria M. Méndez Pineda

Revisión de textos

Alejandra Contreras Padilla
Pablo Gómez Porter
Alejandro Leal Menegus

Comité Organizador

Luis Carlos Bustos Reyes
Mónica Cejudo Collera
Paula Fuentes González
Ignacio Javier Gil Crespo
Benjamín Ibarra Sevilla

Enrique Lastra de Wit
Roberto Meli Piralla Leopoldo
Rodríguez Morales
Manuel Rodríguez Viqueira
Francisco José Santos Zertuche

Mónica Elena Silva Contreras
Francisco Javier Soria López
Ricardo Antonio Tena Núñez

Comité Científico Internacional

Presidente: Santiago Huerta

Bill Addis
Antonio Almagro Gorbea
Luis Arnal Simón
Ricardo Aroca Hernández-Ros
Antonio Becchi
Philippe Bernardi
Tamara Blanes Martín
Dirk Bühler
Carlos A. Cacciavallani
José Calvo López
Mario Frc. Ceballos Espigares
Xavier Cortés Rocha
Beatriz Del Cueto
Juan Ignacio Del Cueto
Maria Grazia D'Amelio
Virginia Flores Sasso
Paula Fuentes
Jorge Galindo Díaz
Rafael García García
Ignacio J. Gil Crespo
Amparo Graciani

Benjamín Ibarra-Sevilla
Fabián López Ulloa
Rafael Marín Sánchez
Joao Mascarenhas Mateus
Roberto Meli Piralla
Luis Alberto Müller
Stella Nair
Sandra Negro Tua
John Ochsendorf
Esteban Prieto Vicioso
Enrique Rabasa
Isabel Sardón
Mónica Silva Contreras
Pierre Smars
Daniel Taboada
Hernando I. Vargas Caicedo
Sandrine Victor
David Wendland
Arturo Zaragoza

Comité Científico Local (México)

Coordinador: Agustín Hernández
Hernández

Eugenia María Azevedo Salomao
Luis Carlos Bustos Reyes
Mónica Cejudo Collera
Pablo Chico Ponce de León
Elisa Drago Quaglia
Agustín Hernández Hernández
José Huchim Herrera
Isaura González Gottdiener
Diana Ramiro Esteban
Leopoldo Rodríguez Morales
Roberto Sánchez Ramírez
Francisco Santos Zertuche
Javier Soria López
Bertha Tello Peón
Lucía Tello Peón
Ricardo Antonio Tena Núñez
José Antonio Terán Bonilla
Jimena Torre Rojas
Cristina Vaccaro Cruz
Julio Valencia Navarro
Alejandro Villalobos Pérez

III Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción

Ciudad de México, 21 – 25 de enero de 2019

Presentación

Xavier Cortés Rocha

Prólogo

Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes

Edición a cargo de

Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes

Valeria M. Méndez Pineda

Santiago Huerta

con la colaboración de

Agustín Hernández Hernández

Isaura González Gottdiener

FACULTAD DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN
INSTITUTO JUAN DE HERRERA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Universidad Nacional Autónoma de México

Enrique Luis Graue Wichers
Rector

Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General

Facultad de Arquitectura

Marcos Mazari Hiriart
Director

Juan Carlos Hernández White
Secretario General

Luis de la Torre Zatarain
Secretario Académico

Leda Duarte Lagunes
Secretaria Administrativa

Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes
Coordinador del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP)

Héctor Ferreiro León
Jefe de la División de Educación Continua y Actualización Docente (DECAD)

Alejandra González Olvera
Coordinación de Difusión Cultural

Erandi Casanueva Gachuz
Coordinación Editorial



© Instituto Juan de Herrera

ISBN:978-84-9728-570-4 (Obra completa); ISBN: 978-84-9728-571-1 (Vol. I)

Depósito legal: M-1135-2019

Fotocomposición e impresión: GRACEL

Libros Juan de Herrera: librosjuandeherrera.wordpress.com

Índice

Volumen I

Presentación. *Xavier Cortés Rocha* xiii

Prólogo. *Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes* xv

COMUNICACIONES

Alarcón Azuela, Eduardo Las cubiertas para la estación del metro Candelaria: el máximo refinamiento de los cascarones en abanico 1

Alfaro Salazar, Francisco Haroldo. Una aventura en Concreto Armado. El Acueducto de Xochimilco 7

Alho, Ana Patricia y Pedro Machado. Del Cielo al Suelo: el circuito del agua en el Real edificio de Mafra 19

Alonso Hernández, Jorge Ernesto. Sistema Top – Down en la Ciudad de México 31

Alvarado Castañeda, Alejandra. Ferrocemento dentro de la Arquitectura orgánica en México 39

Ampliato Briones, Antonio Luis y Juan Clemente Rodríguez Estévez. Sobre la discutida identidad Arquitectónica de Diego de Riaño en la transición del gótico al Renacimiento en España 49

Atienza Fuente, Javier: La labor de los Marmorarii en el complejo termal occidental de la ciudad hispanorromana de Valeria (Cuenca, España): Estudio de las marcas y trazos realizados sobre elementos constructivos y decorativos pétreos recuperados en las camañas de Excavación de 2017 y 2018 63

Ávalos Beltrán, Esteban. La arquitectura monumental de tierra prehispánica en México durante los periodos Preclásico y Clásico (1,700 A.C. – 1,000 D.C.) 73

Ayala Ortega, Luis Alfredo y Eugenia María Azevedo Salomao. Tradición constructiva de la vivienda en Tierra Caliente, Michoacán, México 81

Balaguer Dezcallar, Josefa y Luis Vicén Banzo. Estudio de las construcciones históricas que formaron parte del conjunto defensivo y portuario del “Grau Vell” de Sagunto (Valencia) entre los siglos XVI y XVIII 91

Baró Zarzo, José-Luis, Rosa-María Pastor Villa y Carme Villar Bosch. Las alquerías de la seda. Viaje por la arquitectura hortícola valenciana de los siglos XVII y XVIII 101

Boils Morales, Guillermo. Los puentes de fábrica novohispanos 113

Cacciavillani, Carlos Alberto. Técnicas constructivas tradicionales de la edificación del siglo XIX en Roccamontepiano (Italia) 129

Carballo Cruz, Juan Manuel Everardo y Juan Ricardo Alarcón Martínez. Arquitectura, ciudad y tecnología. Mesoamérica 139

Carvajal Navarrete, Mariana. Refuerzos verticales en muros de mampostería. 151

Casas Guzik, Nina. La razón como inspiración estética: el acero en la construcción del siglo XIX 153

Cataño Barrera, Alma María y Gabriela Alicia Sánchez del Toro. La experiencia de los procedimientos antiguos de carpintería para su aplicación en piezas estructurales de bambú. 163

- Cejudo Collera, Mónica.* Rafael Llobet y la terminación del sistema defensivo de la ciudad de Campeche 175
- Chamorro, Miquel Angel; Jordi Gomis; Ramon Ripoll y Josep Tresserras.* Construcciones Contra La Barbarie De Los Rios: El Parque De La Devesa De Girona (S. XIX) 187
- Chiriboga Vela, Alejandra Estefanía.* Cornisas de Palacios Madrileños 195
- Comas, Carlos Eduardo.* Dieste Y La Construcción De Las Centrales De Abasto Brasileñas 205
- Compte Guerrero, Florencio.* El sistema Hennebique y los inicios de la construcción en hormigón armado en Guayaquil 211
- Contreras Padilla, Alejandra.* Pedro de Arrieta y el Tribunal del Santo Oficio 219
- Córtés Rocha, Xavier.* Cinco siglos de construcción y adecuaciones en el Antiguo Palacio de la Inquisición 231
- Cruz Ramírez, Luis Carlos.* Interpretaciones de la estabilidad de las construcciones a través del tiempo 245
- D'Amelio, Maria Grazia y Fabrizio De Cesaris.* El tele-transporte de la arquitectura: deslocalizar los edificios (siglos XV-XX) 255
- Daneels, Annick y Juan Salvador Piña Guido.* Adobes prehispánicos fabricados en hoyo: un caso de la costa del Golfo de México 267
- Del Cueto, Beatriz.* El Re-uso Sostenible de los Escombros 277
- Domènech Casadevall, Gemma.* Formación y acceso al trabajo en los gremios de la construcción catalanes (siglos XVI-XVIII) 287
- Domínguez Hernández, Leticia.* San Miguel arcángel. La historia constructiva de una parroquia novohispana 295
- Drago Quaglia, Elisa.* Estructuras arbóreas. Enrique de la Mora y Palomar 307
- Martínez Pelcastre, Emmanuel de Jesús.* Herencia Constructiva en la fábrica de acueductos novohispanos en el siglo XVI en el estado de Hidalgo 319
- Engelking Keeling, Segismundo.* Las formas de construcción prevalentes en el sitio arqueológico de Tula Grande, Estado de Hidalgo, del period posclásico temprano (950-1200 d.c.) como representativas de la construcción. 331
- Castaño, Enrique; Gloria Pérez; García-Rosales, G; Asensio, E.* Evolución superficial de la fachada del SXVI del rectorado de la Universidad de Alcalá de Henares-España 343
- Facio Salazar, Celia.* Edificios Art Nouveau que renacen como recintos de arte: el Museo Universitario del Chopo y el Cosmovital, Jardín Botánico 351
- Fernández Méndez, Greta Vidahí Lucero.* Sistemas constructivos empleados en la iglesia del ex convento agustino de Atotonilco el Grande; el mito de su construcción 363
- Flores-Sasso, Virginia.* Marcas de canterías en obras de fábrica del siglo XVI en Santo Domingo 371
- Galindo Díaz, Jorge.* De cómo desplazar un edificio de 7 mil toneladas de peso: el caso del Edificio CUDECOM en Bogotá (1974) 381
- García García, Rafael.* Con perfil del onda. Experiencias españolas de bóvedas onduladas tras la Guerra Civil. 391
- Gastellum Alvarado, Juan Manuel; Fabricio Lázaro Villaverde y Edith Cota Castillejos.* Construcción de vivienda en el medio rural. ¿Influencia sobre la construcción urbana contemporánea? 403
- Gil Crespo, Ignacio Javier.* Los proyectos de fortificación de La Habana de 1855 y 1861 409
- Gilabert Sansalvador, Laura y Andrea Peiró Vitoria.* Los morillos como estructura auxiliar en el proceso constructivo de las bóvedas mayas 421

- Gómez Porter, Pablo Francisco.* El concreto armado de la arquitectura del movimiento moderno, análisis de las patologías identificadas en el Centro Urbano Presidente Alemán (CUPA) 431
- González Gottdiener, Isaura.* La revista Obras, una fuente primaria para la historia de la construcción en México. Primera década (enero 1973- enero 1983) 439
- González y Lobo, Carlos.* La urbanización por el agua y los arcos de Tepeyahualco 453
- Guízár Bermúdez, José Gerardo.* El presupuesto y la obra del Templo Parroquial de Cotija, Michoacán S. XIX 461
- Hernández Hernández, Agustín.* Verosimilitud de bóvedas de tracería con mampostería ciclópea de arcilla 463
- Hernández Salazar, Ileana; David Porras Alfaro y Kenia García Baltodano.* La arquitectura caribeña costarricense en la trama urbana histórica de la ciudad de Limón entre el período 1871-1940 473
- Hurtado-Valdez, Pedro y Luis Contreras Ildifonso.* Tecnología mestiza de construcción con tierra en altura: La torre de adobe de la iglesia Nuestra Señora de la Natividad en Panao 481
- Jiménez Vaca, Alejandro.* Obras de Desagüe y Contención de agua en la Cuenca de México durante el Virreinato 491
- La Spina, Vincenzina y César BARGUES BALLESTER.* La arquitectura del mar en Cartagena (España) a mediados del siglo XX: historia constructiva de la lonja, casa y poblado de pescadores 505
- Labiano Novoa, Rubén José.* Cubiertas laminares En España: Los ‘cascarones’ de Coello de Portugal 517
- Leal Menegus, Alejandro.* La expansión vertical de la Ciudad de México a partir de 1936. La difusión de la Teoría Elemental de los Marcos Rígidos 527
- Ley Paredes, Victor; Luis Pantoja Díaz y Carlos Vinajera.* Estudio de la resistencia mecánica en pétreos arqueológicos de la región de Mérida 537
- López, Facundo S.* Una fauna artificial. Tecnología importada en el paisaje de la Pampa ferroviaria en Argentina 545
- López Cortés, Luis Fernando y Silvia Araceli Frausto Luján.* Tratadística y diseño estructural: ex convento de La Asunción de Nuestra Señora, Tochimilco, Puebla 557
- López Ulloa, Ana Angélica; Fabián Santiago López Ulloa.* Análisis de las bóvedas y cúpulas de la iglesia del Monasterio de Santa Clara de Quito, Ecuador 565
- Loredo López, Juan Luis.* El uso del tabique común y la construcción de un territorio 573

Volumen II

- Luzuriaga, Mauricio; Ana María Carrión y Álvaro Valladares.* Cascarones delgados en de Hormigón Armado en el Ecuador 583
- Machuca Casares, Luis y Ángeles Alonso Nuñez.* La Central Hidroeléctrica de El Chorro y el Caminito del Rey 597
- Maira-Vidal, Rocío.* Petrificación de la Riqueza. La construcción medieval en Las Merindades de Burgos 609
- Martín Jiménez, Carlos y Julián García Muñoz.* La bóveda encamionada de la capilla de la encarnación de la Iglesia de los Terceros de Sevilla 619
- Martín Medina, Geiser Gerardo; Luis Fernando Guerrero Baca y Ricardo Armijo Torres.* Edificación decimonónica con bloques de conchuela en la Ex Aduana de Frontera, Tabasco 629
- Martínez Aguilar, Gladys.* El lenguaje constructivo de los ingenieros militares en las fortificaciones del siglo XVIII en Veracruz 637

- Martínez Martínez, Mónica.* Juan Antonio Tonda Magallón y su método de cálculo estructural aplicado a las cáscaras cilíndricas largas de cubierta 649
- Mazzanti, Claudio y Federico Bulfone Gransinigh.* Desarrollo de tipologías arquitectónicas y cambios de las técnicas de construcción a lo largo de los ríos en la región de Los Abruzzos (Italia) 661
- Méndez Pineda, Valeria.* Construcción de cascarones de concreto armado a través de los medios de difusión de sus constructores 671
- Mendoza Arias, Omar.* Historia de la construcción de la zona oriente del Estado de México 681
- Molero Sañudo, Antonio Pedro.* La “desmesura” del obrero mayor Andrés de Luey en los sagrarios proyectados por el obispo Palafox para la catedral de Puebla 687
- Molotla Xolalpa, Pedro Tlatoani.* La influencia del desarrollo ferroviario en la construcción en la frontera norte de México a principios del siglo XX. El Caso del Antiguo Hotel del Sur (1919), Ciudad Juárez, Chihuahua 701
- Montaldo, Ignacio.* Torres en Buenos Aires, los primeros muros Cortina 715
- Monteiro Machado, Isadora y Ruth Verde Zein.* Análisis constructivo de cascarones de Oscar Niemeyer por medio de herramientas paramétricas 727
- Müller, Luis.* El arco y la cascara. Estructuras arquitectónicas en la obra de Amancio Williams 733
- Nagel Vega, Vanessa.* Lo artesanal en la modernidad arquitectónica mexicana. Los materiales constructivos y su huella en los medios impresos internacionales 745
- Natividad Vivó, Pau y José Calvo López.* Bóvedas baídas construidas por cruceros: tipos constructivos 757
- Navarro Mendoza, Elena Guadalupe; Elia Mercedes Alonso Guzmán y Juan Alberto Bedolla Arroyo.* La cal en México. Su historia y su presente 767
- Negro Tua, Sandra y Samuel Amorós Castañeda.* La permanencia constructiva virreinal en la arquitectura neogótica del Perú durante el siglo XIX. El caso de la hacienda Unanue en el valle de Cañete 773
- Oliva Salinas, Juan Gerardo y Marcos Javier Ontiveros Hernández.* Tres Casos de Estructuras Velarias en Construcciones ya Existentes en México 783
- Oros Guel, Rocío Ivett.* Las actividades del proceso estereotómico en la edificación de bóvedas del siglo XVII y XVIII en la ciudad de San Luis Potosí, México 793
- Oteiza, I.; C. Alonso, B. Frutos y F. Martín-Consuegra.* El Instituto Eduardo Torroja. Un Edificio innovador en la España De Postguerra- Madrid 1950 805
- Pastrana Salcedo, Tarsicio.* Sistemas y Técnicas de construcción en la ingeniería hidráulica doméstica en el virreinato de la Nueva España 819
- Pérez de Salazar Vereá, Francisco.* Vivienda campesina de productos de maguey 831
- Pérez Escobar, Jorge Arturo.* La industrialización del ladrillo a finales del siglo XIX en la ciudad de México 837
- Pérez López, Luis Alberto.* La construcción de vivienda en los barrios extramuros de la ciudad de Campeche en la segunda mitad del siglo XIX 845
- Pimentel, Salvador Magdaleno.* Bóvedas de Ladrillo una construcción viva 855
- Plasencia-Lozano, Pedro.* El conjunto de puentes del río Gévora en Badajoz, paisaje cultural de la ingeniería 863
- Pozuelos Polanco, Víctor Daniel y Germán Antonio Meléndez Fuentes.* Encofrados de madera para cascarones de concreto. Auditorio Francisco Vela, Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala 875
- Prieto Vicioso, Esteban.* El Uso De Costaneras De Pinus Occidentalis En La Vivienda Vernácula Dominicana 889

- Rabasa Díaz, Enrique; Benjamín Ibarra Sevilla y José Calvo López.* Las bóvedas de crucería en el manuscrito de Fray Andrés de San Miguel 895
- Ramírez de León, Mario Raúl.* Pensamiento aristotélico en los tratados de arquitectura y construcción 907
- Resano Resano, David.* La lámina de hormigón armado como tipo estructural en la teoría y obra de Eduardo Torroja 921
- Reséndiz Vázquez, Aleyda.* Arquitectos vs Ingenieros en la historia de la prefabricación escolar en Francia posterior a la Segunda Guerra Mundial 931
- Ripoll, Ramon; Miquel Angel Chamorro; Josep Tresserras y Jordi Gomis.* Defensas Naturales y Defensas Construidas: La Ciudad Fortificada Irregular Moderna (Girona S.XVIII-XIX) 943
- Rivera Grijalba, Víctor Daniel.* Particularidades Constructivas Prehispánicas En La Región Rio Bec-Chenes Durante El Clásico En El Área Maya 949
- Rivero Weber, Lilia Teresa; Pedro Antonio Espino Romo y Ricardo Muñoz Nájera.* De Tecpancalli a Palacio Nacional: 700 años de construcción continua 963
- Rodrigues Secco, Gustavo y Ana Lúcia Arantes da Silva.* Estudio de técnicas constructivas y tipología arquitectónica de la Estación de Trenes de Cachoeira Paulista 975
- Rodríguez García, Ana y Rafael Hernando De La Cuerda.* La arquitectura de los cines modernos, impulsora de las estructuras vistas de hormigón armado en Madrid. 983
- Rodríguez Méndez, Juan Pablo y José Agustín López Girón.* Sincretismo y construcción tradicional en madera: de las cocinas tseltales a las casas para las parteras en los Altos de Chiapas, México 995
- Román Alvarado, Abe Yillah.* El hierro como material constructivo a fines del siglo XIX en la región veracruzana. Un estudio de caso 1003
- Román Kalisch, Manuel Arturo.* La Prefabricación En Yucatán Durante La Primera Mitad Del Siglo XX 1013
- Rosales Mendoza, José Manuel; Areli Magdiel López Montelongo; Gonzalo Pérez Gómez Martínez y Cynthia Araceli Tabares Orozco.* Apuntes para una historia de los materiales y elementos constructivos en Torreón Coahuila 1023
- Ruíz Rodríguez, Christian Miguel.* Diseño y construcción del templo parroquial de Santa Cruz y Soledad de la ciudad de México durante el siglo XVIII. Producto del pensamiento barroco mexicano 1033
- Sabag Moreno, Claudia.* Construcción y destrucción histórica: ex convento de San Francisco Totimehuacan 1043
- Salazar González, Guadalupe.* Los mercados decimonónicos en San Luis Potosí. Novedad arquitectónica y estructural 1053
- Santa Ana Lozada, Lucía G.* Transformación de los sistemas constructivos en concreto en la obra de Mario Pani 1063
- Santa Ana Lozada, Perla.* Las cimentaciones en la Ciudad de México de 1890 a 1980 1069
- Sarmiento Ocampo, Jaime Alberto.* Hacia una nueva manera de habitar el planeta 1077
- Silvestre, María Victoria.* Tectónicas: Sostén o construcción? Arquitecturas recientes en el cono sur de América Latina 1087
- Rinaldi, Simona.* *Las Fachadas De Los Palacios Italianos De Macerata Del Siglo XVII: Análisis De Las Técnicas Constructivas* 1099
- Solari, Claudio Javier.* El buen salvaje que construye. La obra de Rafael Iglesia en Rosario, Argentina. 1107
- Solís Rebolledo, Gabriela.* Arquitectura, Diseño y Construcción: La Firmitas, Utilitas y Venustas en Andrea Palladio y Daniele Barbaro 1117

- Tarruell Vázquez, Jaime; Medina Amorós, Miguel Ángel y Pineda Enebral, José Ignacio.* Conservación y adaptación de un ascensor de 1906, obra de Antonio Palacios 1127
- Terán Bonilla, José Antonio.* Pervivencia del uso de los materiales y procesos tradicionales de construcción en la zona de Cholula, Puebla. Un caso representativo 1141
- Verazzo, Clara.* La resiliencia del Abruzzo. Construcción de edificios tradicionales resistentes a terremotos 1151
- Yáñez Ventura, Marco Antonio.* La Importancia En El Rescate Historico De La Carpinteria Tradicional De Ribera Del Puerto De Manzanillo, Colima. (1920 – 1960). 1163
- Lista de autores 1785
- Índice de autores 1791

Juan Antonio Tonda Magallón y su método de cálculo estructural aplicado a las cáscaras cilíndricas largas de cubierta

Mónica Martínez Martínez

El arquitecto español Juan Antonio Tonda Magallón, nacido en Madrid en 1931 y actualmente profesor de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), es conocido como uno de los más importantes discípulos y colaboradores del arquitecto Félix Candela Outeriño. Perteneció a la llamada «generación hispano-mexicana», formada por niños y jóvenes que llegaron a México acompañando el éxodo de sus padres y formándose profesionalmente en su patria de adopción.

Tonda participó en el cálculo estructural y desarrollo geométrico de las estructuras proyectadas por Félix Candela, especializándose en las cáscaras delgadas de hormigón armado y, dentro de ellas, en las cáscaras cilíndricas largas de cubierta de hormigón armado.

La primera cáscara cilíndrica larga aparece en Alemania en 1924, para cubrir un edificio perteneciente a la compañía Zeiss (figura 1). Pero será a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando estas tipologías comenzarán a tipificarse por ser capaces de cubrir grandes luces con un gasto mínimo de material; surgiendo un nuevo sistema estructural de cubrición, ideal para espacios de tipo utilitario, tales como estaciones, almacenes, naves y hangares, etc., en definitiva, espacios que hasta el momento se construían en acero.

En sus orígenes, evaluar el estado tensional de las cáscaras cilíndricas largas de cubierta pasaba por aplicar la teoría de la elasticidad, firmemente establecida en este periodo. La práctica de este método empezó a ser desarrollada en el decenio de 1930, en

Alemania, gracias a la labor de los ingenieros U. Finsterwalder (Finsterwalder 1932a; 1935b; 1936c) y Fr. Dischinger (Dischinger 1928a; 1930b; 1935c; 1936d), y posteriormente del noruego A. Aas Jakobsen (Jakobsen 1937a; 1939b). La formulación matemática aportada por la teoría analítica, tan enraizada en este momento y referida a materiales ideales, homogéneos e isotropos que respondían a la ley de Hooke, fue aplicada igualmente al cálculo estructural de las cáscaras cilíndricas largas de hormigón armado, sin detenerse a analizar las características propias del nuevo material constructivo utilizado.

La teoría elástica de cáscaras resultó ser prácticamente inaplicable puesto que implicaba resolver complejas ecuaciones diferenciales de octavo orden, formuladas en base a hipótesis irreales, concernientes a sus condiciones de contorno o al material estructural utilizado. Todas estas hipótesis suponían, o bien idealizar una realidad imposible de conocer a priori, o bien hacían referencia a un material ideal, homogéneo e isotropo; cuando el hormigón armado no cumple con ninguna de esas propiedades. En ningún caso se podía asegurar que el estado tensional obtenido representara el «estado real» de la cáscara. Como consecuencia, fueron apareciendo insalvables incongruencias entre los resultados obtenidos a partir del cálculo elástico y lo acontecido en la realidad o mediante ensayo (figura 2 y 3).

Un marco teórico más adecuado al proporcionado por la teoría elástica, para el análisis estructural de estas tipologías, resultó ser el análisis a rotura. Aun-

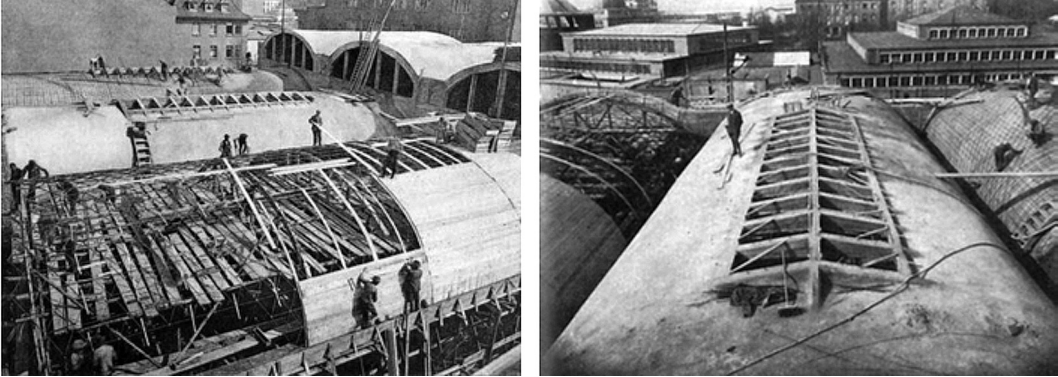


Figura 1

Cáscaras cilíndricas largas de la cubierta, en ejecución, del Dywidaghalle. Fr. Dischinger y U. Finsterwalder. 1926. Die Dywidag-Halle auf der Gesolei. Der Bauingenieur 7, figura 1 y 2, p. 929



Figura 2

Puesta en carga de un modelo de cáscara cilíndrica larga. (Morice 1952)

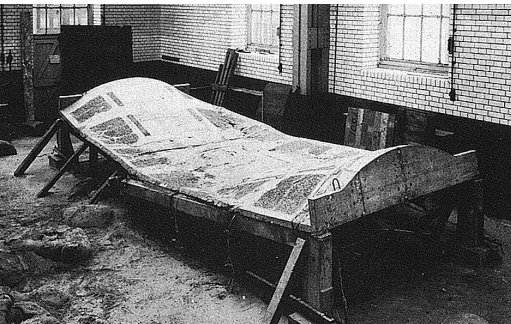


Figura 3

Efecto rotura de la puesta en carga de un modelo de cáscara cilíndrica larga. (Morice 1952)

que el estado «real» de la estructura no se podía conocer, la resistencia de ésta sí se podía calcular con precisión; siendo, además, muy insensible a las supuestas imperfecciones de fabricación, ejecución o a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno.

En este contexto, y en 1944 el ingeniero danés Knud Winstrup Johansen publicó un artículo de gran relevancia, en cuanto que marcó el origen de la aplicación del análisis límite al cálculo estructural de las cáscaras cilíndricas largas de cubierta, con un enfoque plástico del equilibrio (Johansen 1944a, 1948b). Posteriormente, otros expertos en plasticidad como el también ingeniero danés H. Lundgren (Lundgren 1949) y el húngaro G.v. Kazinczy (Kazinczy 1949) continuaron con este tipo de estudios.

A partir de 1950, hasta la aparición de los ordenadores, con la teoría de la plasticidad firmemente establecida y sus teoremas demostrados, algunos calculistas del momento, como Juan Antonio Tonda Magallón, analizaron el comportamiento estructural de las cáscaras cilíndricas largas de cubierta en base a la obtención de diferentes estados de equilibrio, haciendo hincapié en la seguridad, respetando la característica de cedencia del hormigón armado y, por tanto, obviando las consideraciones de compatibilidad y deformación que pudiera sufrir la estructura, tal y como determinaba la teoría de la elasticidad.

Tonda se caracterizó por ser el discípulo y colaborador más influyente de la obra de Candela. Su labor, fundamentalmente, se basó en el estudio del desarrollo geométrico y en el cálculo de sus estructuras. Por

ello, Tonda logró especializarse en el cálculo estructural de cáscaras delgadas de hormigón armado; aplicando en el caso de las cáscaras cilíndricas largas un método de cálculo, denominado método de la viga, basado en su conocimiento adquirido sobre el análisis límite con el enfoque plástico del equilibrio.

PROCESO DE MODELIZACIÓN DE LAS CÁSCARAS CILÍNDRICAS LARGAS DE CUBIERTA. MÉTODO DE LA VIGA

Siendo profesor del Instituto Mexicano del Cemento y del Hormigón (IMCYC), Juan Antonio Tonda Magallón escribe el libro «Cascarones de Concreto» (1973), publicado en 1974, gracias a la colaboración mutua entre el IMCYC y el Instituto de Investigaciones Arquitectónicas de la UNAM. En este documento, Tonda expone el método utilizado para el análisis y cálculo estructural de las cáscaras cilíndricas largas de cubierta proyectadas por Félix Candela.

Tonda señala que para realizar el cálculo de estas tipologías estructurales debe emplearse el método de la viga. Este método, desarrollado por el ingeniero danés H. Lundgren en su libro publicado en 1949 (Lundgren 1949), fue enunciado y publicado por primera vez por el también ingeniero danés K. W. Johansen, en 1944 (Johansen 1944). Johansen fundamentó el método de la viga, aplicado al cálculo estructural de las cáscaras cilíndricas largas de cubierta, desde el punto de vista del análisis límite con un enfoque plástico del equilibrio de fuerzas.

Tonda define el método de la viga como un método basado en la hipótesis de que la cáscara cilíndrica larga funciona como si de una viga recta, hueca y de sección transversal circular se tratara. Por tanto, la cáscara se calcula longitudinal y transversalmente, en su conjunto, al igual que en una viga, aunando seguridad y sencillez en el desarrollo matemático; en contra de la complejidad intrínseca que entrañaba la teoría elástica o de la teoría de la membrana.

PROCESO METODOLÓGICO: CÁLCULO LONGITUDINAL DE LA CÁSCARA

Partiendo de una cáscara cilíndrica larga, de longitud «L» y de directriz circular (Figura 4), Juan Antonio Tonda procede, en primer lugar, al cálculo longitudinal de la cáscara.

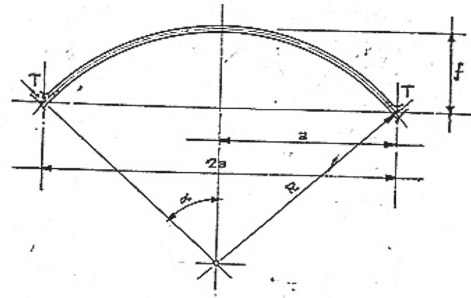


Figura 4
Sección transversal de la cáscara cilíndrica larga a calcular. (Tonda 1974)

El cálculo comienza hallando el peso de una franja de la cáscara cilíndrica, de un metro de ancho en sentido longitudinal, cuyo valor vendrá dado por la expresión conocida:

$$\omega b = 2\omega \alpha R \quad [1]$$

Al tomar el ángulo α en radianes, y asimilando la geometría de la cáscara cilíndrica al de una viga, el momento flector total vendría dado por la siguiente expresión:

$$M = \frac{\omega_b L^2}{8} \quad [2]$$

El valor de este momento flector es resistido por las fuerzas internas; por lo que habrá que calcular la magnitud de éstas para, posteriormente, hallar la cantidad de refuerzo necesario en la cáscara.

Con el fin de hallar las fuerzas internas, Tonda procede a determinar el brazo de palanca de la cáscara por medio de expresiones sumamente sencillas, derivadas de la propia geometría de la cáscara a estudiar. Para ello, procede a calcular el centro de las compresiones y de las tracciones ubicadas en la sección transversal de la cáscara, de la siguiente manera:

El momento «M» debe ser resistido por la acción de fuerzas internas en la cáscara; de compresión y de tracción. En relación a las compresiones, Tonda las supone contenidas en una longitud de cáscara, aproximadamente de 1/3 a 1/4 de la longitud transversal total (Figura 5) y de expresión:

$$S_c = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) S_b \quad [3]$$

siendo:

$$S_b = 2\alpha R \quad [4]$$

Esta área constituirá la zona de compresión, por lo que su centro de gravedad corresponderá al centro de aplicación de las fuerzas de compresión.

El centro de gravedad de la zona de compresiones viene dado por la expresión:

$$\overline{OG} = R \frac{C_c}{S_c} \quad [5]$$

donde el valor de la distancia CG, responde a la expresión:

$$\overline{CG} = R - \overline{OG} = R \left(1 - \frac{C_c}{S_c} \right) \quad [6]$$

El punto «G» representa el centro de las compresiones; mientras que el centro de las tracciones, Tonda, las supone a 5 cm por encima de los puntos A y B (Figura 5). En base a ello, el brazo de palanca de las fuerzas de compresión y tracción vendrá determinado por la expresión siguiente (Figura 6):

$$Z = f - \overline{CG} - 0,05m = f - R \left(1 - \frac{C_c}{S_c} \right) - 0,05m \quad [7]$$

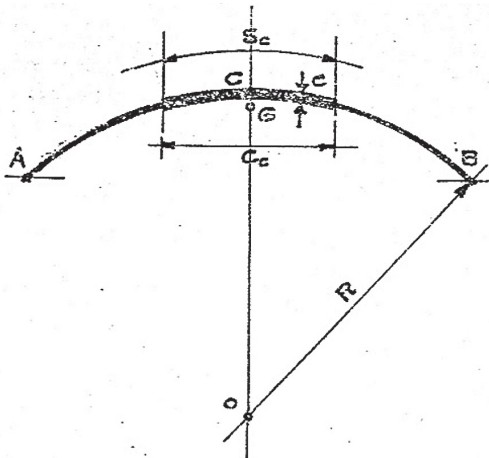


Figura 5
Sección transversal de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

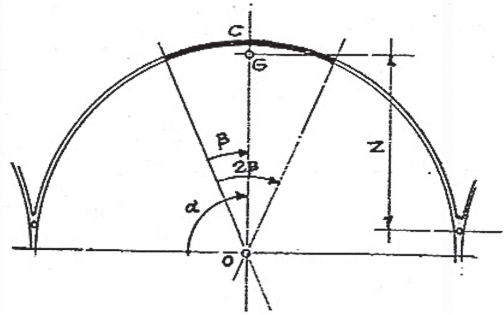


Figura 6
Brazo de palanca en la sección transversal de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

Una vez obtenido el brazo de palanca, «Z», el valor las fuerzas internas de compresión se determina, fácilmente, mediante la expresión:

$$F = \frac{M}{Z} \quad [8]$$

Siendo «F» el valor de las fuerzas, tanto de compresión como de tracción.

Una vez obtenido el valor de estas fuerzas, y antes de proseguir con el desarrollo matemático, Tonda señala que debe comprobarse que la tensión unitaria del hormigón cumple con la siguiente condición:

$$\sigma_b \leq 0,30 f'_c \quad [9]$$

donde:

$$\sigma_b = \frac{F}{S_c e} \quad [10]$$

El área necesaria de refuerzo queda determinada mediante la expresión:

$$F_c = \frac{F}{\sigma_e} \quad [11]$$

Este refuerzo se distribuirá por igual en las dos zonas inferiores de la cáscara, en los centros de tracción (Figura 7).

Por tanto, el cálculo longitudinal de la cáscara cilíndrica se ha desarrollado bajo la hipótesis de estado

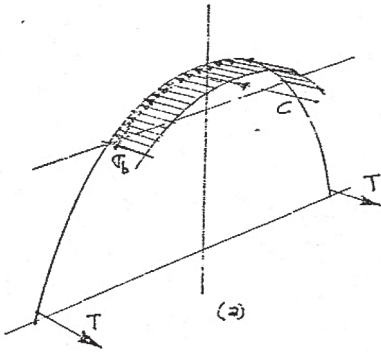


Figura 7
Área de compresiones en la sección transversal de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

plástico puesto que los esfuerzos de compresión se han considerado repartidos uniformemente en la zona supuesta y basándose en un análisis de equilibrio de fuerzas.

CÁLCULO TRANSVERSAL DE LA CÁSCARA

Cálculo de las fuerzas transversales

A la distribución de esfuerzos de compresión y tracción (Figura 8a), actuando en la cáscara, también hay que añadir los esfuerzos tangenciales y los cortantes (Figura 8b). A su vez, los esfuerzos tangenciales pue-

den ser sustituidos por una distribución homogénea, con el fin de simplificar los cálculos, a lo largo de todo el brazo de palanca calculado anteriormente, tal y como aparece esquematizado en la figura 8c.

La suma de los esfuerzos tangenciales unitarios será la resultante que actúa en la sección, es decir:

$$t = \frac{V_n}{2Z} = \frac{\omega_b}{2Z} \quad [12]$$

siendo V_n la fuerza cortante que equilibra el peso propio de la cáscara y la reacción que compensa cada franja de ésta.

En base a lo expuesto, se analizarán los diferentes momentos transversales que se originan en la sección transversal de la cáscara para posteriormente calcular los esfuerzos cortantes.

Cálculo de los momentos transversales

Se deben estudiar los siguientes momentos transversales, originados por sus correspondientes esfuerzos:

- Momentos transversales debidos al peso propio de la estructura.
- Momentos transversales debidos a los esfuerzos tangenciales.
- Momentos transversales debidos a la fuerza horizontal o/y fuerza vertical en el arranque de la cáscara.

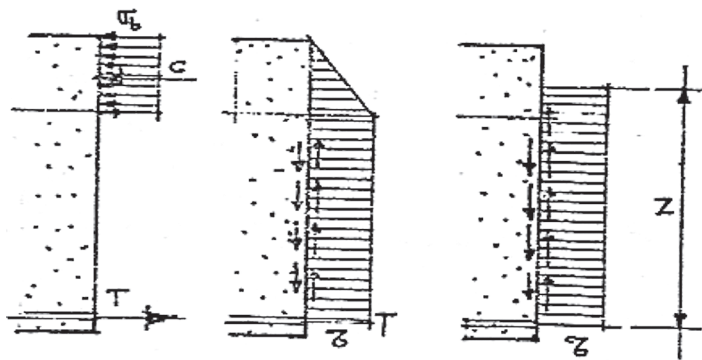


Figura 8
Distribución de esfuerzos en la sección transversal de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

A continuación, se procederá a desarrollar cada uno de ellos, según la metodología planteada por J.A. Tonda (Tonda 1974).

Momentos transversales debidos al peso propio de la cáscara

Estos momentos se calculan por medio de la estática, considerando el equilibrio de una franja transversal de la cáscara cilíndrica de longitud unitaria. Dicha franja se encontrará sometida a las cargas verticales que actúan sobre ella y a la diferencia entre los esfuerzos cortantes en ambas secciones transversales que la delimitan.

Para ello, se considera una banda de cáscara de 1 m de ancho para realizar su estudio. Los momentos transversales debidos al peso propio de la estructura vendrán dados por la siguiente sencilla expresión:

$$M_{\varphi} = W_{\varphi} d \tag{13}$$

donde:

M_{φ} es el momento transversal debido al peso propio de la cáscara, W_{φ} , en un punto genérico de ésta. Dicho punto, x , formará un ángulo φ con la recta OA a partir del punto de arranque A de la cáscara (Figura 9).

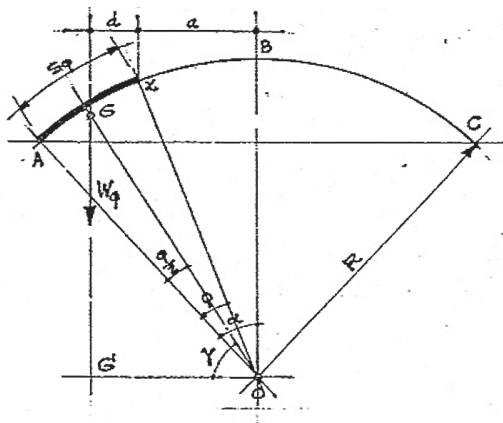


Figura 9
Determinación de momentos transversales debidos al peso propio de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

W_{φ} , es el peso propio de la cáscara perteneciente a la longitud de arco S_{φ} (Figura 9) y viene determinado por la expresión:

$$W_{\varphi} = S_{\varphi} \omega = \varphi \omega R \tag{14}$$

siendo:

$$S_{\varphi} = \varphi R \tag{15}$$

donde d es la distancia de la resultante del peso propio de la cáscara, W_{φ} , al punto genérico de ésta, x (Figura 9).

Dada la sencillez de la expresión, lo único que hay que averiguar es el punto de gravedad del área de la cáscara, S_{φ} , por donde pasará la resultante del peso propio y el valor de la distancia «d».

Ambos datos, de nuevo, se obtienen a partir de la propia geometría de la cáscara, por medio de expresiones sumamente sencillas, como a continuación se exponen:

La distancia OG vendría dada por la expresión:

$$\overline{OG} = R \frac{C_{\varphi}}{S_{\varphi}} \tag{16}$$

donde C_{φ} representa la cuerda del arco S_{φ} , y viene definida por la fórmula (Figura 9):

$$C_{\varphi} = 2r \text{sen} \frac{\varphi}{2} \tag{17}$$

que sustituyendo en la expresión [16], se obtiene:

$$\overline{OG} = \frac{R2\text{sen} \frac{\varphi}{2}}{\varphi} \tag{18}$$

Para el cálculo de la distancia «d», se debe considerar el ángulo γ que forma la recta OG con la horizontal OG' (Figura 9) y que tiene un valor de:

$$\gamma = 90^{\circ} - \alpha + \frac{\varphi}{2} = 90^{\circ} - \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) \tag{19}$$

La distancia «d» vendrá dada, por lo tanto, por la expresión:

$$d = \overline{OG'} - a \tag{20}$$

donde:

$$\text{sen}(\alpha - \varphi) = \frac{a}{R}; \quad a = R \text{sen}(\alpha - \varphi) \quad [21]$$

Proyectando horizontalmente la distancia OG, para obtener OG', se obtiene:

$$\begin{aligned} \overline{OG'} &= \overline{OG} \cos \gamma = \overline{OG} \cos \left(90 - \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) \right) = \\ &= \overline{OG} \text{sen} \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \quad [22]$$

Y sustituyendo en la expresión [18], se consigue:

$$\overline{OG'} = R \frac{2 \text{sen} \frac{\varphi}{2}}{\varphi} \text{sen} \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) \quad [23]$$

Finalmente, sustituyendo las expresiones [21] y [23] en la fórmula [20], se obtiene el valor de la distancia «d»:

$$d = R \left[\frac{2 \text{sen} \frac{\varphi}{2}}{\varphi} \text{sen} \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) - \text{sen}(\alpha - \varphi) \right] \quad [24]$$

Hallada la expresión del valor de la distancia, d, y sustituyendo en la expresión [13], el momento transversal debido al peso propio de la cáscara será:

$$\begin{aligned} M_{\varphi} &= -\varphi \omega R^2 \left[\frac{2 \text{sen} \frac{\varphi}{2}}{\varphi} \text{sen} \left(\alpha - \frac{\varphi}{2} \right) - \text{sen}(\alpha - \varphi) \right] \end{aligned} \quad [25]$$

y simplificando, la expresión definitiva sería:

$$M_{\varphi} = -\omega R^2 \left[\cos(\alpha - \varphi) - \cos \alpha - \varphi \text{sen}(\alpha - \varphi) \right] \quad [26]$$

Momentos transversales debidos a los esfuerzos tangenciales

Para obtener estos momentos se debe calcular la posición de la resultante de estas fuerzas, para una longitud de arco Sφ y una sección cualquiera de la cáscara, x (Figura 10).

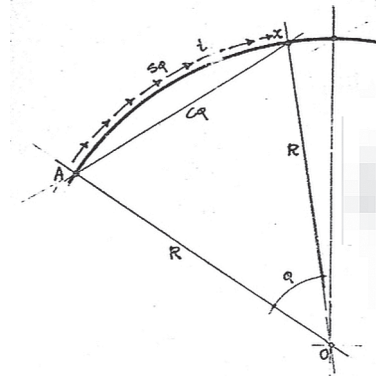


Figura 10
Distribución de las fuerzas tangenciales en la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

Dicha resultante vendrá dada por la expresión:

$$R_t = t C_{\varphi} = 2 R t \text{sen} \frac{\varphi}{2} \quad [27]$$

Una vez obtenida la resultante de los esfuerzos tangenciales, Rt, el siguiente paso para obtener el momento transversal es determinar la distancia, d, a la cual se encuentra de la sección x. Para ello, tomando momentos de las fuerzas tangenciales unitarias, t, respecto al centro de la circunferencia, punto O que conforma la sección transversal de la cáscara, se puede calcular la distancia, D, a la que se encuentra la resultante Rt del punto O (Figura 11).

Esta distancia vendrá dada, por tanto, por la expresión:

$$D = \frac{M_o}{R_t} \quad [28]$$

Tomando momento:

$$M_o = \int_0^{\varphi} R t ds = \int_0^{\varphi} R t R d\varphi = \int_0^{\varphi} R^2 t d\varphi = R^2 t \varphi \quad [29]$$

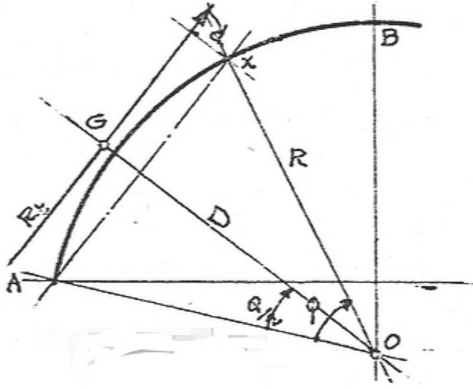


Figura 11 Resultante de fuerzas tangenciales, dirección y sentido, de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

Sustituyendo las expresiones [27] y [29] en [28], se obtiene:

$$D = \frac{R^2 t \varphi}{t 2 R \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} = R \frac{\varphi}{2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} \quad [30]$$

o bien:

$$D = R \frac{S_\varphi}{C_\varphi}$$

que resulta ser la expresión inversa a la del centro de gravedad:

$$\overline{OG} = R \frac{C_\varphi}{S_\varphi} \quad [31]$$

Por lo que se concluye que:

$$\frac{S_\varphi}{C_\varphi} > 1 \quad [32]$$

por lo que la resultante de las fuerzas tangenciales, R_t , se ubicará fuera de la sección de la cáscara (Figura 11), al ser $D > R$.

El momento transversal, cuya expresión se trata de hallar, producido por la resultante será:

$$M_{t\varphi} = R_t d \quad [33]$$

Como gracias a las expresiones anteriores la distancia, D , quedó determinada, entonces:

$$d = D - R \cos \frac{\varphi}{2} = R \frac{\varphi}{2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} - R \cos \frac{\varphi}{2}$$

Sustituyendo [27] y en [33], se obtiene:

$$M_{t\varphi} = \left[t 2 R \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \right] \left[R \frac{\varphi}{2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} - R \cos \frac{\varphi}{2} \right] \quad [34]$$

Simplificando, se consigue finalmente la siguiente expresión:

$$M_{t\varphi} = 2 R^2 t \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\varphi}{2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} - \cos \frac{\varphi}{2} \right) = R^2 t \left(\varphi - 2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \right) \quad [35]$$

$$M_{t\varphi} = R^2 t (\varphi - \operatorname{sen} \varphi) \quad [36]$$

Momentos transversales debidos a la fuerza horizontal, H_o , o/y fuerza vertical, V_o , en el arranque de la cáscara

En el caso de una única cáscara continua, o en la última cáscara de una serie paralela de ellas, pueden aparecer fuerzas horizontales, H_o , o/y verticales, V_o , en los arranques de la cáscara (Figura 12).

Como indica Tonda, si se trata de una fuerza horizontal ocasionada por la unión horizontal entre dos cáscaras, entonces se tratará de una fuerza de tracción por lo que provocará un momento positivo; cuya expresión vendrá dada por:

$$M_{H_o} = H_o h_\varphi \quad [37]$$

donde (Figura 12):

$$\cos \alpha = \frac{x}{R}; \quad \cos(\alpha - \varphi) = \frac{y}{R} \quad [38]$$

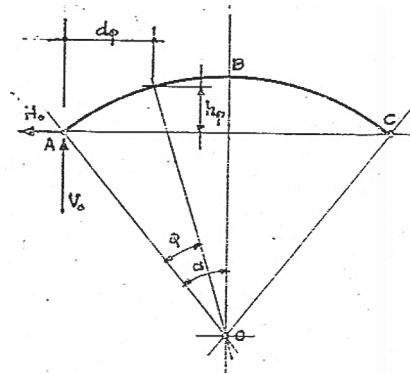


Figura 12
Representación de la fuerza horizontal y vertical en el arranque de la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

por lo que:

$$\begin{aligned}
 h_\varphi &= y - x = R \cos(\alpha - \varphi) - R \cos \alpha = \\
 &= R [\cos(\alpha - \varphi) - \cos \alpha] \quad [39]
 \end{aligned}$$

que sustituyendo en la expresión [37] se obtiene:

$$M_{h_0} = H_0 R [\cos(\alpha - \varphi) - \cos \alpha]$$

De igual manera, se obtiene la expresión para el momento transversal producido por la presencia de una carga vertical, V_0 , en el arranque de la cáscara (Figura 12):

$$M_{V_0} = V_0 d_\varphi \quad [40]$$

donde:

$$d_\varphi = R \operatorname{sen} \alpha - R \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) = R [\operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen}(\alpha - \varphi)] \quad [41]$$

que sustituyendo en la expresión [40] se obtiene:

$$M_{V_0} = V_0 R [\operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen}(\alpha - \varphi)] \quad [42]$$

La existencia de continuidad transversal en las cáscaras cilíndricas largas puede evitar deformacio-

nes excesivas, gracias a la acción de la reacción horizontal y del momento de empotramiento, transmitidos recíprocamente de una cáscara a otra; disminuyendo en forma apreciable los valores finales de los momentos transversales. Dichas deformaciones, por el contrario, si podrían producirse en el caso de cáscaras aisladas.

Por último, para obtener los momentos transversales finales, habría que calcular las expresiones anteriormente halladas en los diferentes puntos de la sección transversal de la cáscara, donde se desee calcular el valor final.

El valor de la fuerza horizontal, H_0 , y de la fuerza vertical, V_0 , en el arranque de la cáscara se deben calcular de tal modo que anulen el momento transversal producido tanto por el peso propio de la cáscara, como por las fuerzas tangenciales en el punto de coronación de la misma (punto B en la figura 9). Es decir, de nuevo, gracias al empleo del equilibrio plástico en la estructura, se puede obtener el resultado deseado.

En un ejemplo práctico resuelto por J. A. Tonda (Tonda 1974), éste calcula una cáscara cilíndrica larga de 30 m de longitud, libremente apoyada, con una anchura transversal de 8 m, altura de coronación de 4 m (directriz semicircular) y continua a otras 5 cáscaras más, de idénticas propiedades.

Tras todo el desarrollo matemático, y siguiendo el procedimiento explicado anteriormente, Tonda dibuja el diagrama de los momentos transversales finales, obtenidos a intervalos de 5° desde el arranque de la cáscara hasta la clave de ésta (Figura 13).

Como en todas las gráficas de momentos transversales finales, obtenidas en cáscaras cilíndricas por

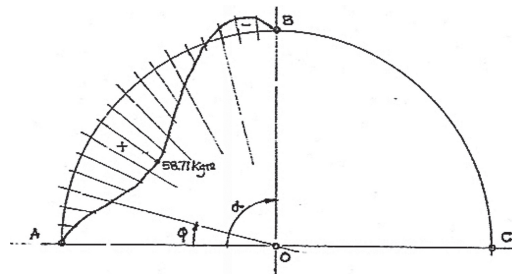


Figura 13
Diagrama de momentos transversales finales en la cáscara cilíndrica larga. (Tonda 1974)

medio del equilibrio plástico de fuerzas, la sección transversal de la cáscara trabaja como si de un arco con tres articulaciones se tratara.

Una vez obtenido el valor del momento transversal final más elevado, que en la figura 13 correspondería al valor de 58,71 Kgm, se pasaría a calcular el refuerzo necesario para contrarrestarlo.

Lo importante del método, tal y como se ha descrito, reside en que se trata de un análisis de equilibrio de fuerzas, sumamente sencillo y que nada tiene que ver ni con los desarrollos matemáticos, ni con la complejidad de estos marcados por la Teoría de la Elasticidad.

Esfuerzos cortantes

El esfuerzo cortante unitario del hormigón armado viene determinado por la expresión:

$$v_c = \frac{t}{e} = \frac{V_n}{2Ze} \quad [43]$$

donde e representa el espesor de la cáscara y, al igual que ocurre en una viga, el cortante se determina por:

$$V_n = \frac{\omega_b L}{2} \quad [44]$$

donde L representa la longitud de la cáscara.

Por otro lado, el esfuerzo cortante a lo largo del arco viene determinado por:

$$Z_m = \frac{3V_n}{4f} \quad [45]$$

donde f es la altura del arco de la sección transversal de la cáscara.

Tonda establece que si sucede:

$$V_c = \frac{Z_m}{e} < 4 \text{ kg/cm}^2 \quad [46]$$

entonces habrá que reforzar el hormigón con más área de refuerzo, obtenida por medio de la siguiente expresión:

$$F_e = \frac{t}{\sigma_e} \quad [47]$$

CONCLUSIONES

Para poder obtener todas las magnitudes hiperestáticas, producidas en el proceso de cálculo de una cáscara cilíndrica larga, utilizando la Teoría de la Elasticidad es necesario realizar un desarrollo matemático altamente complejo, a la vez que incierto. Sin embargo, utilizando el método de la viga, aplicado al cálculo de estas tipologías estructurales por J.A. Tonda, el problema se reduce a obtener un estado de equilibrio en la cáscara, con un enfoque plástico de éste, considerando la característica de cedencia del hormigón armado y, por tanto, obviando consideraciones de compatibilidad o deformación en el cálculo.

El método de la viga proporciona una solución de equilibrio que, si la cáscara está constituida con un material dúctil y en ausencia de problemas de inestabilidad, resulta ser una solución segura; siempre y cuando se satisfaga la condición de cedencia del hormigón armado.

El estado de equilibrio en la cáscara se consigue por medio del traspaso de esfuerzos de las zonas más solicitadas a las que lo están menos; todo ello, dependiendo de la geometría transversal de la cáscara, la ubicación de la fibra neutra y las diferentes disposiciones que se elija para la armadura. Por tanto, este estado de equilibrio es una solución al problema, pero no la única.

Al abandonar la búsqueda de la solución «única» para la cáscara, se concluye que el aspecto esencial del análisis límite es la aplicación del «enfoque del equilibrio», principal corolario del Teorema Fundamental de la Seguridad. De esta manera se obvia consideraciones referentes a compatibilidad y deformación en la cáscara.

LISTA DE REFERENCIAS.

- Baker, J. F., Horne, M.R. y Heyman J. 1956. *The steel skeleton. Vol. 2: Plastic behavior and design*. Cambridge: University Press.
- Bredt, R. 1896. Kritische Bemerkungen zur Drehungselastizität. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 40: 785-790.
- Dischinger, Fr. 1928. Schalen und Rippenkuppeln. *4a ed. Handbuch der Eisenbetonbau. VI Band, Zweiter Teil*. F. von Emperger (ed.). Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, 163-383.

- Dischinger, Fr. 1930. "The Zeiss-Dywidag system of construction for reinforced concrete shell roofs over large spans". *First International Congress for Concrete and Reinforced Concrete*, Liège.
- Dischinger, Fr. 1935. Die strenge Theorie der Kreiszyllinderschale in ihrer Anwendung auf die Zeiss-Dywidag-Schalen. *Beton u. Eisen*, 34: 257–264, 283–294.
- Dischinger, F. 1936. "Shell Construction in Reinforced Concrete". *Second Congress IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)*, Berlin, preliminary Report, 2: 693–706.
- Finsterwalder, U. 1932. Die Theorie der kreiszyllindrischen Schalengewölbe System Zeiss-Dywidag und ihre anwendung auf die Grossmarkthalle in Budapest. *Journal of Bridge and Structural Engineering*. Primer Congreso IABSE, Paris, 127–152.
- Finsterwalder, U. 1935. "Les voiles minces cylindriques raidis transversalement à section en forme de segment circulaire". *Ingenieur Archiv*, n° IV.
- Finsterwalder, U. 1936. "Cylindrical shell structures". *Second Congress IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)*, Berlin, Rapport Final, 2: 449–453.
- Gvozdev, A.A. 1936. Opredelenie velichiny razrushayushchei nagruzki dlya staticheskoi neopredelimoj sistemy, preterpevayushchikh plasticheskie deformatsii. *Proceedings of the Conference on Plastic Deformations*, Akademia Nauk SSSR, Moscow-Leningrad, 19–30.
- Heyman, J. 1967. "Westminster Hall roof". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 37: 137–262.
- Heyman, J. 1977. *Equilibrium of Shell Structures*. Oxford, Oxford University Press.
- Jakobsen, A.Aas. 1937. "Sur le calcul de la voûte cylindrique circulaire". *Travaux*, 60: 529–535.
- Jakobsen, A.Aas. 1939. "Über das Randstörungsproblem an Kreiszyllinderschalen". *Der Bauingenieur*, 29: 394–405.
- Johansen, K.W. 1944. Skalkonstruktion paa Radiohuset. *Bygningsstatistiske Meddelelser*, 15: 1–26.
- Johansen, K.W. 1948. "Critical notes on the calculation and design of cylindrical shells". *Third Congress IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)*, Liège, rapport final, IVc.: 601–606.
- Kazinczy, G.v. 1914. Experiments with Clamped end Beams. *Betonszemle*, 4, 5 y 6: 68–71, 83–87, 101–104.
- Kazinczy, G.v. 1933. Die Plastizität des Eisenbetons. *Beton und Eisen*, 32: 74–80.
- Kazinczy, G.v. 1949. "Beräkning av cylindriska skal med hänsyn till den armerade betongens egenskaper". *Betong*, 34: 239–261.
- Lundgren, H. 1949. *Cylindrical Shells*. Volumen I: Cylindrical Roofs. The Danish Technical Press the Institution of Danish Civil Engineers.
- Maier-Leibnitz, H. 1936. "Test Results, Their Interpretation and Application". IABSE Congress, Preliminary Report, Vol 2. Berlin.
- Morice, P.B. 1952. Research on concrete shell structures. *Proceedings of a Symposium on Concrete Shell Roof Construction*.
- Second Congress IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)*, 1936, Berlin, Preliminary Report, vol. 2.
- Tonda, J.A. 1973. *Cascarones de Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.