

# A aplicação da modelagem em elementos finitos na concepção das cascas de concreto armado

The application of finite element modeling in the design of reinforced concrete shell

**Célia Regina Moretti Meirelles**

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil  
Rua Itambé, 45, cerellesm@mackenzie.com.br.

**Henrique Dinis**

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil.  
Rua Itambé, 45, dinis@mackenzie.com.br.

**Ricardo Hernán Medrano**

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil.  
Rua Itambé, 45, hmedrano@gmail.com

**Abstract.** *This report examines the application of physical models and digital ones as tools in the design of reinforced concrete shells. The development of computational processes and consequently the process of analyzing the structure as the finite element method allows more complex forms to be applied in architectural projects. The research demonstrates the potential of this tool, through the analysis of contemporary projects such as the “Memorial da America Latina” of*  
**Keywords.** *Concrete shells, minimal forms, finite element.*

## Introdução

As estruturas espaciais são aplicadas em projetos de coberturas de grandes vãos como os estádios, ginásios, igrejas, templos etc. As possibilidades de modelagem das superfícies em formas ousadas e leves abrem novas perspectivas para as futuras gerações de arquitetos.

O projeto das grandes coberturas em concreto armado sempre representou grandes desafios. Arquitetos e engenheiros, como Eduardo Torroja, Felix Candela e Pier Luigi Nervi, não dispunham de ferramentas poderosas de cálculo e utilizavam, portanto, formas curvas de reconhecida eficiência estrutural como as cúpulas, os parabolóides elípticos e parabolóides hiperbólicos.

Eduardo Torroja, por volta de 1930, foi um dos primeiros pesquisadores a realizar um estudo sistemático do comportamento das formas curvas no concreto armado. Ele aplicou a teoria das formas funiculares, utilizadas por Gaudi, às cascas de concreto armado. Torroja fundou em 1959 a International Association for Shell and Spatial Structures, associação cuja principal função é estimular o desenvolvimento e a divulgação de pesquisas em sistemas estruturais leves aplicados às grandes coberturas, tais como cascas finas, tenso estruturas, membranas etc. Entretanto, foi Felix Candela, em 1950, quem popularizou as cascas em concreto armado, devido à exuberância das formas construídas. (ASCE, 1976) (CUETO, 2008)

As cascas em concreto armado apresentaram um grande desenvolvimento no período de 1950 a 1970. Entretanto, as construções em cascas em concreto sofreram um grande declínio devido ao alto custo com formas e escoramentos, assim como com a manutenção das grandes superfícies. A partir de 1990, surgem novas tecnologias, das quais se destacam: o desenvolvimento de um concreto mais uniforme, menos poroso e com maior resistência, o que permite um novo impulso na aplicação das cascas curvas em concreto; o desenvolvimento de ferramentas de modelagem numérica, como o método dos elementos finitos, que permite aos

projetistas das grandes coberturas propor diferentes soluções estruturais e realizar uma análise prévia das solicitações que a estrutura irá estar submetida. (BRADSHAW, 2002)

## As estruturas em cascas

Uma estrutura em casca é uma superfície curva contínua onde a espessura é bem menor que as outras dimensões. O comportamento estrutural da casca é dividido em duas parcelas: a teoria da membrana e a teoria da flexão. Na primeira é considerado o mecanismo resistente de membrana, que resulta em solicitações por força normais e cisalhamento. Na segunda são consideradas as flexões, que resulta na casca curva em solicitações por momentos, esforços normais, cortante e cisalhamento longitudinal. No projeto das cascas deve-se ter uma especial atenção nas regiões dos apoios, pois nestas regiões podem ocorrer solicitações de flexão significativas. (MEDRANO; MEIRELLES, 2005)

Felix Candela, Pier Luigi, Nervi, Heinz Isler não possuíam ferramentas poderosas para calcular suas cascas e buscavam, assim, formas geométricas reconhecidas, de modo a trabalhar com um procedimento de cálculo que permitisse a vantagem de obter cascas finas e sem flexão, à teoria da membrana. As construções projetadas apresentavam resistência pela forma. O principal recurso utilizado para gerar as formas funiculares eram modelos físicos. As cascas finas de concreto armado submetidas à compressão pura eram geradas pela curva inversa da curva catenária. (ASCE, 1976) (CHILTON, 2000)

As grandes coberturas geralmente apresentam dupla curvatura, pois ela melhora sensivelmente o comportamento estrutural tridimensional da estrutura. A casca, quando tratada segundo a teoria da membrana, requer espessura muito pequena e, portanto, não só pesa menos, como também é mais econômica; além disso, a estrutura em si apresenta uma aparência estética mais agradável. (FISCHER; ROBERT, 1964)



Figura 1. Vista externa da biblioteca do Memorial da América Latina.

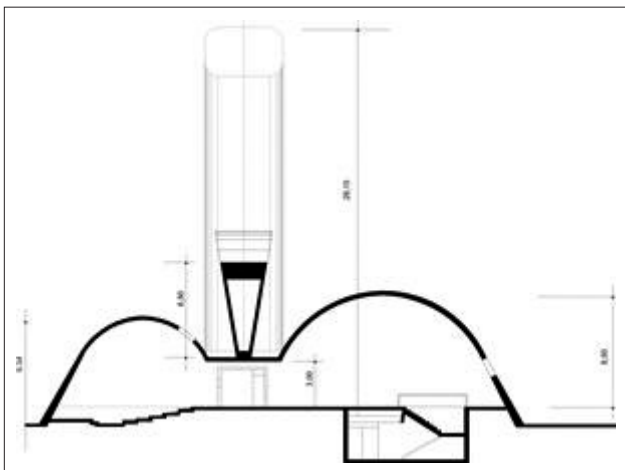


Figura 2. Corte da Biblioteca.

## A aplicação do método dos elementos finitos

As estruturas em cascas que fogem às formas funiculares, com formas quaisquer, assimétricas ou com carregamentos não uniformes, etc., são estruturas submetidas aos esforços de momento, esforços normais, cortante e cisalhamento e apresentam um cálculo matemático bastante complexo dificultando sua aplicação. Os métodos numéricos como o método dos elementos finitos para as estruturas em casca ampliam o campo de aplicação das cascas em concreto armado.

Para demonstrar o potencial desta ferramenta, em especial como um dos instrumentos de concepção do projeto arquitetônico, foi realizado a modelagem da estrutura da casca da biblioteca do Memorial da América Latina, obra de Oscar Niemeyer. O projeto foi calculado por Sussekind através do método dos elementos finitos, sendo a análise da estrutura realizada com o programa SAP-90. (MEMORIAL, 1989) A figura 1 mostra uma vista externa da casca em concreto armado da Biblioteca.

Katakura em sua pesquisa apresenta um amplo estudo das obras construídas no memorial da América Latina, das características do projeto arquitetônico e suas interfaces com a estrutura.

A estrutura da Biblioteca é composta duas cascas curvas assimétricas que delimitam um espaço de aproximadamente 30 metros suportadas por um pórtico longitudinal de 90 metros. Um dos lados das cascas nascem no nível do chão e o outro lado descarrega

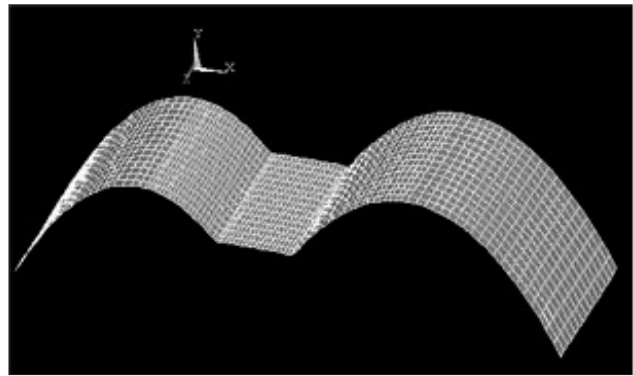


Figura 3. modelagem da biblioteca em elementos finitos.

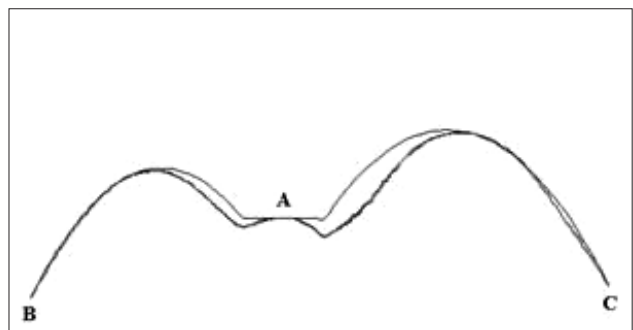


Figura 4. Deformações da casca.

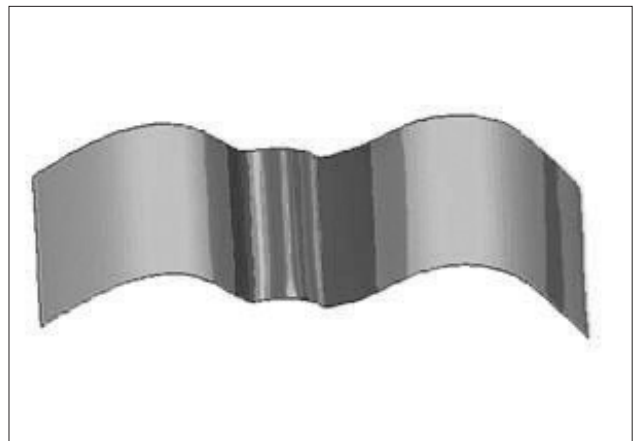


Figura 5: momentos fletores transversas.

em uma laje reta, que está pendurada na viga do pórtico. As cascas apresentam espessuras médias de 25 cm no topo e 45 cm junto ao solo, enquanto a viga apresenta uma altura de 6,5 metros e é oca, em forma trapezoidal. A figura 2 apresenta um corte da estrutura permitindo uma visão das referidas dimensões. (KATAKURA, 2003)

Na concepção da estrutura da biblioteca Niemeyer demonstra sua busca pela expressão plástica do concreto, e não em aplicar formas reconhecidas definidas pela teoria da membrana, como aplicadas por Pier Luigi Nervi, Felix Candela, que não dispunham de ferramentas numéricas para calcular suas cascas. (MEDRANO; MEIRELLES, 2005) (NIEMEYER, 2000)

O pórtico de 90 metros de vão livre foi construído em concreto protendido. Sussekind descreve que a decisão de Niemeyer “ de aplicar este sistema tem um caráter simbólico, pois o vão 90 m poderia ser substituído por nove de 10 m, dois de 45 m, três de 30m ” (MEMORIAL, 1989)

A modelagem apresentada a seguir foi realizada no programa ANSYS versão 5.3, com elemento finito para cascas quadrangular chamado de SHELL99. A modelagem foi aplicada somente na estrutura da casca, como mostra a figura 3.

Segundo Sussekind existem 4 vigas tirantes que cruzam o edifício e contém o empuxo das cascas. (MEMORIAL, 1989) O empuxo não foi considerado nesta modelagem. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com a simulação da estrutura considerando a casca submetida ao seu peso próprio: as deformadas, momentos fletores transversais, longitudinais, esforços de membrana.

A figura 4 apresenta a deformada da estrutura considerando os vínculos de apoio e carregamento de seu peso próprio. O ponto A indica o local onde a viga apóia a casca, o ponto B e o C representam os pontos de apoio sobre a fundação.

A imagem 5 apresenta os resultados obtidos (momentos fletores transversais) na simulação da estrutura no programa ANSYS. A figura 5 demonstra a alta concentração de tensões que ocorre próximo à região onde a casca se apóia na viga (região em vermelho). Devido à assimetria das cascas, as mesmas não estão predominantemente submetidas à compressão, nas regiões próximas ao apoio da viga as cascas apresentaram tensões de flexão.

A modelagem em elementos finitos permite que tenhamos um conhecimento prévio do comportamento da estrutura em função da proposição estrutural que estamos buscando na concepção do projeto, colaborando com as formas e concepções arquitetônicas investigativas ao longo do processo de projeto. Em especial as estruturas em casca de formas não simétricas, devido a sua complexidade de cálculo.

## Conclusão

O projeto das cascas de concreto armado sempre apresentou grandes desafios a arquitetos e engenheiros como Felix Candela, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, pois eles não dispunham de ferramentas para projetar e calcular diferentes formas, tendo que utilizar formas curvas de reconhecida eficiência estrutural.

Hoje, a modelagem em elemento finitos associada à modelagem física abre novas perspectivas e permite ao arquiteto realizar diversas investigações em termos de formas ousadas, como o Memorial da América Latina de Oscar Niemeyer em 1989, o auditório Tenerife Concert Hall, projetado por Santiago Calatrava em 1996.

A aplicação do método dos elementos finitos permite uma leitura prévia do comportamento estrutural, das tensões e deformações, informações que se analisadas durante o processo de projeto permite uma tomada de decisão crítica, uma realimentação da potencialidade e da especulação da forma, do material a ser aplicado nas grandes coberturas e da redução de custos, entre muitas outras possibilidades. Esta ferramenta pode estar integrada na fase de concepção de projeto e não somente na fase final de definição do projeto executivo.

---

## Referências

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS: 1976, Lattice Structures: State-of-the-Art, Journal of the Structural Division, v.102, n.11, p.2197-2230.
- BRADSHAW R.:2002, Special Structures: Past, Present, and Future, In: Journal of Structural Engineering, ASCE, Volume 128, Issue 6, pp. 691-709.
- CHILTON, J.:2000, Heinz Isler: The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture., Thomas Telford Publishing, London.
- CUETO, Juan Ignacio del (ed.): 2008, Aquella primavera creadora ... Cascarones de concreto armado en Mexico, UNAM, Mexico.
- FISCHER, ROBERT E.:1964, Architectural Engineering-New Structures, Mac Graw Hill, New York.
- KATAKURA P.:2003, O ensino do projeto de arquitetura, Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo-USP, São Paulo.
- MEDRANO, R. H.; MEIRELLES, C. R. M.: 2005, Estruturas Espaciais em Cascas: Estudo de Casos Latino-Americano, In: XXI Conferência Latinoamericana de Escuelas y Facultades de Arquitectura – CLEFA, Loja.
- NIEMEYER, Oscar: 2000, Minha Arquitetura, Revan.
- MEMORIAL:1989, Caderno técnico, fundação Memorial da América Latina, São Paulo.