



UM ESTUDO COMPARATIVO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA PLACA CIRCULAR ANULAR SUPERIOR DA CATEDRAL DE BRASÍLIA

Guilherme de Oliveira Coelho

Lineu José Pedroso

guilherme@kozcoe.com.br

lineu@unb.br

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília - Unb
Prédio SG-12, 1º andar, Campus Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, CEP 70910-900,
Brasília - DF, Brasil.

Resumo. *A Catedral de Brasília, com sua planta circular e elementos hiperbólicos, se apresenta como uma das referências em termos de concepção, cálculo e dimensionamento estrutural dentre as obras do Brasil. No presente trabalho, foram desenvolvidos modelos estruturais para a placa circular anular superior de cobertura. A partir de tais modelos, foi realizado um estudo analítico e numérico via MEF, por meio do programa computacional SAP2000®, buscando-se compreender o comportamento suposto e provável desta placa de cobertura. Ao se comparar a avaliação numérica via MEF com o cálculo analítico, estabelecendo as correlações entre essas duas formas de análise estrutural, verifica-se que uma solução analítica básica utilizando as teorias da época pode estar a favor da segurança ou contra, dependendo da condição de contorno adotada e das considerações de carga definidas para a avaliação estrutural, demonstrando a importante decisão tomada pelos engenheiros da época ao solucionar o problema deste projeto único.*

Palavras-chave: *Laje Circular Anular. Cálculo Analítico e Numérico de Placas, Catedral de Brasília; Método dos Elementos Finitos;*

1 INTRODUÇÃO

A Catedral de Brasília, projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer e dimensionada pelo engenheiro calculista Joaquim Cardoso, foi o primeiro monumento a ser construído em Brasília, sendo um marco na Arquitetura e Engenharia Estrutural brasileira, por apresentar características estruturais únicas que transcendem a barreira do tempo quando comparada com obras desenvolvidas mundialmente durante a época de sua construção e, inclusive, quando comparada com obras atuais. Com sua planta circular e elementos hiperbólicos que parecem buscar os céus, o sistema estrutural é o elemento que define a forma da Catedral e a torna uma das referências marcantes em termos de concepção, cálculo e dimensionamento estrutural no conjunto das grandes obras da Capital Federal do Brasil.

Tomando como base os documentos existentes sobre a concepção da estrutura, foram desenvolvidos modelos estruturais para a placa circular anular superior de cobertura, situada no meio da Catedral de Brasília, e que suporta os anjos atirantados por cabos de aço.

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo do comportamento suposto e provável desta placa de cobertura, cujas condições reais de apoio introduzem vários elementos de incerteza no seu modelamento. A partir de tais modelos, foi realizado um estudo analítico e numérico via MEF, este último utilizando-se o programa computacional SAP2000®, buscando-se compreender o comportamento da mesma, e ao mesmo tempo comparar um procedimento moderno com o cálculo analítico, única ferramenta existente na época para o dimensionamento desta laje, e assim estabelecer as correlações possíveis entre essas duas formas de análise estrutural, discutindo-se os pontos discordantes.

1.1 História resumida e dados da Catedral de Brasília

A Catedral foi o primeiro monumento a ser criado em Brasília, tendo sua pedra fundamental lançada em 12 de setembro de 1958. Teve sua estrutura pronta em 1960, onde apareciam somente a área circular de setenta metros de diâmetro, da qual se elevam dezesseis colunas de concreto (pilares de seção parabólica) num formato hiperboloide, que pesam noventa toneladas. Em 31 de maio de 1970, foi inaugurada de fato, já nesta data com os vidros externos transparentes. Em 1990, a Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida foi tombada como monumento histórico e artístico nacional (Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, 2016).

Segundo Paschoalin (2012), o projeto foi feito por Oscar Niemeyer com as suas marcas características: concreto armado, vidro e espelhos d'água. Encomendado pela NOVACAP, este projeto se localiza no Eixo Monumental de Brasília. Teve duas inaugurações, primeiramente em 1970 quando ainda estava inacabada e novamente em 1990, possuindo como colaboradores no projeto o arquiteto Beneditino Irmão Paulo Lachnmeyer, o engenheiro Joaquim Cardozo e o engenheiro Carlos Magalhães.

De acordo com Paschoalin (2012), essa obra repleta de referências simbólicas e arquitetônicas sintetiza de uma maneira simples as influências da arquitetura clássica e gótica nas catedrais. Segundo IAB (2010), o arquiteto já sentenciava que as técnicas modernas do concreto armado possibilitariam a união dessas duas influências estilísticas através de uma solução compacta em planta circular. De acordo com Scottá (2010), a pureza da forma adotada possibilita a criação de uma disposição geométrica, de maneira racional e construtiva.

De acordo com o próprio Niemeyer, segue descrição resumida da obra: “Pensei que a catedral pudesse refletir, como uma grande escultura, uma ideia religiosa, um momento de oração, por exemplo. Projetei-a circular, com colunas curvas, que se elevam para o céu, como um gesto de reclamo e comunicação” (Niemeyer, Oscar, apud Muller, 2002).

A estrutura é descrita em uma sentença por Muller (2002): a partir de base circular, enterrada cerca de 3 m em relação ao nível exterior, série de pilares parabólicos justapostos alçam-se ao céu desde um anel inferior de concreto até unirem-se próximo ao topo por uma laje, sobre a qual repousa expressiva cruz metálica, ficando o intercolúnio completado por panos encurvados de vidro. Exceto pelos elementos subsidiários enterrados – túnel de acesso, batistério e sacristia – e pelo campanário separado, posterior, isso é tudo. Ainda de acordo com Muller (2002), sob a competência de Joaquim Cardozo, a estrutura passou dos vinte e um parabolóides, inicialmente pensados, para dezesseis, e o que era apenas para ser uma cinta de concreto a unir os pilares quase no topo, teve de transformar-se em laje, posta um tanto mais abaixo do previsto.

Segundo Pessoa e Teatini (2002), a Catedral trata-se de uma estrutura auto equilibrada, composta por 16 pilares dispostos, em planta, circunferencialmente. A sustentação é feita por dois anéis de concreto armado. O superior, com, aproximadamente, 6,8 metros de diâmetro, está localizado próximo ao topo dos pilares, absorvendo os esforços de compressão. Esse anel passa por dentro dos pilares, tornando-se imperceptível aos olhos do observador. Já o anel inferior, com 60,0 metros de diâmetro, ao nível do piso, absorve os esforços de tração, funcionando como um tirante, reduzindo as cargas nas fundações, que recebem apenas esforços verticais. Esse anel só é visível no interior da Catedral. De acordo com Pessoa (2012), é notável o contraste da simplicidade da planta baixa com a complexidade da solução estrutural e volumétrica do edifício.

Na parte superior externa do Templo, onde as colunas parabólicas se unem numa laje, repousa expressiva cruz metálica, símbolo da Igreja Católica. Medindo 12 metros de altura, foi ali colocada no dia 21 de abril de 1968. (Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, 2016)



Figura 1 – Foto externa da Catedral Metropolitana de Brasília. Fonte: Os autores (2016)

Da cúpula da Catedral, presos por cabos de aço, pendem três anjos, sendo que o maior deles pesa trezentos quilos e mede 4,45 metros. Já o de tamanho intermediário entre os três pesa 200 quilos e tem 3,40 metros e o menor pesa 100 quilos e mede 2,20 metros. Todos os três foram esculpidos por Alfredo Ceschiatti e Dante Croce, lembrando os três Arcanjos bíblicos: Miguel, Gabriel e Rafael (Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, 2016).



Figuras 2 e 3 – Placa circular anular da Catedral com os 3 anjos atirantados. Fonte: Os autores (2016)

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Segundo Szilard (2004), a equação diferencial de placas retangulares solicitadas por um carregamento $p_z(x,y)$ é a que segue como Eq. (1).

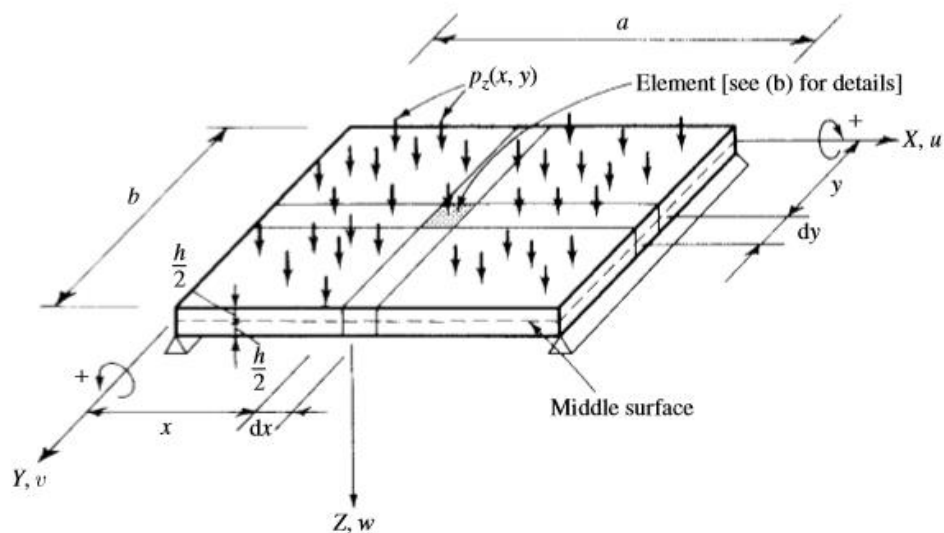


Figura 4 – Placa Retangular. Fonte: Szilard (2004)

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} p_z(x, y) \quad (1)$$

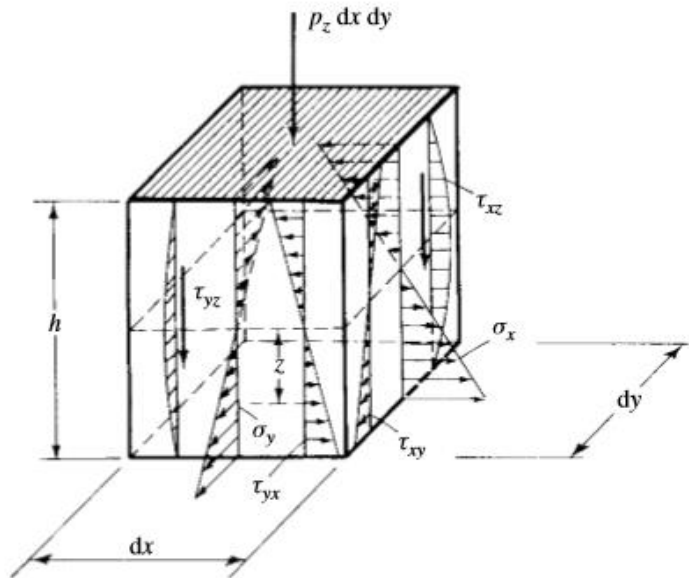


Figura 5 – Componentes de tensão num elemento de placa. Fonte: Szilard (2004)

A Eq. (1) permite obter uma equação que determina $w = w(x,y)$ em função do carregamento $p_z(x,y)$, usando o Laplaciano 2-D, chegamos a Eq. (2).

$$D\nabla^2\nabla^2 w = p_z \quad (2)$$

A Eq. (2) é uma equação diferencial parcial de 4ª ordem, linear e não-homogênea do tipo elíptica a coeficientes constantes (equação bi-harmônica não-homogênea). O problema é considerado resolvido se for encontrada uma expressão da deformada da superfície média $w(x,y)$, que satisfaça a equação de Lagrange (equilíbrio) Eq.(1) e atenda as condições de contorno.

Em relação às placas circulares, os mesmos procedimentos utilizados para as placas retangulares são utilizados, sendo estudadas através da Eq. (1) colocada em coordenadas polares, pela transformação:

$$x = r \cos \varphi \quad \& \quad y = r \sin \varphi \quad (3)$$

logo,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \& \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

Como x é função de r e φ , as derivadas de $w(r, \varphi)$ em x podem ser transformadas em derivadas em relação a r e φ .

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (5)$$

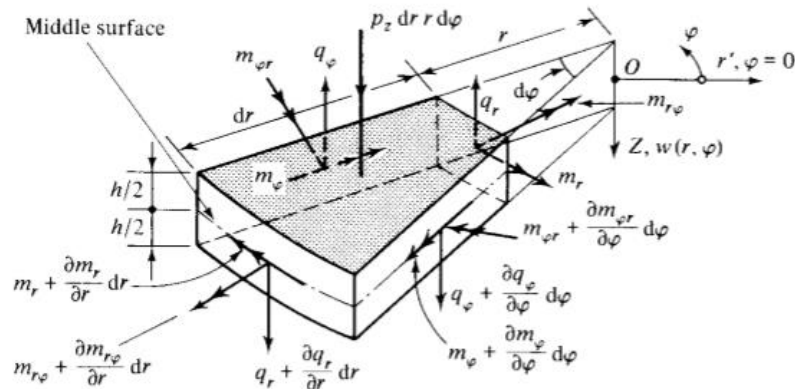


Figura 6 – Elemento de Placa Circular em Coordenadas Polares. Fonte: Szilard (2004)

Logo, o operador Laplaciano ∇^2 em termos de coordenadas polares fica como exposto na Eq. (6) abaixo, que é a equação geral de placas em coordenadas polares.

$$\nabla_r^2 \nabla_r^2 w = \frac{p_z(r, \varphi)}{D} \quad (6)$$

As placas anulares – placas circulares com furo circular no centro – são a base para a laje superior da Catedral de Brasília. Os estudos precedentes se aplicam analogamente a este caso, observando-se as condições de contorno externas ($r = r_0$) e internas ($r = r_i$) como exposto na Fig. 7.

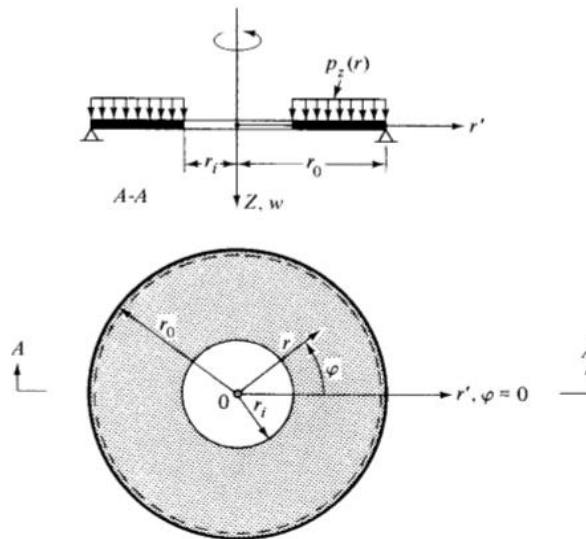


Figura 7 – Placa circular com um furo central. Fonte: Szilard (2004)

3 METODOLOGIA

A laje superior anular da Catedral possui 15,50 metros de diâmetro, sendo que o furo circular central possui 3,10 metros de diâmetro. A sua espessura é variável, assim como demonstrado na Fig. (8), com espessura de 22 cm na borda do furo central até a espessura de 15 cm nos apoios.

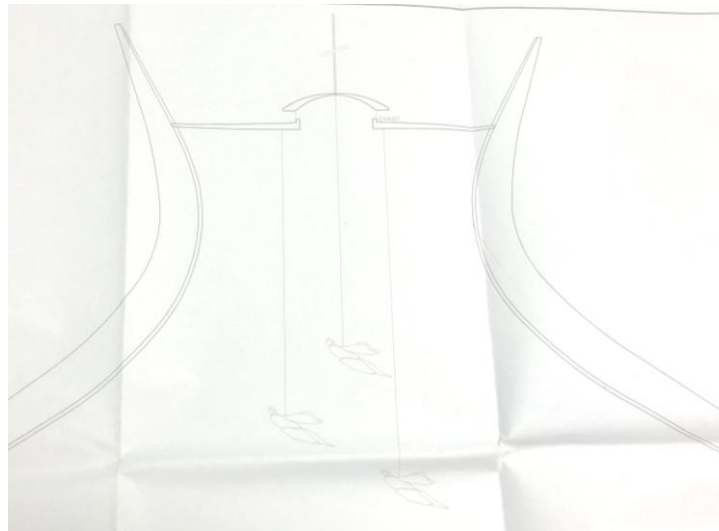


Figura 8 – Corte esquemático da Catedral. Fonte: Projeto fornecido pelo IPHAN – DF foto: Autores

O material foi considerado de acordo com o exposto por Pessoa (2002), com o concreto sendo considerado um material isotrópico, com resistência à compressão $f_{ck} = 21,0$ MPa. Esse valor foi extraído do projeto original, que especificava a resistência do concreto com idade de 28 dias, com o valor de 350 kg/cm^2 . Pela norma brasileira possivelmente empregada na época, NB-1/60, essa resistência era função do tipo de controle tecnológico do concreto. Apesar do responsável técnico da obra declarar ter sido o controle rigoroso, adotou-se, por precaução, o controle regular, resultando no valor do f_{ck} de aproximadamente, 21,0 MPa. Desse valor, obteve-se o módulo de elasticidade, pela norma NB-1/78 (ABNT, 1978), chegando à um valor de 25.662,42 Mpa.

Dentro do software SAP2000®, a laje foi representada por elementos “*shell - thin*”, com a espessura considerada constante com uma média de 20 cm de altura de laje em toda a laje por questões de simplificação de análise e para facilitar a comparação com o estudo analítico, que também adotou tal premissa.

Em um primeiro momento, foi realizado o cálculo analítico da laje anular considerando um modelo com todos os apoios da laje sendo considerados como apoios simples e outro modelo com apoios engastados.

As cargas atuantes na estrutura no primeiro momento foram restringidas às cargas de peso próprio da laje, levando em consideração o peso específico do concreto armado de 25 kN/m^3 , o que resulta em uma carga de 5 kN/m^2 na laje avaliada, além de uma sobrecarga de projeto de $0,5 \text{ kN/m}^2$, totalizando $5,5 \text{ kN/m}^2$.

Com as mesmas premissas da análise analítica, foram executadas as análises numéricas dentro do software SAP2000® e comparadas entre si.

Tanto as cargas resultantes das esculturas dos anjos atirantados quanto da cruz presente acima do furo central só foram avaliadas em um segundo momento, onde só foi executada uma análise numérica dentro do software SAP2000®, com as cargas de acordo com a Tab. (1). As cargas concentradas e os nós onde suas atuações foram consideradas levaram em consideração a definição apresentada em projeto e por Pessoa (2002).

Neste segundo momento, as condições de apoio foram avaliadas tanto quanto apoios engastados como apoios simples. A carga dinâmica não foi considerada em nenhuma das análises.

Tabela 1. Valores das cargas adicionais consideradas no segundo momento de Análise

Elementos	Sobrecarga considerada (kN)	Tipo de Carga
Anjo 1	0,981	concentrada em nó
Anjo 2	1,962	concentrada em nó
Anjo 3	2,943	concentrada em nó
Casca	4 x 25,00	concentrada em 4 nós

4 ANÁLISE, RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro momento a laje anular foi analisada analiticamente, conforme citado na metodologia. A Tab. (2) resume os resultados encontrados na análise considerando apoio engastado e a Tab. (3) considerando apoio simples.

Tabela 2. Análise Analítica da laje anular – apoio engastado

Análise Analítica					
Laje Engastada					
r_i	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
h (espessura)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
r_o	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75
E	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00
ν (Poisson)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
D	17821,125	17821,125	17821,125	17821,125	17821,125
P_z	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
X	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
p	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
k	0,0435	0,0435	0,0435	0,0435	0,0435
w	0,0171	0,0147	0,0123	0,0096	0,0069
M_r	0,0000	8,2915	8,3028	4,8592	-0,8067
M_ϕ	34,6342	24,6021	19,9345	16,2279	12,4380
q_r	0,0000	-3,5521	-6,3938	-8,9513	-11,3667
q_r	0,0000	-0,6486	-1,5567	-2,7242	-4,1512
Análise Analítica					
Laje Engastada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,0044	0,0022	0,0006	0,0000	
M_r	-8,2546	-17,2916	-27,8206	-39,7873	
M_ϕ	8,2246	3,4548	-1,9299	-7,9575	
q_r	-5,8377	-7,7835	-9,9889	-12,4537	

Tabela 3. Análise Analítica da laje anular – apoio simples

Análise Analítica					
Laje Simplesmente Apoiada					
r_i	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
h (espessura)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
r_o	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75
E	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00
ν (Poisson)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
D	17821,125	17821,125	17821,125	17821,125	17821,125
P_z	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
X	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
p	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
k	0,1151	0,1151	0,1151	0,1151	0,1151
w	0,0851	0,0807	0,0745	0,0665	0,0568
M_r	0,0000	31,3166	39,3866	39,6731	36,0334
M_ϕ	117,5244	84,4673	71,7409	64,3043	58,4881
q_r	0,0000	-3,5521	-6,3938	-8,9513	-11,3667
q_ϕ	0,0000	-0,6486	-1,5567	-2,7242	-4,1512
Análise Analítica					
Laje Simplesmente Apoiada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,0452	0,0319	0,0169	0,0000	
M_r	29,8072	21,5632	11,5779	0,0000	
M_ϕ	53,0530	47,4903	41,5619	35,1455	
q_r	-5,8377	-7,7835	-9,9889	-12,4537	

Para comparação e calibração, foi executada a análise numérica no software SAP2000® com as mesmas condições de contorno, materiais constituintes e cargas da análise inicial analítica, conforme modelo apresentado na Fig. (9). A laje foi avaliada com elementos “*shell - thin*”, sendo dividida em 3.200 elementos, com o raio sendo dividido a cada 0,155 metros e o ângulo a cada 4,5°.

Os resultados são apresentados na Tab. (4) para apoio engastado e a Tab. (5) considerando apoio simples.

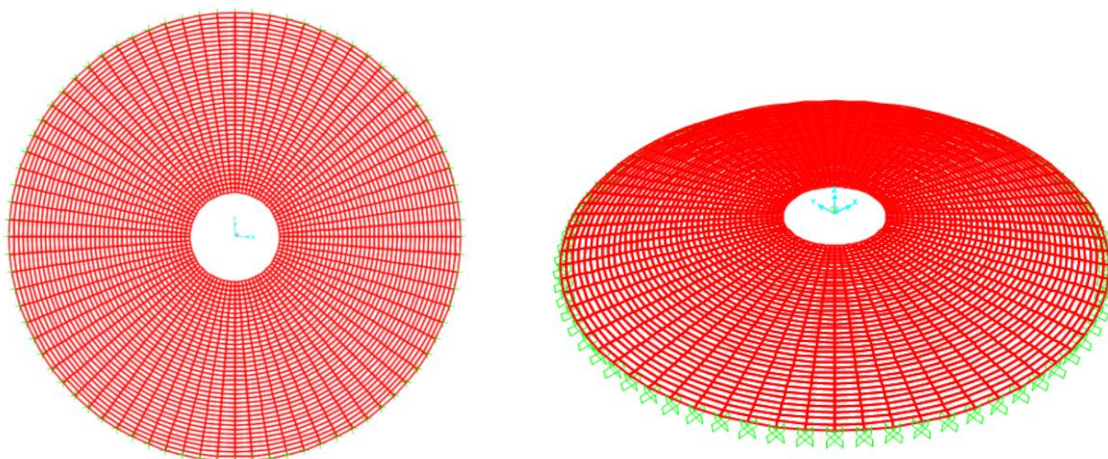


Figura 9 – Modelo da laje anular da Catedral feito no software SAP2000®

Tabela 4. Análise Numérica da laje anular – apoio engastado

Análise Numérica					
Laje Engastada					
r_i	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
h (espessura)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
r_o	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75
E	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00
ν (Poisson)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
P_z	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
w	0,017142	0,014746	0,012257	0,009627	0,006946
M_r	0,083	8,3147	8,311	4,8633	-0,8038
M_ϕ	34,5705	24,5906	19,9336	16,229	12,4395
q_r	0	-0,648	-1,556	-2,722	-4,146
Análise Numérica					
Laje Engastada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,004386	0,002178	0,000606	0	
M_r	-8,2516	-17,2879	-27,8156	-39,7806	
M_ϕ	8,2262	3,4566	-1,9279	-7,9549	
q_r	-5,832	-7,776	-9,978	-12,44	

Tabela 5. Análise Numérica da laje anular – apoio simples

Análise Numérica					
Laje Simplesmente Apoiada					
r_i	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
h (espessura)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
r_o	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75
E	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00	25.662.420,00
ν (Poisson)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
P_z	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
w	0,084241	0,076106	0,067535	0,05811	0,047756
M_r	0,2836	31,3918	39,4104	39,6808	36,0369
M_ϕ	117,2501	84,3937	71,7144	64,2914	58,4789
q_r	0	-0,648	-1,556	-2,722	-4,146
Análise Numérica					
Laje Simplesmente Apoiada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,036555	0,024685	0,012398	0	
M_r	29,8088	21,5644	11,5797	0,0031	
M_ϕ	53,046	47,4845	41,5571	35,1416	
q_r	-5,832	-7,776	-9,978	-12,44	

Os gráficos de 1 a 4 comparam os resultados obtidos na análise analítica e numérica da laje considerando apoio engastado. Já os gráficos de 5 a 8 comparam os resultados obtidos na análise analítica e numérica da laje considerando apoio simples.

Gráfico 1. Gráfico de Deslocamento “w” vs Raio “r” – Laje Engastada

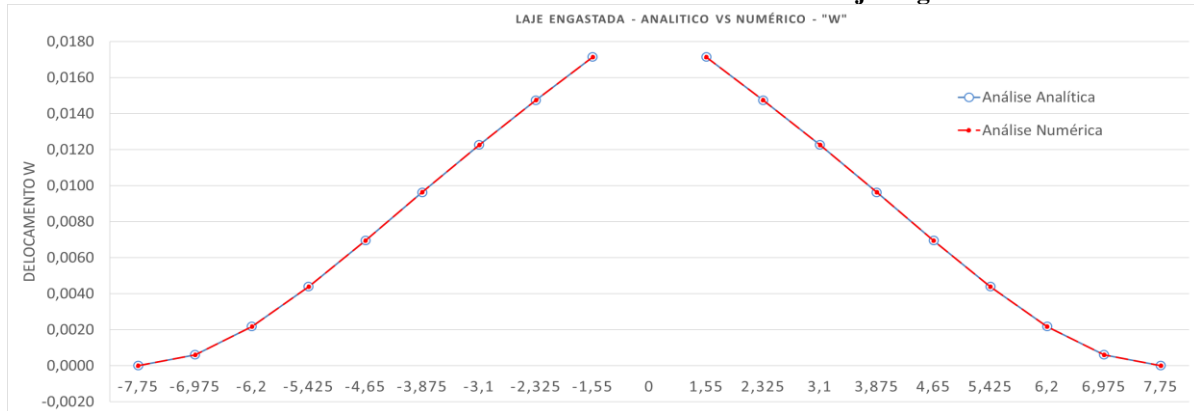


Gráfico 2. Gráfico de Momento “Mr” vs Raio “r” – Laje Engastada

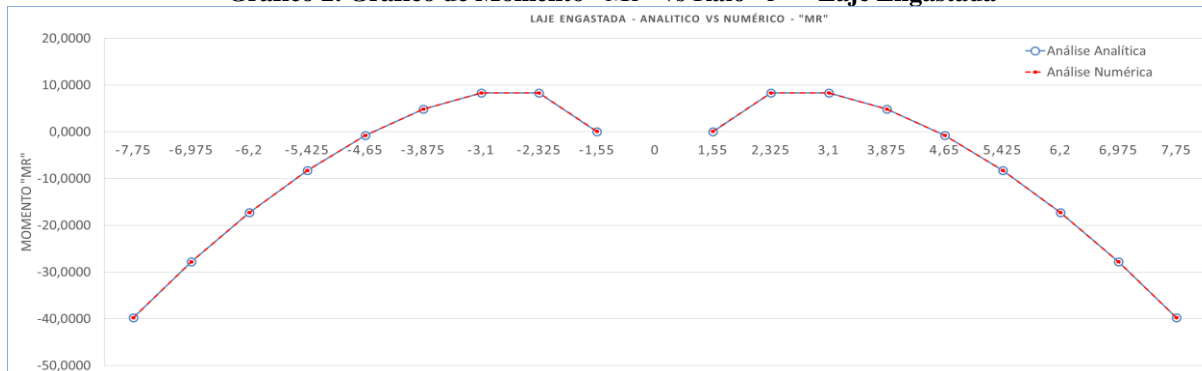


Gráfico 3. Gráfico de Momento “Mφ” vs Raio “r” – Laje Engastada

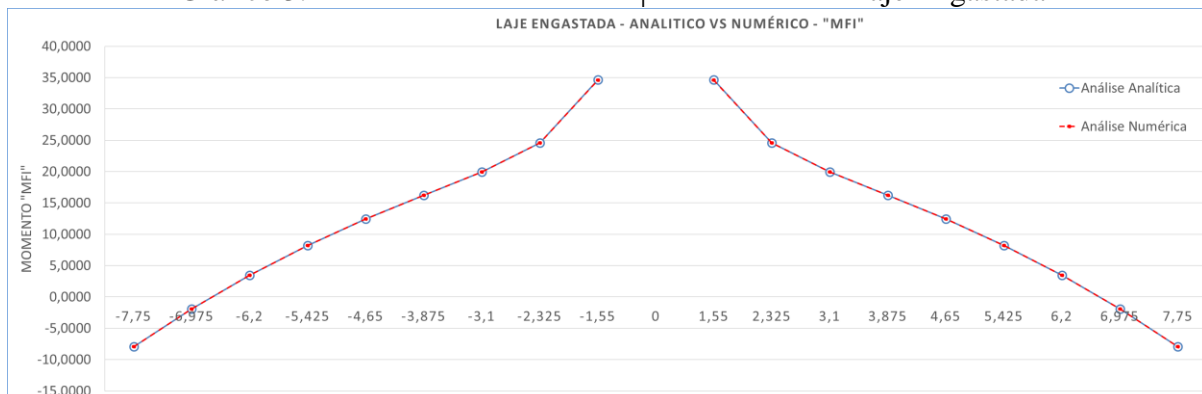


Gráfico 4. Gráfico de Cortante “qr” vs Raio “r” – Laje Engastada

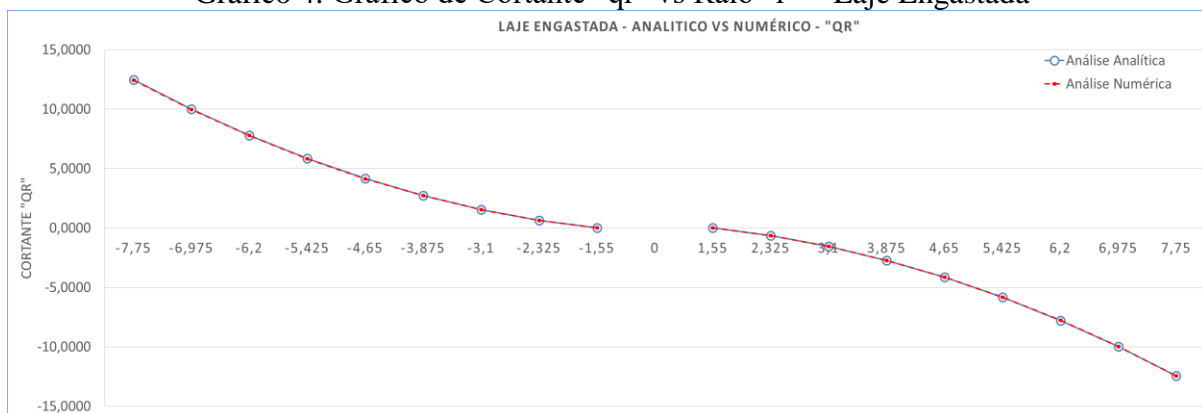


Gráfico 5. Gráfico de Deslocamento “w” vs Raio “r” – Laje Simplesmente Apoiada

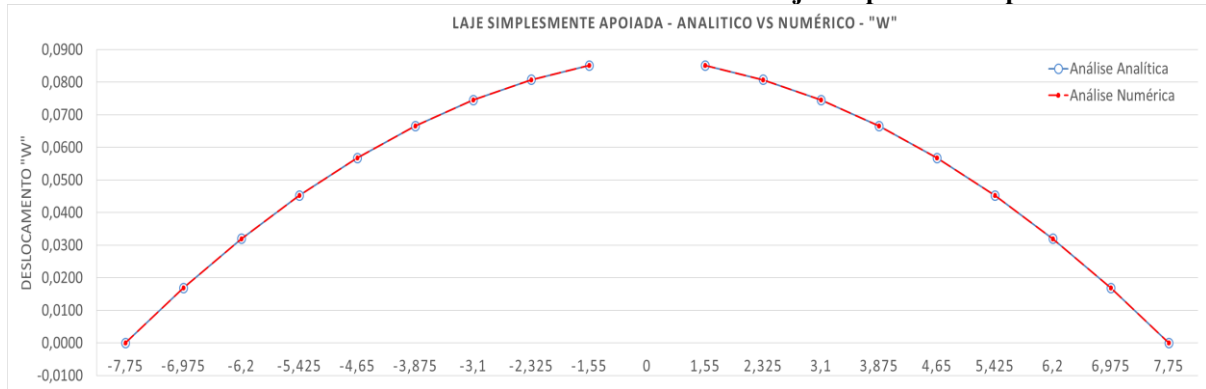


Gráfico 6. Gráfico de Momento “Mr” vs Raio “r” – Laje Simplesmente Apoiada

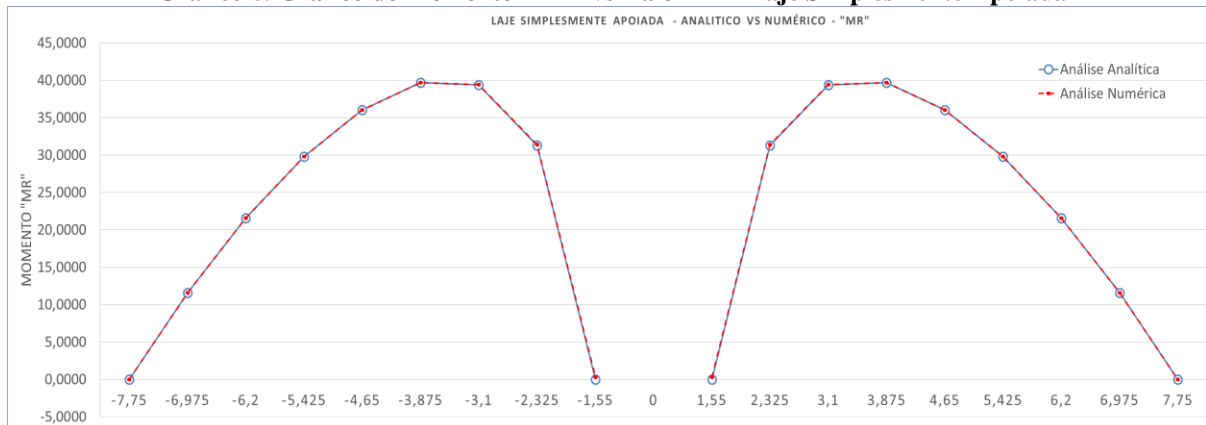


Gráfico 7. Gráfico de Momento “Mφ” vs Raio “r” – Laje Simplesmente Apoiada

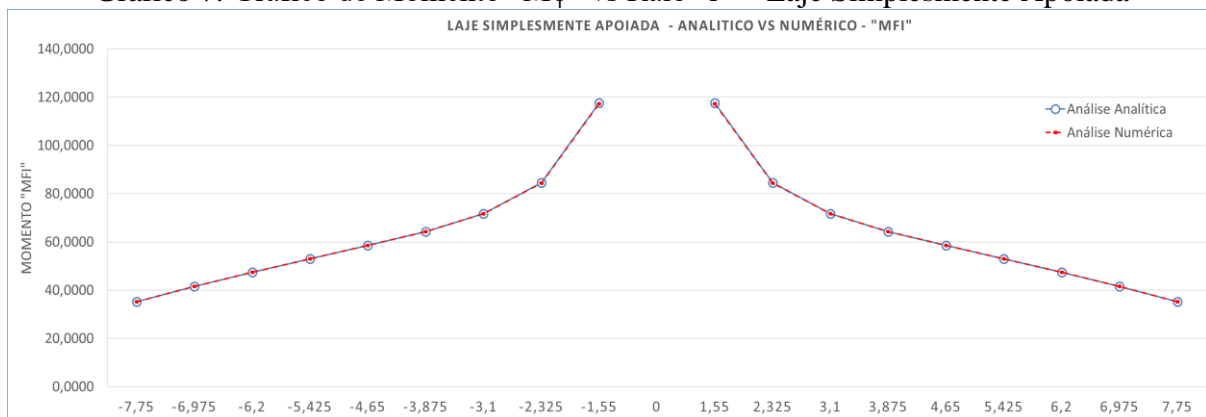
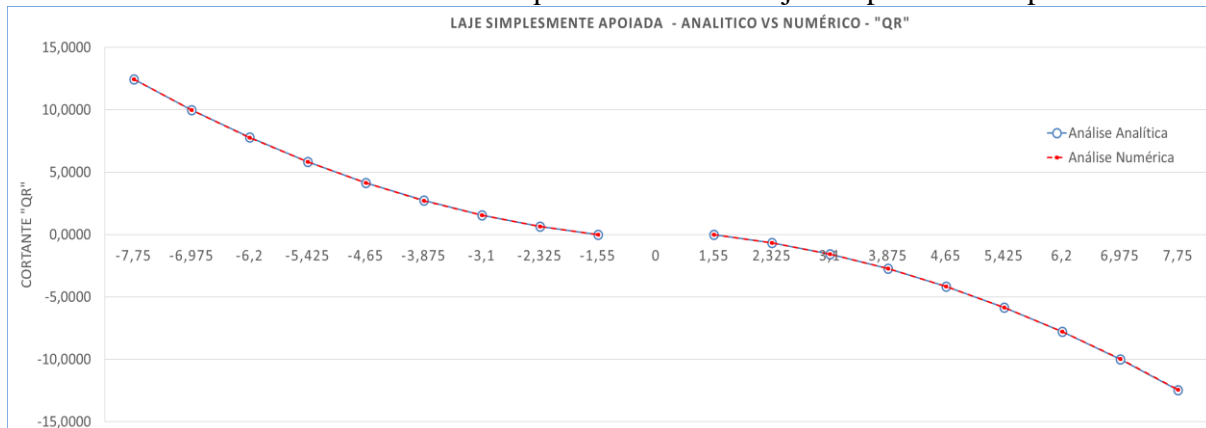


Gráfico 8. Gráfico de Cortante “qr” vs Raio “r” – Laje Simplesmente Apoiada



Para o segundo momento, foram incluídas as condições de carga adicionais. A análise numérica no software SAP2000® neste segundo momento foi realizada com as mesmas condições de contorno, materiais constituintes da análise inicial analítica, com elementos “*shell - thin*”, sendo dividida em 3.200 elementos, com o raio sendo dividido a cada 0,155 metros e o ângulo a cada 4,5°. Os resultados são apresentados na Tab. (6) para apoio engastado e a Tab. (7) considerando apoio simples.

Tabela 6. Análise Numérica da laje anular da Catedral - 2º Momento – apoio engastado

Análise Numérica 2º momento					
Laje Engastada					
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
w	0,024492	0,020611	0,016759	0,012886	0,009115
Mr	1,034000	8,137400	6,787200	1,788900	-5,340300
M _φ	75,554300	39,252600	29,278500	22,420900	16,349500
q _r	-25,000000	-2,611000	-3,041000	-4,104000	-5,496000
Análise Numérica 2º momento					
Laje Engastada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,005651	0,002760	0,000756	0,000000	
Mr	-14,117600	-24,356900	-35,977800	-48,943500	
M _φ	10,329200	4,054700	-2,623700	-9,787800	
q _r	-7,167000	-9,106000	-11,307000	-13,769000	

Tabela 7. Análise Numérica da laje anular da Catedral - 2º Momento – apoio simples

Análise Numérica 2º momento					
Laje Simplesmente Apoiada					
r (Ponto avaliado)	1,55	2,325	3,1	3,875	4,65
w	0,107062	0,096117	0,084780	0,072544	0,059329
Mr	1,280800	36,527100	45,044000	44,618800	39,974800
M _φ	177,292300	112,841800	92,995300	81,560200	73,000000
q _r	-25,000000	-2,610000	-3,042000	-4,104000	-5,496000
Análise Numérica 2º momento					
Laje Simplesmente Apoiada					
r (Ponto avaliado)	5,425	6,2	6,975	7,75	
w	0,045232	0,030453	0,015265	0,000000	
Mr	32,697100	23,433300	12,484600	0,005000	
M _φ	65,478100	58,228400	50,881000	43,237500	
q _r	-7,167000	-9,106000	-11,307000	-13,766000	

5 CONCLUSÃO

A partir do modelo inicial avaliado, pressupõe-se que o estudo analítico existente na época do projeto da Catedral de Brasília possuía as mais diversas limitações em relação às condições de contorno e de carga do que se queria construir, causando uma dificuldade impar ao projetista estrutural Joaquim Cardoso.

Quando comparada com uma avaliação numérica da Catedral, elaborada por meio do software SAP2000, buscando-se compreender o comportamento da mesma, verifica-se que uma solução analítica básica utilizando as teorias da época podem estar a favor da segurança ou contra, dependendo da condição de contorno adotada e das considerações de carga definidas para a avaliação estrutural, demonstrando a importante decisão tomada pelos engenheiros da época ao solucionar o problema deste projeto único.

REFERÊNCIAS

Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida. História e Linha do Tempo. Em: < <http://catedral.org.br/> >. Acesso em 27 de junho de 2016.

IAB (org.) Guia de obras de Oscar Niemeyer: Brasília 50 anos. – Brasília: Instituto dos Arquitetos do Brasil: Câmara dos Deputados, Edições Câmara (Série obras em parceria; n. 1), 2010.

Müller, Fábio, 2003. *Catedral de Brasília, 1958-70: Redução e Redenção*, Cadernos de Arquitetura e Urbanismo 10 (11) (2003) 9-34.

Paschoalin, Rachel Filgueiras. 2012. *Restauração da Catedral de Brasília: Desafios e Conflitos da Restauração da Arquitetura Moderna*. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Ambiente Construído, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora.

Pessoa, Diogo Fagundes, 2002. *A estrutura da catedral de Brasília: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – Unb.

Pessoa, Diogo Fagundes, & Teatini, J. Carlos. 2002. *Catedral de Brasília: Histórico de Projeto/Execução e Análise da Estrutura*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Volume 2, No. 2, 2002. p. 21-30.

Porto, Cláudia Estrela. 2013. *Um estudo comparativo da forma estrutural de dois monumentos religiosos em Brasília: a catedral e o estupa tibetano*. Volume 7, No. 9 (Serial No. 70), pp. 1092-1110 Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359, USA.

Scottá, Luciane. 2010. *Arquitetura Religiosa de Oscar Niemeyer em Brasília*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília – Unb.

Szilard, Rudolph. 2004. *Theories and applications of plate analysis: classical, numerical and engineering methods*. Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Inc.