

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

O SISTEMA ESTRUTURAL NA OBRA DE OSCAR NIEMEYER

LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: MÁRCIO AUGUSTO ROMA BUZAR

BRASÍLIA
Setembro de 2010

Inojosa, Leonardo da Silveira Pirillo

O Sistema Estrutural na Obra de Oscar Niemeyer /Leonardo

da Silveira Pirillo Inojosa

Brasília, 2010

159 p. :il.

Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade de Brasília, Brasília.

1. Estrutura.

2. Brasília. 3. Oscar Niemeyer.

I. Universidade de Brasília. FAU

II. Título.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

O SISTEMA ESTRUTURAL NA OBRA DE OSCAR NIEMEYER

LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA

Dissertação de Mestrado submetida à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração Tecnologia.

Aprovado por:

Márcio Augusto Roma Buzar, Doutor (FAU, UnB)
(Orientador)

João Carlos Teatini de Souza Clímaco, Doutor (Faculdade de Tecnologia, UnB)
(Examinador Interno)

Yopanan Conrado Pereira Rebello, Doutor (Universidade São Judas Tadeu, SP)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, 02 de setembro de 2010.

À minha esposa, Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais e irmãos pelo carinho e apoio. À minha esposa, Fernanda, pelo incentivo e pela grande ajuda sempre. Agradeço também meu professor e orientador Márcio Buzar, por toda ajuda e determinação tanto para o início, quanto para a conclusão desse trabalho.

"Antigamente quando se terminava uma estrutura viam-se apenas lajes e apoios. A arquitetura vinha depois, como uma coisa secundária e eu queria o contrário, essa junção das estruturas com a arquitetura, queria que elas nascessem juntas e fossem bastante sem nenhum detalhe para demonstrar o projeto de arquitetura."
(Oscar Niemeyer, fonte: Fundação Oscar Niemeyer)

RESUMO

Oscar Niemeyer defende que arquitetura e estrutura devem se desenvolver juntas. Apesar disso, o que se vê normalmente é uma relação de afastamento entre esses dois elementos da construção civil. Esse trabalho mostra importantes obras em que o sistema estrutural teve um papel essencial na determinação do desenho arquitetônico, com exemplos de arquitetos como Affonso Reidy, Paulo Mendes da Rocha e João Filgueiras Lima, que souberam como poucos explorar a relação arquitetura-estrutura. Na obra de Niemeyer é evidente a relação direta entre forma e estrutura, sendo sua arquitetura marcada pela importante influência de Lúcio Costa e a arquitetura modernista de Le Corbusier, que chegava ao Brasil no início de sua carreira e que ele ajudou a revolucionar. Sua carreira é marcada também pela presença constante de grandes engenheiros, como Joaquim Cardozo e José Carlos Sussekind que, com participação efetiva desde a concepção de seus projetos, proporcionaram obras marcadas pelo arrojo estrutural e por grandes desafios tecnológicos. Dentre esses desafios destacamos duas obras do período da construção de Brasília, momento em que o próprio arquiteto considerou ter valorizado a estrutura em seus projetos. A primeira é a Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, em que a arquitetura é definida pela própria estrutura da capela. A segunda é a Cúpula invertida da Câmara dos Deputados, que, com sua forma inusitada, causa surpresa aos visitantes e foi um dos principais desafios estruturais e tecnológicos para o engenheiro Joaquim Cardozo. Por meio de análises feitas com o auxílio de programas computacionais difundidos no meio acadêmico, foram coletados dados que permitiram entender como as escolhas das soluções estruturais pelo arquiteto e pelo engenheiro, durante o processo projetual, conseguiram resultados estéticos monumentais e inovadores.

Palavras chave: Estrutura, Brasília, Oscar Niemeyer.

ABSTRACT

Oscar Niemeyer states that architecture and structure should develop together. However, what is normally seen is a distance between these two elements of construction. This work shows a group of important constructions where the structural system had a important role in the final architectural design, as in the work of architects such as Affonso Reidy, Paulo Mendes da Rocha and João Filgueiras Lima, who knew, as only a few could, how to explore the relations between architecture and structure. The relation between form and structure is evident in Oscar Niemeyer's work, his architecture being marked by the influence of Lucio Costa and the modernist architecture of Le Corbusier, that had just arrived in Brasil in the beginning of his career and that Niemeyer helped become revolutionary. His career is also affected by the constant presence of great engineers such as Joaquim Cardozo and José Carlos Sussekind, who, participating in the projects since the beginning of the creative process, created works that are known by the revealing structure and great technological challenges. Two of those challenges, from the period of the construction of Brasilia, when Niemeyer says he most valorized the structure, are analyzed in this work. The first one is the Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, where the architecture is totally defined by the structure of the chapel. The second is the inverted dome of the Câmara dos Deputados, which with its unusual form causes surprise in the visitors and was one of the great challenges of the engineer Joaquim Cardozo. Through analysis using computer softwares known in the academic fields, we could collect enough data to allow us to understand how the choices for the structural solutions made by the architect or the engineer during the projectual process could result in such innovative monuments.

Key words: Structure, Brasília, Oscar Niemeyer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oscar Niemeyer, em 1960. Foto de Rene Burri, fonte: FARIA, 2007, pag. 48..	24
Figura 2: Edifício do Ministério da Educação e Saúde, atual Palácio Gustavo Capanema, Rio de Janeiro. Fonte: CPDOC FGV em CASTRO, 2009.	26
Figura 3: Igreja São Francisco de Assis na Pampulha, Belo Horizonte-MG. Foto do autor.	27
Figura 4: Palácio do Planalto em Brasília. Foto de Bernie DeChant, fonte: FARIA, 2007, pag. 21	30
Figura 5: Supremo tribunal Federal em Brasília. Foto do autor.	30
Figura 6: Catedral de Brasília. Foto do Autor.	31
Figura 7: Croqui de Oscar Niemeyer para o Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.....	32
Figura 8: Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer	32
Figura 9: Corte dos blocos principais do conjunto da Procuradoria Geral da República em Brasília, projeto de 1995. Fonte: NIEMEYER, 2004 pag. 269.	34
Figura 10: Classificação de vigas. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 99.	36
Figura 11: Exemplos da associação “Viga x Pilar”. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 169.....	36
Figura 12: Relação das dimensões entre viga e pilares. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 170.	37
Figura 13: Associações viga x viga: laje nervurada e grelha. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 161.	37
Figura 14: Planta Nível Túnel do Congresso Nacional. Fonte: Desenho do autor em Corel Draw (Baseado em Arquivo de AutoCad cedido por Ricardo André)	38
Figura 15: Associação vigas metálicas com laje de concreto. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 164.	39
Figura 16: Cúpula formada pela sucessão radial de arcos. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 141.	39
Figura 17: Formas Funiculares – Cabos e Arcos. Fonte: adaptado de REBELLO, 2000, pag. 91 e 92.	40
Figura 18: Corte Esquemático do arco gerador da cúpula do Museu Nacional. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.	40
Figura 19: Reações horizontais na base do arco. Fonte: REBELLO, 2000.....	41
Figura 20: Paralelos e Meridianos. Fonte: REBELLO, 2000	41
Figura 21: Planta de Cobertura. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.....	42
Figura 22: Desenho da secção da Catedral de Notre-Dame, Reims, França. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42.....	44
Figura 23: Vista interna da Catedral de Notre-Dame, Reims, França. Foto do autor.	44

Figura 24: Esquema estrutural do Arco Funicular. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42	45
Figura 25: a. Forth Bridge, Escócia, 1890. b. “Maquete Humana”, executores demonstram o sistema estrutural. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 98.	46
Figura 26: Vista do corpo principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, bloco de exposições. Rio de Janeiro. Fonte: CASTELOTTI, 2006, p.86.....	48
Figura 27: Detalhe do pilar em “V” do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Foto de Meindert Versteeg, 2007. Fonte: SEGRE, 2007. p. 6.....	49
Figura 28: Corte do pórtico do bloco principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, armaduras. Fonte: VASCONCELLOS, 2004. p. 256.....	50
Figura 29: Diagrama de momento fletor do pórtico do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Desenho do autor. Programa FTOOL.....	50
Figura 30: Diagrama de momento fletor simulando uma forma tradicional para o pórtico do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Desenho do autor. Programa FTOOL.	51
Figura 31: Estação Largo 13, São Paulo, SP. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 21.	51
Figura 32: Diagrama de momento fletor para o pórtico da Estação Largo 13, São Paulo, SP. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 21.....	52
Figura 33: Cortes transversais do Palácio da Alvorada. Fonte: VACONCELOS, 1992 (Volume I), pág. 88.	53
Figura 34: Foto da construção em que aparecem os apoios dos pilares do Palácio da Alvorada antes de serem aterrados. Fonte: VACONCELOS, 1992 (Volume I), pág. 89. .	54
Figura 35: Palácio da Alvorada, Brasília 1957. Foto : Marcel Gautherot. Fonte: UNDERWOOD. 2003 p. 86.....	54
Figura 36: Croqui de Niemeyer para a coluna do Palácio da Alvorada. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	55
Figura 37: Vista da varanda do Palácio da Alvorada. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer;55	
Figura 38: Estrutura dos pilares da Catedral de Brasília, 1959 – primeira fase da construção. Fonte: Arquivo Público do DF.	56
Figura 39: Detalhe da construção do anel de tração na base da Catedral de Brasília, 1959. Fonte: Arquivo Público do DF.	57
Figura 40: a. Estrutura da Catedral de Brasília. Programa AutoCAD. b. Estruturas de escoramento dos pilares por Carlos Magalhães, 2001. Fonte: PESSOA, 2002.....	57
Figura 41: a. Diagrama de forças cortantes no eixo vertical Y. b. Momentos fletores máximos. Programa SAP 2000. Fonte: PESSOA, 2002.....	58
Figura 42: Antigo Touring Club do Brasil, Brasília. Foto do Autor.	59
Figura 43: Diagrama de Momento Fletor da viga de cobertura do Touring Club do Brasil, Brasília. Desenho do autor. Programa FTOOL.....	59
Figura 44: Diagrama de Momento Fletor de uma viga bi-apoiada com balanços não simétricos. Desenho do autor. Programa FTOOL.	59
Figura 45: Anexo do late Clube Pampulha. Fonte: FONSECA, Roger, 2007, p. 79.....	60
Figura 46: a. Estudo de fluxos para diversas situações dos edifícios; b. Estudo das volumetrias dos edifícios; c. Croqui da Praça Maior com os quatro edifícios. Desenhos de	

Oscar Niemeyer para a Praça Maior da UnB. Fonte: Revista Darcy, nº 3 - Nov. e Dez. de 2009, pp. 56-61.....	61
Figura 47: Imagem de satélite do ICC. Fonte: MOREIRA, 2007, p. 23.	62
Figura 48: Montagem das vigas pré-moldadas da cobertura do ICC. Fonte: FONSECA, Regis, 2007, p. 6.....	62
Figura 49: Fachada do Palácio do Itamaraty, Brasília. Foto do autor.....	63
Figura 50: Jardim interno do Palácio do Itamaraty, Brasília. Foto do autor.	64
Figura 51: Diagrama de momentos fletores nas vigas no sentido Leste-Oeste do Palácio do Itamaraty. Fonte: SANTOS, 2007.	64
Figura 52: Fachada do Palácio da Justiça em Brasília. Foto do autor.....	65
Figura 53: Modificações na fachada do Palácio da Justiça em Brasília. Fonte: MOREIRA, 2007.	65
Figura 54: a. Gráfico de deslocamento da grelha laje do terceiro pavimento e b. gráfico de deslocamento da grelha da laje de cobertura do Palácio da Justiça. Programa CAD/TQS. Fonte: MOREIRA, 2007.	67
Figura 55: Vista aérea da Ponte Costa e Silva em Brasília. Foto de Augusto Areal. Fonte: Infobrasília.	68
Figura 56: Ilustrações com base no Gráfico de Momento Fletor para a Ponte Costa e Silva. Fonte: FONSECA, Roger, 2007, p. 105.....	68
Figura 57: Implantação do Conjunto Cultural. Fonte: Museu Nacional.....	69
Figura 58: Vista externa do Museu nacional. Foto do Autor.....	71
Figura 59: Vistas Internas do Museu Nacional. Fonte: Skyscrapercity.....	71
Figura 60: Perturbação de Borda. Fonte: REBELLO, 2000.....	72
Figura 61: a.Execução das Fundações e do Anel de Compressão na base da cúpula. b. Execução da base da cúpula – parede dupla.Fonte: VIA Engenharia.....	73
Figura 62: Escoramento das Vigas Radiais. Fonte: VIA Engenharia.....	73
Figura 63: Vigas Radiais concretadas. Fonte: VIA Engenharia.....	74
Figura 64: Laje do pavimento de exposições concretada. Fonte: VIA Engenharia.	74
Figura 65: Planta de Formas do Mezanino. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.	75
Figura 66: Corte Longitudinal. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.....	75
Figura 67: Detalhes dos Tirantes. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.....	76
Figura 68: Rampa externa do Museu Nacional. Foto do Autor.....	77
Figura 69: Planta de Formas da Rampa 3. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.	77
Figura 70: Corte da Rampa 3. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.....	78
Figura 71: Concretagem da Rampa 3. Fonte: VIA Engenharia.	78
Figura 72: a. Sistema estrutural da laje “cogumelo tipo Baumgat”; b. Funcionamento do sistema estrutural de contraventamento desenvolvido por Baumgart para o edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro. Fonte: VACONCELOS, 1992 (Volume I), págs 29 e 30.	79
Figura 73: Ponte sobre o Rio do Peixe, Santa Catarina, 1930. Fonte: (THOMAZ, s.d.)... 81	81
Figura 74: Sede da Editora Mondadori em Milão, Itália. Fonte: UNDERWOOD, 2002, pag. 111.	81

Figura 75: Croqui de Niemeyer para o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói, no texto, uma alusão à contribuição de Bruno Contarini. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.....	82
Figura 76: Palácio Tiradentes, em Belo Horizonte – MG. Fonte: Revista Techne, nº 154. Janeiro de 2010.	83
Figura 77: Joaquim Cardozo “O Engenheiro da Poesia” – Desenho de Carlos Scliar, 1961. Fonte: Site oficial de Joaquim Cardozo, Rede de Idéias.	84
Figura 78: Caixa d’Água e Igreja da Sé em Olinda - PE, em foto de G. E. Kidder Smith para “The Architectural Review”, março de 1944. Fonte: Portal Vitruvius - Arqtextos 072, maio de 2006.	86
Figura 79: Laboratório de Anatomia Patológica em Recife, projeto do Arq. Luis Nunes, 1936 foto de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York – 1943. Fonte: Portal Vitruvius - Arqtextos 072, maio de 2006.....	86
Figura 80: Croqui do Pavilhão Luiz Nunes (Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE). Fonte: Croquis de Arquitetura.....	87
Figura 81: Rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arquiteto Luiz Nunes, construído em 1935-36.Fonte: Ângelo Rigon.....	87
Figura 82: Fundos da Igreja São Francisco de Assis - Painel de Portinari 1945-55 (Conjunto da Pampulha). Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.	88
Figura 83: Antigo cassino, 1950, atual Museu de Arte da Pampulha (Conjunto da Pampulha). Foto de Cândia de Oliveira (Museu Histórico Abílio Barreto).Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.	89
Figura 84: Casa do Baile. 1943-48 (Conjunto da Pampulha). Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.	89
Figura 85: Capa do Catálogo da Exposição “Brazil Buids”, Museu de Arte Moderna de Nova York em 1943. Organizado por Phillip Goodwin e G. E. Kidder Smith. Fonte: Revista Projeto Design, Ed. 301 - Março de 2005.....	90
Figura 86: a. Pavilhão Brasileiro em Nova Iorque, Lúcio Costa e Oscar Niemeyer, 1937; b. Brise-soleil do Ministério da Educação e Saúde, Lúcio Costa e equipe, 1936-42; c. Grande Hotel de Ouro Preto, Oscar Niemeyer, 1940; d. Associação Brasileira de Imprensa, Irmãos Roberto, 1936. Fotos de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York - 1943. Fonte: Portal Vitruvius - Arqtextos 072, maio de 2006...	90
Figura 87: Foto da Construção do Congresso Nacional. Fonte: Arquivo Público do DF ..	91
Figura 88: Foto da Construção do Congresso Nacional e Esplanada dos Ministérios. Fonte: Arquivo Público do DF.	91
Figura 89: Foto da Construção da Cúpula do Senado. Fonte: Arquivo Público do DF.....	92
Figura 90: Três momentos na Construção de Brasília: a. Cúpula da Câmara dos Deputados, 1958; b. Catedral de Brasília, 1959; c. Museu Histórico e Brasília, 1960. Fonte: Arquivo Público do DF.	92
Figura 91: Detalhe da Construção de uma das colunas do Palácio da Alvorada. Foto reproduzido da Revista Brasília, janeiro de 1958. Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.	93

Figura 92: Candangos (operários da construção de Brasília) em desfile no dia da inauguração da cidade. Foto: Revista Manchete, 7 de maio de 1960.....	96
Figura 93: Família Kubitschek. Fonte: Projeto Memória.....	97
Figura 94: Imagem aérea da Igrejinha ainda em construção. Fonte: TAMARIMI, 1997...	98
Figura 95: Irmã Alvarenga, Freira Vicentina – década de 40. Fonte: SANTOS, 2005.....	99
Figura 96: Planta da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Desenho do Autor – adaptado de planta original (IPHAN).	100
Figura 97: Abertura lateral na parede externa da Igreja. Foto do Autor	100
Figura 98: Fachada da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Foto do Autor.....	101
Figura 99: Vista da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Foto do autor.....	102
Figura 100: O Artista Plástico Athos Bulcão e o Arquiteto Oscar Niemeyer em Agosto de 1985. Fonte: Fundação Athos Bulcão.....	102
Figura 101: Desenhos dos azulejos do Pannel de Athos Bulcão – a. “Espírito Santo”; b. “Estrela”. Fonte: Fundação Athos Bulcão.	103
Figura 102: a. Pannel de Azulejo na lateral da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima; b. Detalhe da disposição dos dois elementos. Fotos do Autor.	103
Figura 103: Corte Longitudinal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Desenho do autor – adaptado de planta original (IPHAN).	104
Figura 104: Planta do Pilar Principal. Desenho do autor – adaptado de planta original (IPHAN).....	105
Figura 105: Detalhe do encontro do Pilar principal com a cobertura. Foto do autor.....	105
Figura 106: Vista posterior da Igrejinha – não se nota a presença de vigas na cobertura. Foto do autor.....	106
Figura 107: Cópia da Planta de Fundações da Igrejinha Nossa senhora de Fátima. Fonte: IPHAN - DF	107
Figura 108: Cópia da Planta e Cortes da Estrutura da Igrejinha Nossa senhora de Fátima. Fonte: IPHAN - DF.....	107
Figura 109: Perspectiva esquemática da estrutura da Igrejinha. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	108
Figura 110: Corte do sistema – viga-pilar – simplificado. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	109
Figura 111: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000. ...	109
Figura 112: Diagrama de Momentos Fletores. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	110
Figura 113: Diagrama de Deformações. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	110
Figura 114: Corte do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	110
Figura 115: Diagrama de Forças Normais do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	111
Figura 116: Diagrama de Momentos Fletores do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	111
Figura 117: Diagrama de Deformações do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	112

Figura 118: Sistema Estrutural da Igreja Nossa Senhora de Fatima. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	112
Figura 119: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000. ...	113
Figura 120: Diagrama de Momentos Fletores. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	113
Figura 121: Diagrama de Momentos Fletores – detalhe do Pilar Frontal. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	114
Figura 122: Pilar Frontal da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Foto do autor.	114
Figura 123: Diagrama de Momentos Fletores na direção “x” na laje da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	115
Figura 124: Diagrama de Momentos Fletores na direção “y” na laje da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	115
Figura 125: Diagrama de Deformações. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	116
Figura 126: Croquis do plano piloto. Projeto de Lúcio Costa para a nova capital do Brasil. Fonte: Brasil em Foco.	117
Figura 127: Praça dos Três Poderes. Projeto de Lúcio Costa. Fonte: IPHAN.	117
Figura 128: Volumetria proposta por Lúcio Costa. Fonte: IPHAN.	118
Figura 129: Congresso Nacional. Foto do Autor.	119
Figura 130: Croqui de Niemeyer para o Congresso Nacional. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	120
Figura 131: Oscar Niemeyer em frente ao Congresso Nacional ainda em construção em Brasília, 1960. Foto de Rene Burri, fonte: FARIA, 2007, pag. 59.	121
Figura 132: Foto da Construção da Cúpula da Câmara. Fonte: Arquivo Público do DF	122
Figura 133: “Cúpula Invertida”, Câmara dos Deputados, Brasília-DF. Foto do Autor.	123
Figura 134: O ponto de tangência entre a primeira e a segunda casca, internamente. Foto do autor.	123
Figura 135: Vão entre a laje forro e a terceira casca. Foto do autor.	123
Figura 136: Furo na laje forro para instalação de luminárias, no detalhe a espessura. Fotos do autor.	124
Figura 137: a. Pilares entre a laje forro e a terceira casca. b. Detalhe da junção do pilar na laje forro e c. Detalhe da junção do pilar na terceira casca. Fotos do autor.	125
Figura 138: Detalhes dos pilares. O desgaste do concreto evidencia a grande quantidade de ferro utilizado. Fotos do autor.	125
Figura 139: a. Pilares entre terceira casca e a laje superior. b. Aberturas na terceira casca que permitem uma excelente ventilação. Fotos do autor.	125
Figura 140: Plenário da Câmara dos Deputados. Foto: Roosevelt Pinheiro.	126
Figura 141: Cobertura da Câmara dos Deputados e Torres dos Anexos, é possível notar o vão entre a Laje Superior e a Terceira Casca que aparece pela abertura no centro da laje. Foto do autor.	126
Figura 142: Corte Longitudinal do Congresso Nacional. Fonte: Desenho do Autor em Corel Draw (Baseado em Arquivo de AutoCad cedido por Ricardo André).	127

Figura 143: Corte Transversal da Câmara dos Deputados. Desenho do autor em Corel Draw, baseado em cópias dos desenhos estruturais originais do acervo da Câmara dos Deputados.....	129
Figura 144: Imagens do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida. Fonte: Acervo da Câmara dos Deputados. Fotos do autor.....	131
Figura 145: Detalhe do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida. Fonte: Acervo da Câmara dos Deputados. Foto do autor.....	132
Figura 146: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	132
Figura 147: Perspectiva do sistema estrutural simplificado para análise no programa SAP 2000. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	134
Figura 148: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	134
Figura 149: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	135
Figura 150: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	135
Figura 151: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados sem a estrutura da cobertura. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	136
Figura 152: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	136
Figura 153: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	137
Figura 154: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	137
Figura 155: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados sem a Laje Forro. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	137
Figura 156: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	138
Figura 157: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	138
Figura 158: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	139
Figura 159: Corte esquemático transversal da Cobertura da Câmara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	139
Figura 160: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	139
Figura 161: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	140
Figura 162: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	140
Figura 163: Foto-montagem. Corte da Cúpula da Câmara do Congresso Nacional sobre imagem da Ponte Salginatobel de Robert Maillart. Foto-montagem do autor.....	140
Figura 164: Ponte Luzitânia, Mérida, Espanha (1991) de Santiago Calatrava. Fonte: Panorâmico.....	141
Figura 165: Classificação dos Sistemas Estruturais de Pontes em Arcos. Fonte: “Arquiteturas da Engenharia ou Engenharia das Arquiteturas”, João Marcos Lopes, Maria Bogéa e Yopana Rebello, Pág. 111 – 2006.....	141
Figura 166: Sistema Estrutural completo da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	142

Figura 167: Montagem passo a passo do sistema estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados. Desenhos do autor. Programa SAP 2000.....	143
Figura 168: Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida da Camara dos Deputados – Vista externa das cascas de concreto. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	144
Figura 169: Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida da Camara dos Deputados – Vista interna, laje forro. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	144
Figura 170: Diagrama de Forças Normais dos pilares da laje forro e superiores. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.....	145
Figura 171: Diagrama de Momento Fletor na direção X. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	146
Figura 172: Diagrama de Momento Fletor na direção Y. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	146
Figura 173: Diagrama de Momento Fletor vista interna. Anéis inferior e intermediário. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	147
Figura 174: Diagrama de Momento Fletor nas vigas da laje forro. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	147
Figura 175: Diagrama de Momento Fletor nas vigas da laje superior. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	148
Figura 176: Diagrama de Deslocamento Elástico. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões da estrutura da Igrejinha, levantadas para análise estrutural.	108
Tabela 2: Dimensões da estrutura da Câmara dos Deputados levantadas para análise estrutural.	133

LISTA DE ABREVIATURAS

- CEPLAN: Centro de Planejamento da UnB.
CIEPS: Centros Integrados de Educação Permanente.
CPDOC FGV: Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.
DAU: Diretoria de Arquitetura e Urbanismo
DAC: Diretoria de Arquitetura e Construção.
DF: Distrito Federal.
FAU-USP: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
IAB: Instituto de Arquitetos do Brasil.
IAB-PE: Instituto de Arquitetos do Brasil de Pernambuco.
ICC: Instituto Central de Ciências da UnB.
JK: Juscelino Kubitschek, prefeito de Belo Horizonte (1940-1945), governador de Minas Gerais (1951-1955) e presidente do Brasil (1956-1961).
IPHAN: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.
MAC: Museu de Arte Contemporânea de Niterói.
MAM: Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro.
MASP: Museu de Arte de São Paulo.
MEC: Ministério da Educação e Cultura, anteriormente Ministério da Educação e Saúde.
MUBE: Museu Brasileiro da Escultura.
Novacap: Companhia Urbanizadora da Nova Capital.
PUC: Pontifícia Universidade Católica.
UnB: Universidade de Brasília.
SPHAN: Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS	18
SUMÁRIO	19
INTRODUÇÃO	20
1. O ARQUITETO OSCAR NIEMEYER	24
2. SISTEMAS ESTRUTURAIS	35
2.1. Sistemas Estruturais na Arquitetura	43
2.2. Sistemas Estruturais na Arquitetura de Oscar Niemeyer em Brasília	52
3. OS CALCULISTAS DE NIEMEYER	79
3.1. Joaquim Cardozo	84
4. ESTUDOS DE CASO	95
4.1. A “Igrejinha” Nossa Senhora de Fátima	96
4.1.1. Histórico:	96
4.1.2. Arquitetura	99
4.1.3. O Sistema Estrutural	104
4.1.4. Análise do Sistema Estrutural	106
4.2. Congresso Nacional – Cúpula invertida da Câmara dos Deputados	116
4.2.1. Histórico	116
4.2.2. Arquitetura	118
4.2.3. O Sistema Estrutural	121
4.2.4. Análise do Sistema Estrutural	132
CONCLUSÃO	149
BIBLIOGRAFIA	154

INTRODUÇÃO

As obras arquitetônicas de Oscar Niemeyer se destacam pelo arrojo das formas e a plasticidade escultural, dentre elas os edifícios públicos de Brasília, projetados em um período em que, segundo seu próprio depoimento, sua carreira passava por um processo de revisão, no qual se inicia uma “procura constante de concisão e pureza” (NIEMEYER, 1958 *apud* XAVIER, 1987). Com essa mudança, Oscar Niemeyer passa a produzir uma arquitetura cuja monumentalidade aparece na simplificação do número de elementos que cumprem de forma racional seu papel funcional, estabelecendo um “real comprometimento entre forma e estrutura” (MÜLLER, 2003).

O arrojo das obras de Oscar Niemeyer não fica restrito à criatividade das formas e nos desenhos sutis de suas curvas. A arquitetura de Niemeyer significou grande avanço tecnológico estrutural, pois suas obras são, do ponto de vista da engenharia, sinônimo de audácia e novidade, e evidenciam resultados surpreendentes (MOREIRA, 2007).

Minha obra de arquiteto começou em Pampulha, que cobri de curvas, sensuais e inesperadas. Era o início da liberdade plástica que o concreto armado exigia. Depois veio Brasília, e exaltei as estruturas, nelas inserindo a arquitetura. E, ao terminar as primeiras, arquitetura e estrutura estavam presentes como duas coisas que devem nascer juntas, e juntas se enriquecer (NIEMEYER, 2000, pag. 248).

Apesar de todo esse avanço tecnológico, do ponto de vista acadêmico, existe uma lacuna de documentação, a maior parte dos trabalhos existentes trazem um enfoque puramente arquitetônico e poucos trabalhos são desenvolvidos com uma abordagem focada nos aspectos estruturais e sua relação e contribuição para o resultado final das obras (FONSECA, Régis, 2007). E essa relação tem extrema importância no trabalho de Niemeyer, como ele mesmo fala, ao descrever parte do seu processo de criação:

A Arquitetura é sempre feita de tentativas. A gente tem um tema e fica pensando nas possibilidades econômicas e físicas de realizar a coisa, e começa a fazer os croquis. Quando o croqui agrada, examinamos se ele se adapta à técnica atual. Se a técnica pode acrescentar qualquer coisa, se é lógico, construtivo, e aí partimos para o desenho definitivo (NIEMEYER *apud* WOLF, 1987)

Oscar Niemeyer diz que “a beleza deve prevalecer sobre a lógica” (NIEMEYER, 2000). Essa afirmação pode caracterizar um desafio para a engenharia estrutural, porém segundo o engenheiro João Del Nero “a engenharia estrutural tem uma liberdade de criação que se assemelha à Arquitetura” (SABBAG, 1987).

Essa semelhança não está tão evidente no dia-a-dia das duas profissões, é comum a crença de que engenheiros não se interessam por arquitetura e produzem

obras sem qualquer atrativo visual, da mesma forma que se ouve que arquitetos não compreendem o funcionamento estrutural daquilo que imaginam (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

A técnica construtiva e a arquitetura na obra de Niemeyer evoluíram lado a lado, cada forma inovadora gerou mais um desafio estrutural a ser vencido. Porém, o destaque da beleza da arquitetura sobre a técnica e a estrutura utilizada para sustentá-la é refletida na produção de trabalhos técnicos e acadêmicos sobre o tema. Muito se desenvolveu em torno dos marcos arquitetônicos criados pelo arquiteto, e poucos trabalhos foram desenvolvidos abordando os aspectos estruturais dessas edificações (MOREIRA, 2007).

O trabalho arquitetônico de Niemeyer em Brasília é descrito e estudado em diversas publicações nacionais e internacionais, porém poucos engenheiros escrevem sobre as realizações tecnológicas que acompanharam esse trabalho (FONSECA, Régis, 2007). Esse “desprezo” à história da Engenharia Estrutural de Brasília é questionado por Vasconcelos (1992), que destaca a obra da Capital como um acontecimento marcante na engenharia e na arquitetura mundial. A falta de estudos específicos ainda expõe outro problema, na medida que, boa parte das edificações de relevância histórica no país não apresenta registros adequados de sua concepção, cálculo e projeto estrutural.

A análise adequada das estruturas em obras exponenciais e inovadoras como as de Oscar Niemeyer pode consagrar a revolução teórica nas técnicas construtivas e de concepção estrutural que permitiram o avanço inovador dos conceitos da arquitetura.

Ante o exposto, o objetivo principal pretendido com essa pesquisa é caracterizar a relação entre a estrutura e a forma de importantes obras de Oscar Niemeyer, levando em consideração os aspectos históricos, arquitetônicos, projeto estrutural, tecnologia vigente, técnicas construtivas utilizadas e, principalmente, o sistema estrutural adotado.

Para esta pesquisa, foram escolhidas como estudo de caso duas obras de grande importância de Niemeyer, a Igrejinha, construída em 1957 e a Cúpula Invertida do Congresso Nacional, de 1958.

O estudo da primeira obra citada é relevante devido a características singulares, entre as quais se destacam a pureza e a leveza da estrutura simples, que define sua forma e sua arquitetura.

O estudo da segunda obra, a cúpula invertida, justifica-se devido à inovação trazida na época, inovação não só arquitetônica, por ser uma casca de concreto onde seria abrigado o congresso da Câmara dos Deputados, mas que deveria parecer levemente “pousada” no chão. Mas também tecnológica e estrutural, pelo desafio proposto por Niemeyer ao seu calculista.

Como objetivos específicos estão:

- Levantamento de algumas obras de importância internacional na arquitetura ao longo da história, em que o sistema estrutural se mostra um importante fator definidor da arquitetura;

- Levantamento de algumas obras de destaque na terceira fase profissional de Oscar Niemeyer em Brasília, período de maior destaque na arquitetura moderna brasileira e que representou um enorme avanço tecnológico na estrutura do concreto armado;

- Análise histórica das obras selecionadas;

- Análise estrutural – baseada na sua história, projetos, tecnologia construtiva e intervenções;

- Definição do modelo estrutural e análise com utilização de softwares de cálculo estrutural, para os dois estudos de caso escolhidos.

Para atender a tais objetivos, a dissertação foi estruturada em quatro capítulos.

O primeiro capítulo trata especificamente sobre o arquiteto Oscar Niemeyer. Explora-se brevemente a vasta biografia de Niemeyer, identificando fatos marcantes de sua vida, particular e profissional, que contribuíram para sua formação, por meio de uma revisão bibliográfica das principais obras escritas sobre o arquiteto, como o livro “As Curvas do Tempo – Memórias”, escrito pelo próprio Oscar Niemeyer (2000), que reúne fatos e situações de sua vida, desde a infância até anos mais atuais de sua carreira de arquiteto. É também muito importante o livro “Conversa de Amigos”, uma informal troca de correspondências entre Oscar Niemeyer e o engenheiro José Carlos Sussekind, seu amigo e calculista nas últimas décadas (SUSSEKIND, 2002).

Além disso, nesse capítulo é revisada a vida profissional de Oscar Niemeyer, por meio da observação das diferentes fases de sua carreira, suas influências e parcerias durante sua vida na arquitetura e suas principais obras.

Para essa revisão são usadas obras como “Minha Arquitetura”, de Oscar Niemeyer (2000); “Oscar Niemeyer e o Modernismo de Formas Livres no Brasil”, de David Underwood (2002); “Oscar Niemeyer - Minha Arquitetura, 1937-2004” de Oscar Niemeyer (2004) e “Oscar Niemeyer”, por Ricardo Othake (2007);

São ainda analisados dois filmes sobre a arquitetura de Niemeyer, lançados em 2007, ano em que o Arquiteto completou 100 anos de vida: “Oscar Niemeyer, A Vida é um Sopro”, direção de Fabiano Maciel e Sacha e “Oscar Niemeyer, O Arquiteto da Invenção, de Thomas Miguez e Marcelo Machado. Além de textos, artigos e publicações de jornais e revistas especializadas em Arquitetura.

No segundo capítulo é feita uma revisão teórica sobre sistemas estruturais e as influências da escolha do sistema estrutural na arquitetura; esse capítulo é dividido em duas partes. A primeira parte trata da influência do sistema estrutural em importantes

obras de arquitetura internacional e nacional em vários períodos históricos. Na segunda parte, faz-se um recorte da obra de Oscar Niemeyer, destacando a influência do sistema estrutural nas obras de Brasília, terceira fase da carreira do arquiteto.

O terceiro capítulo deste trabalho é dedicado aos calculistas de Oscar Niemeyer, e tem como objetivo apresentar os engenheiros que tiveram grande influência na carreira de Niemeyer.

Em “Minha Arquitetura”, Niemeyer faz referência a esses grandes engenheiros ao dizer: “A preocupação que sempre mantive em relação às estruturas é compreendida pelos técnicos do concreto armado com que até hoje trabalhei” (NIEMEYER, 2000).

Ao longo de diversos livros sobre sua arquitetura, não raro Oscar Niemeyer cita com muito respeito e admiração seus parceiros e colaboradores calculistas, e entre eles Niemeyer destaca o engenheiro Joaquim Cardozo, responsável pelas estruturas das obras analisadas nesse trabalho, e cuja revisão teórica é feita no terceiro capítulo.

Joaquim Cardozo, o engenheiro da poesia, como era conhecido, foi um homem muito culto. Foi o grande aliado de Niemeyer nas obras de Brasília, responsável pelos cálculos de todos os edifícios da capital, como a Catedral, a Igreja Nossa Senhora de Fátima e os palácios;

No quarto capítulo estão os dois estudos de caso escolhidos. Em uma primeira parte desse capítulo é exposta a metodologia aplicada a esses estudos de caso. Em seguida é feita revisão bibliográfica das obras selecionadas, descreve-se a arquitetura de cada obra e como se desenvolveram seus projetos. Também são descritas as estruturas das obras em estudo para que possa ser analisado o sistema estrutural das obras escolhidas. Os sistemas estruturais são descritos de forma a entendê-los a ponto de podermos fazer uma análise qualitativa, utilizando o programa SAP 2000 (versão 14), software de análise estrutural bastante difundido no meio técnico e acadêmico.

1. O ARQUITETO OSCAR NIEMEYER

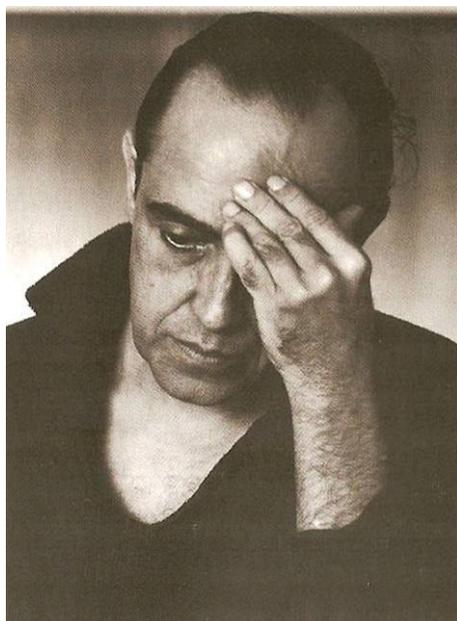


Figura 1: Oscar Niemeyer, em 1960. Foto de Rene Burri, fonte: FARIA, 2007, pag. 48

Oscar Ribeiro de Almeida de Niemeyer Soares viveu grande parte de sua vida na cidade do Rio de Janeiro/RJ, onde nasceu em 1907. Segundo seu próprio relato, começou a desenhar na época do colégio à Rua das Laranjeiras, e seus desenhos eram bules, xícaras e estatuetas, que a sua mãe guardava (NIEMEYER, 2000).

Foi bom aluno e primeiro da classe por alguns anos, depois começou a se interessar pelo futebol e pela boemia do Rio de Janeiro na década de 20, diminuindo seu rendimento escolar. Em 1928, com 21 anos, casou-se com Annita Baldo, com quem teria sua primeira filha, Anna Maria Niemeyer. Com a responsabilidade de sustentar uma família, foi trabalhar na tipografia do pai.

Em seguida, em 1930 ingressou na Escola Nacional de Belas Artes, onde fez amigos como Hélio Uchoa, João Cavalcanti e Fernando Saturnino de Brito (NIEMEYER, 2000).

No terceiro ano da faculdade decidiu trabalhar de graça no escritório de Lúcio Costa e Carlos Leão, afirmando que “da arquitetura só me deram bons exemplos” (NIEMEYER, 2000, pag. 43). Terminou a faculdade em primeiro lugar, ainda trabalhando no escritório.

A relação com a estrutura sempre marcou o trabalho de Niemeyer, que sempre exigiu muito de seus calculistas, desenvolvendo a cada projeto novas formas para a estrutura (OHTAKE, 1987).

Sua trajetória profissional pode ser dividida em cinco fases: formação profissional; de Pampulha a Brasília; Brasília; projetos no exterior (décadas de 1960 a 1980) e últimos projetos.

As quatro primeiras fases foram esquematizadas de forma didática pelo professor Júlio Katinsky em SABBAG, 1987. A quinta fase, correspondente a seus últimos projetos, foi trabalhada por Ohtake (2007). Em todas as fases é possível notar que a técnica e os conceitos estruturais são questões de grande importância em toda a obra de Niemeyer.

Hoje, revendo meus projetos, compreendo melhor por que, em todas aquelas fases, um sentimento de contestação está invariavelmente contido (NIEMEYER, 2000, pag. 266).

A primeira fase é a de formação profissional, como estagiário não remunerado no escritório de Lúcio Costa, conforme citado anteriormente, onde teve a oportunidade de participar de forma decisiva na equipe responsável pelo projeto do Ministério da Educação no Rio de Janeiro em 1935. A obra, considerada o primeiro grande monumento do modernismo na América do Sul, teve a importante participação de Le Corbusier, como consultor de projeto, mas recebeu contribuições de Niemeyer, que já se destacava na equipe de Lúcio Costa (UNDERWOOD, 2003).

O projeto do edifício, hoje conhecido como Palácio Gustavo Capanema, leva em conta os cinco pontos da arquitetura moderna, propostos por Le Corbusier, mas sem perder as características dos arquitetos brasileiros que trabalharam no projeto. O edifício possui um bloco simples, de orientação uniforme das salas, simplicidade e clareza na disposição interna, seu bloco principal está suspenso sobre pilotis e possui uma estrutura portante que libera as paredes de qualquer função de sustentação, além de possuir a fachada de vidro (CASTRO, 2009).



Figura 2: Edifício do Ministério da Educação e Saúde, atual Palácio Gustavo Capanema, Rio de Janeiro.

Fonte: CPDOC FGV em CASTRO, 2009.

Iniciando a segunda fase Juscelino Kubitschek - JK, prefeito de Belo Horizonte na época, convocou Niemeyer para criar um bairro de lazer na Pampulha, que incluísse cassino, clube, igreja e restaurante (NIEMEYER, 2000).

Sua primeira obra individual de renome internacional, o conjunto da Pampulha em Belo Horizonte se destaca como uma ruptura com o formalismo estrutural vigente na época, em suas próprias palavras:

Foi importante porque é um dos primeiros trabalhos que fiz. Com ele, contestei a linha racionalista, a Arquitetura feita com régua e esquadro. E eu queria – naquela época eu mal saía da Escola – mostrar que a Arquitetura pode ser diferente, pode ser mais livre, adaptar-se a tudo que o concreto nos oferece... (NIEMEYER *apud* WOLF, 1987).



Figura 3: Igreja São Francisco de Assis na Pampulha, Belo Horizonte-MG. Foto do autor.

O Conjunto da Pampulha, construído entre 1940 e 1943, é a primeira obra de maturidade artística de Niemeyer, é nesse período que suas obras inauguram o “Estilo Brasileiro”, uma arquitetura reconhecida, em todo mundo como a arquitetura moderna do Brasil (FARIA, 2007).

Obra diferenciada de outras da época que, segundo Katinsky (1987), a Pampulha sintetiza toda sua arquitetura, através da criatividade, da necessidade de contestação e desafio, quebra a rigidez do racionalismo com a introdução da curva (KATINSKY *apud* SABBAG, 1987).

O projeto me interessava vivamente. Era a oportunidade de contestar a monotonia que cercava a arquitetura contemporânea, a onda de um funcionalismo mal compreendido que a castrava, dos dogmas de “forma e função” que surgiam, contrariando a liberdade plástica que o concreto armado permitia (NIEMEYER, 2000, pag. 94).

Para atingir essa ruptura, Niemeyer se valeu da tecnologia do concreto armado, utilizando-a de forma criativa e inovadora; ele mesmo dizia que na época “o concreto armado permitia coisas que não estavam sendo feitas” (NIEMEYER *appud* WOLF, 1987).

No entanto, com o passar dos anos Niemeyer não ficou satisfeito com a arquitetura no entorno do conjunto da Pampulha, dizendo: “revoltava-me o mau gosto que a desvirtuava” e “e lá está o conjunto da Pampulha, cercado de prédios medíocres sem aquela pureza arquitetônica que antes anunciava” (NIEMEYER, 2000, pag. 180).

Durante o período de dez anos após Pampulha, de 1943 a 1953, Niemeyer consolida o estilo ousado que deu certo na capital mineira. Em projetos como a Casa de Canoas e o Parque do Ibirapuera, o arquiteto combina invenção e função através de uma liberdade formal conseguida com novas técnicas de engenharia e com o concreto armado (FARIA 2007).

Esse período em sua obra é marcado por diversas experiências estruturais que se tornaram marcas do arquiteto. Novas formas de pilotis para reduzir o número de apoios no térreo, pilares em “V”, em “W”, “em forma de um ramo nascido de um tronco. E cada vez mais esbeltos e audaciosos” (SABBAG, 1987).

Esse também é um período em que, essa nova arquitetura moderna proposta por Oscar Niemeyer é bastante criticada. A mais polêmica dessas críticas foi a de Max Bill, arquiteto e escultor, diretor da Escola de Ulm (Alemanha) que, em visita ao Brasil em 1953, concedeu uma entrevista a revista Manchete na qual critica pesadamente a nova geração de arquitetos brasileiros: “(...) a arquitetura moderna brasileira padece um pouco deste amor ao inútil, ao simplesmente decorativo (...) em arquitetura, tudo deve ter sua lógica, sua função imediata” (BILL, 1953 *appud* CASTELLOTTI, 2006, pag. 61).

Mais especificamente sobre Niemeyer e sobre a Pampulha Max Bill diz:

“(...) não se levou em conta sua função social. O sentimento da coletividade humana é aí substituído pelo individualismo exagerado. Niemeyer, apesar de seu evidente talento, projetou por instinto, por simples amor à forma pela forma, elaborou-o em torno de curvas caprichosas e gratuitas, cujo sentido arquitetural apenas para si mesmo é evidente. O resultado (...) é um barroquismo excessivo que não pertence à arquitetura nem à escultura. (...) Afirmo, mais uma vez, que, em arquitetura, tudo deve ter sua lógica, sua função imediata”. (BILL, 1953 *appud* CASTELLOTTI, 2006, pág. 62)

Essas críticas foram todas duramente respondidas na época por Lúcio Costa, que, na edição seguinte da mesma revista saiu em defesa da arquitetura moderna brasileira, de Oscar Niemeyer e também da Pampulha, considerando essa um marco importante, definidor da arquitetura brasileira:

“Ora, sem a Pampulha, a arquitetura brasileira na sua feição atual –o Pedregulho inclusive– não existiria. Foi ali que as suas características diferenciadoras se definiram. Aliás, os argumentos que traz à baila no caso são dignos da Beócia. Trata-se de um conjunto de edificações programadas para a burguesia capitalista (...) como era de se prever, foi qualificada de barroca com a habitual intenção pejorativa. Ora graças, pois se trata no caso de um barroquismo de legítima e pura filiação nativa que bem mostra não descendemos de relojoeiros, mas de fabricantes de igrejas barrocas. Aliás, foi precisamente lá, nas Minas Gerais, que elas se fizeram com maior graça e invenção”. (COSTA, 1953 *appud* CASTELLOTTI, 2006, pág. 62)

Nesse mesmo ano, Niemeyer também recebeu outras críticas, estas menos ofensivas, de grandes nomes da arquitetura moderna na Europa, como Walter Gropius, mestre do modernismo alemão e do arquiteto italiano Ernesto Rogers. Gropius criticou Niemeyer pelo seu aparente desinteresse no detalhamento de seus projetos, o que, segundo ele, comprometia a qualidade de algumas obras (CASTELLOTTI, 2006).

Já o italiano Ernesto Rogers apontou erros nas obras de Niemeyer e criticou seus croquis, que apesar de considerá-los virtuosos não concordava em considerá-los grandes soluções técnicas arquitetônicas. Além disso, Rogers criticou o discurso social

do arquiteto dizendo que seus trabalhos negligenciavam os problemas sociais do Brasil (CASTELLOTTI, 2006).

Oscar Niemeyer levou dois anos para responder a essas críticas. Em 1955, em seus dois primeiros números, a Revista Módulo – revista de arquitetura fundada por Niemeyer – publicou textos que criticavam tanto Max Bill como Ernesto Rogers, principalmente desqualificando os dois arquitetos, dizendo “desconhecer a obra de Max Bill e Ernesto Rogers, a não ser pequenos e inexpressivos projetos” (Editorial da Revista Módulo nº 1 em CASTELLOTTI, 2006, pág. 64).

Niemeyer defendeu também, ao longo de toda sua carreira, o resultado estético da arquitetura. No embate entre o belo e o funcional, o arquiteto traz uma resposta que se tornou mundialmente conhecida: “não se pode abdicar da beleza, pois ela é, em última análise, a derradeira função.” (FARIA 2007. pág. 48).

Após Pampulha, Niemeyer tornou-se o arquiteto preferido de Juscelino Kubitschek, o que lhe rendeu diversas obras como a casa das Mangabeiras, onde JK morou, o colégio estadual, o Banco da Produção em Juiz de Fora e, em Diamantina, o Banco do Brasil, o clube, a escola e o hotel (NIEMEYER, 2000).

Quando é eleito presidente, JK o convida a ajudar a projetar a nova capital. Niemeyer concordou em realizar os projetos com o salário de um funcionário público na época, ganhando 40 mil cruzeiros mensais (NIEMEYER, 2000).

A fase que mais expõe a importância da estrutura em seu trabalho é a fase de Brasília (terceira fase). Nos edifícios monumentais da Capital a utilização do potencial técnico do concreto armado permite a criação de grandes edifícios que pousam levemente sobre o solo.

E recordo-me como com o mesmo empenho me detive diante dos Palácios do Planalto e do Supremo na Praça dos Três Poderes. Afastando as colunas das fachadas, imaginando-me diante da planta elaborada a passar entre elas, procurando sentir o que poderiam provocar. E isso me levou a recusar o montante simples, funcional, que o problema estrutural exigia, preferindo, conscientemente, a forma nova desenhada, rindo com meu sócia daquele “equivoco” que a mediocridade atualmente, com prazer, descobriria (NIEMEYER, 2000, pag. 271).

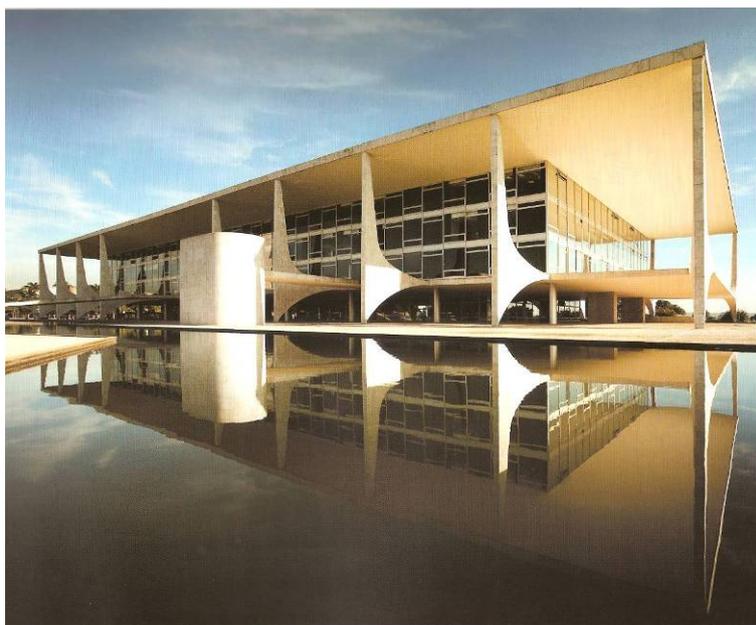


Figura 4: Palácio do Planalto em Brasília. Foto de Bernie DeChant, fonte: FARIA, 2007, pag. 21



Figura 5: Supremo tribunal Federal em Brasília. Foto do autor.

A unidade de pensamento entre os técnicos do concreto armado e o arquiteto foi fundamental para o sucesso dos projetos e para a integração da equipe, inclusive do Engenheiro Joaquim Cardoso. A leveza arquitetural e a proposta de buscar a beleza e não somente solucionar os aspectos funcionais, criando espaços amplos e flexíveis, levou o arquiteto e o calculista a intervirem nos sistemas estruturais, fazendo com que muitas vezes tal sistema definisse e caracterizasse a arquitetura. (MOREIRA, 2007).

No projeto da Catedral de Brasília, Oscar Niemeyer utilizou a solução técnica como principal elemento arquitetônico. “Plasticamente livre e tecnicamente ousada”, essa solução sintetiza a grandiosidade e o simbolismo que pede a função social de uma catedral, além de cumprir ainda outra função, muito evidente nas grandes catedrais do mundo, de expressar o potencial tecnológico de uma época (MÜLLER, 2003).



Figura 6: Catedral de Brasília. Foto do Autor.

A procura da solução diferente me dominava. Na catedral, por exemplo, evitei as soluções usuais, as velhas catedrais escuras, lembrando pecado. E, ao contrário, fiz escura a galeria de acesso à nave e esta, toda iluminada, colorida, voltada com seus belos vitrais transparentes para os espaços infinitos.

Dos padres sempre tive compreensão e apoio, inclusive do Núncio Apostólico, que, ao visitá-la, não conteve seu entusiasmo: “esse arquiteto deve ser um santo para imaginar tão bem essa ligação esplêndida da nave com os céus e o Senhor”.

Com a mesma preocupação de invenção arquitetural concebi os demais edifícios. O Congresso a exibir seus setores hierarquicamente principais nas grandes cúpulas contrastantes; o Ministério da Justiça a jorrar água, como um milagre, pela fachada de vidro; e o Panteão a enriquecer como um pássaro branco a Praça dos Três Poderes. Somente no Ministério do Exterior agi diferente, desejoso de demonstrar como é fácil agradar a todos com uma solução correta, generosa mas corriqueira, dispensando maior compreensão e sensibilidade.

Agora, quando visito Brasília, sinto que nosso esforço não foi à toa, que Brasília marcou um período heróico de trabalho e otimismo; que a minha arquitetura reflete bem o meu estado de espírito e a coragem de nela exibir o que intimamente mais me comovia. E, ainda, que ao elaborá-la, soube respeitar o Plano Piloto de Lúcio Costa, nos volumes e espaços livres, nas suas características tão bem concebidas de cidade acolhedora e monumental (NIEMEYER, 2000, pp. 273 e 274).

Esse período inclui também projetos como o da Universidade de Brasília, que apresentam um grande amadurecimento, um conceito evolutivo de urbanismo. Além disso, tecnicamente a construção do edifício do Instituto Central de Ciências “foi considerada um grande canteiro de experimentação da tecnologia do pré-moldado” (MOREIRA, 2007).

Na continuidade de seu trabalho ao longo dos anos, Niemeyer continua exigindo da técnica e utilizando diretamente as soluções estruturais inovadoras, como em seus projetos realizados no exterior nas décadas de 60, 70 e 80, criando estruturas pra vencer grandes vãos e formas cada vez mais livres (OHTAKE, 1987). Nesse período (quarta fase), Oscar Niemeyer concretiza seus projetos mais arrojados, que testam os limites da

tecnologia do concreto armado em balanços gigantescos e colunas cada vez mais esbeltas (SABBAG, 1987).

Nessa fase Niemeyer projeta na Argélia a Universidade de Constantine, 1969, com seis blocos que substituem os vinte e três sugeridos no programa. Entre esses blocos está o Edifício de Classes, com 300 metros de comprimento e uma parede/viga de 50 metros de vão, com 25 metros de balanço, que os engenheiros locais queriam que tivesse 1,5m de espessura. Bruno Contarini, engenheiro responsável pelo cálculo estrutural do edifício fez a mesma viga com 30 centímetros, “mais um recorde mundial” disse ele ao arquiteto (NIEMEYER, 2000).

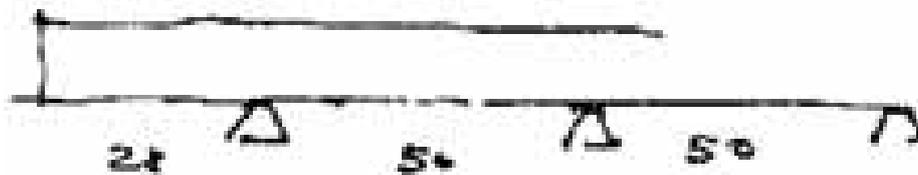


Figura 7: Croqui de Oscar Niemeyer para o Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia.

Fonte: Fundação Oscar Niemeyer



Figura 8: Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer

Esse episódio serve para ilustrar como os profissionais brasileiros estavam à frente de seu tempo. Não só na arquitetura, bela e monumental, mas na tecnologia e na técnica para torná-la viável. Nesse período, Niemeyer rodou o mundo, principalmente a Europa, mostrando o que o Brasil estava fazendo na área da construção civil (NIEMEYER 2007, no filme “Oscar Niemeyer, A Vida é Um Sopro).

Outro importante momento dessa fase foi a construção da sede da empresa Fata Engineering em Turim, Itália. O engenheiro italiano responsável pelo projeto estrutural, Ricardo Morandi, declarou: “Foi a primeira obra de engenharia civil que me obrigou a recorrer a tudo que sabia sobre o concreto armado” (MORANDI *appud* NIEMEYER,

2000). Isso mostra como a inventividade do trabalho de Niemeyer contribui para a evolução da técnica construtiva (NIEMEYER, 2000).

Retornando ao Brasil em 1974, Niemeyer se ocupa de projetos como o Sambódromo do Rio de Janeiro e os CIEPs – Centros Integrados de Educação Permanente, também no Rio de Janeiro. Essas obras são caracterizadas pelo sistema construtivo pré-fabricado, que permitia execuções muito rápidas. Foram mais de 500 centros implantados em todo o Estado (OTHAKE, 2007).

Em 1988, Niemeyer recebe nos Estados Unidos, o Prêmio Pritzker de Arquitetura, pelo grande conjunto de obras que realizou e pela sua excepcional contribuição à arquitetura.

Dada a longevidade do arquiteto, a continuidade e a qualidade de seu trabalho, mesmo com a idade muito avançada, podemos acrescentar aqui mais uma fase na extensa carreira de Niemeyer. São os projetos feitos por Niemeyer depois de completar 85 anos de idade. Esses projetos são, em sua maioria, trabalhos isolados, programas que exigem um único bloco, como auditórios, teatros e equipamentos culturais (OTHAKE, 2007).

Nessa última fase os projetos contaram com a parceria do engenheiro calculista José Carlos Sussekind, com quem já trabalhava desde a década de 80 e que o acompanha até hoje em seus mais recentes projetos. Estão nessa fase projetos marcantes, que para um profissional comum, cada um deles seria um projeto de uma vida, e que para Niemeyer são desafios de inovação e reinvenção de novas soluções e novas formas arquitetônicas.

Os gigantescos trabalhos arquitetônicos de Brasília, por si só bastariam para colocar Niemeyer entre os maiores artistas de todos os tempos, mas, no entanto, representam apenas uma parcela de sua obra imensa, comparável em volume àquela de Picasso (CARDOZO appud NIEMEYER, 2004, pag. 399)

Na Procuradoria Geral da República, em Brasília, Oscar Niemeyer surpreende com dois volumes envidraçados, dos quais um deles está apoiado em um único ponto central, que também comporta a circulação vertical. No Museu Nacional, também em Brasília, o arquiteto reinventa a cúpula de concreto, explorando o sistema construtivo com um grande vão e rampas apoiadas apenas na parede da cúpula e um mezanino pendurado nela.



Figura 9: Corte dos blocos principais do conjunto da Procuradoria Geral da República em Brasília, projeto de 1995. Fonte: NIEMEYER, 2004 pag. 269.

Durante toda a carreira de Oscar Niemeyer, seus projetos foram marcados por criarem grandes ícones. O arquiteto Ítalo Campofiorito, em depoimento no documentário “Oscar Niemeyer, A Vida é um Sopro” diz que Niemeyer tem uma capacidade incomparável de “criar uma forma e aquela forma se transformar em emblema do lugar”. Além disso, a obra de Oscar Niemeyer também fez com que a tecnologia estrutural evoluísse, como resume bem o engenheiro José Carlos Sussekind.

“A arquitetura que exprime a estrutura, e exprime o que o concreto armado pode fazer, exprime a engenharia do país dele, ele tem muita clareza de que, e é verdade, de como a audácia dele ajudou a todos nós a termos que avançar, e avançando, a engenharia brasileira veio junto” (José Carlos Sussekind, no filme “Oscar Niemeyer, O Arquiteto da Invenção”, Direção: MIGUEZ, Thomas e MACHADO, Marcelo – Editora Abril, 2007)

Assim, Oscar Niemeyer, hoje próximo de completar impressionantes 103 anos de vida, continua produzindo uma arquitetura coerente com os conceitos criados e demonstrados por ele durante toda sua carreira. E ainda se mostra capaz de inventar novas forma e soluções arquitetônicas com um entusiasmo renovador (OTHAKE, 2007).

2. SISTEMAS ESTRUTURAIS

Uma estrutura pode ser definida como sendo um conjunto de elementos que, ao se relacionarem formando um sistema, desempenham uma função específica. Essa definição serve para diversas áreas de conhecimento. Em uma sociedade os indivíduos são os componentes que, ao se relacionarem entre si, formam uma estrutura social. Na biologia existem vários níveis de estrutura, no corpo humano, por exemplo, os órgãos são elementos que juntos compõem a estrutura do organismo.

No caso das edificações a estrutura é composta por elementos básicos como pilares, vigas, lajes, arcos, etc., que se inter-relacionam formando o sistema estrutural (REBELLO, 2000).

O Professor Erico Weidle, da Universidade de Brasília, descreve que a estrutura, em arquitetura é:

o sistema material da edificação capaz de transmitir cargas e absorver esforços, de modo a garantir a estabilidade, a segurança e a integridade da construção, cooperando na sua organização espacial e na sua expressão, mediante o adequado emprego dos materiais, das técnicas, dos processos e dos recursos econômico-financeiros. (WEIDLE *apud* SILVA, 2000, p. 13)

A função principal de um sistema estrutural é transmitir para o solo as cargas que atuam sobre a estrutura e, dessa forma, permitir que essa estrutura cumpra a finalidade para a qual foi desenvolvida, levando-se em conta outros requisitos propostos como questões de conforto, economia, estética, ecologia, etc.

O sistema estrutural, portanto, é formado pela associação dos elementos estruturais. A associação mais imediata e mais comum que vemos nos edifícios atuais é a associação viga x pilar. Para entendermos mais facilmente o funcionamento desse sistema podemos observar o comportamento do elemento isolado, a viga.

Uma viga está sujeita, principalmente, a dois esforços, o momento fletor e a força cortante e, conforme sua posição e quantidade de apoios no sistema estrutural, podem ser classificadas em vigas bi-apoiadas, vigas em balanço ou vigas contínuas, ou mesmo associadas aos pilares, caracterizando os pórticos.

Conforme vemos nas figuras abaixo (Figura 10) as vigas bi-apoiadas apresentam tensões de compressão na parte de cima e de tração na parte inferior, ao contrário das vigas em balanço. Já no caso das vigas contínuas, que possuem vários apoios, os trechos de vão se comportam como nas vigas bi-apoiadas enquanto que nos apoios as condições se assemelham à da viga em balanço (REBELLO, 2000).

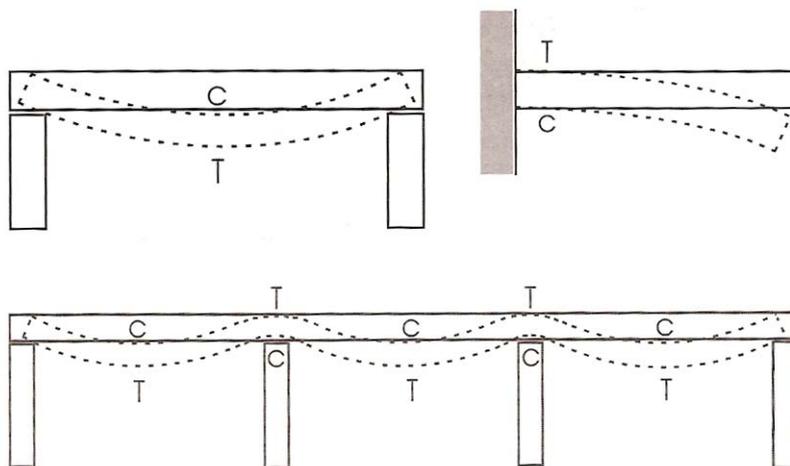


Figura 10: Classificação de vigas. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 99.

A associação viga x pilar ocorre de duas formas, conforme mostra a figura 11. Uma viga pode ser bi-apoiada, ou seja, ela é simplesmente apoiada sobre os pilares, de forma que esta não transmite a eles nenhum momento, como é visto na estrutura pré-moldada do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília – ICC, construído em 1962.

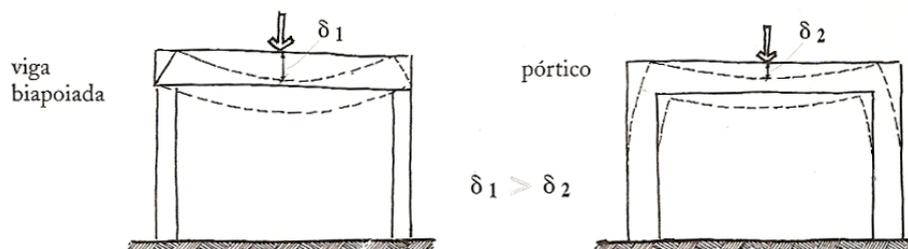


Figura 11: Exemplos da associação “Viga x Pilar”. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 169.

Em outros exemplos, como no edifício principal do Museu de Arte Moderna – MAM do Rio de Janeiro, de Alfonso Reidy, observamos a utilização do sistema de pórticos, onde a viga é rigidamente fixada nos pilares, transferido a eles qualquer giro que esta sofra.

A escolha de um dessas duas formas de associação viga x pilar está diretamente relacionada à dimensão dos elementos que compõe o sistema estrutural. No caso do sistema que utiliza a viga bi-apoiada, os pilares sofrem apenas compressão e, portanto, são mais esbeltos em relação à viga, que pode sofrer uma maior deformação.

No sistema de pórticos a viga transfere aos pilares os esforços de flexão, assim, os pilares passam a ter dimensões maiores. Nesse sistema quanto maiores as

dimensões dos pilares em relação à viga estes absorvem mais momento, chegando ao estado limite, quando a viga passa a se comportar como uma viga engastada. Já quando ocorre o contrário, a viga com proporções maiores em relação aos pilares, estes passam a absorver menos os esforços de flexão da viga, que em uma situação limite passa a se comportar como uma viga bi-apoiada. Esta relação é mostrada na figura 12 (REBELLO, 2000).

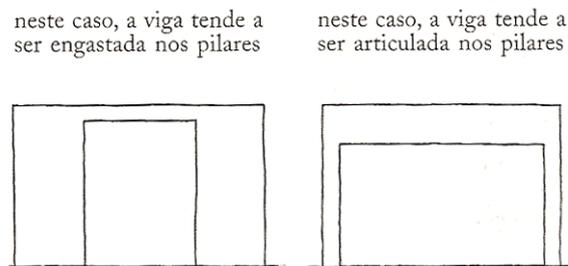


Figura 12: Relação das dimensões entre viga e pilares. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 170.

Outra associação que observamos com muita facilidade é a associação viga x viga, nessa associação as vigas são colocadas lado a lado, com espaçamento pequeno entre elas, para que a altura das vigas possam ser reduzidas, esse sistema é conhecido como lajes nervuradas.

Outro sistema muito comum de associação viga x viga são as grelhas (Figura 13). Nas grelhas as vigas são colocadas lado a lado, com vão pequenos, assim como na laje nervurada, a diferença é que no caso das grelhas as vigas se repetem nas duas direções, com ligações rígidas nos cruzamentos entre elas (REBELLO, 2000).

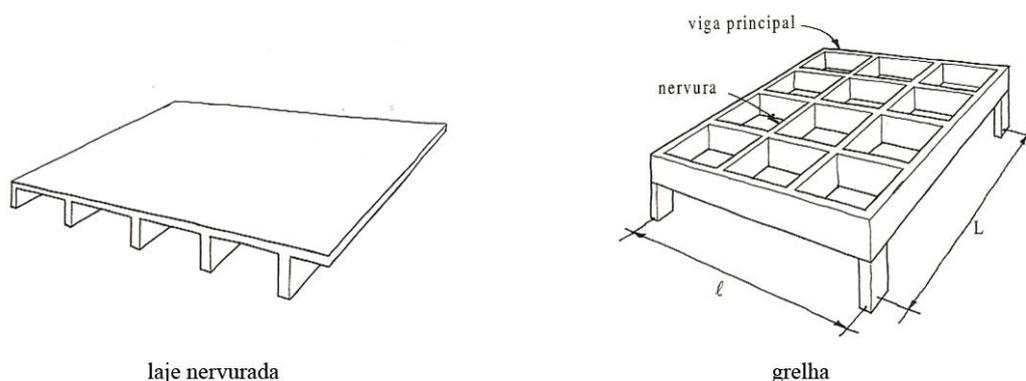


Figura 13: Associações viga x viga: laje nervurada e grelha. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 161.

O sistema de grelhas pode ser notado na laje principal do edifício do Congresso Nacional, em Brasília, de Oscar Niemeyer. Essa malha é formada por diversas vigas de

tamanho e espessura diferentes. Nesse mesmo edifício a grelha aparece também na laje de cobertura da cúpula invertida da Câmara dos Deputados, conforme veremos em um dos estudos de caso desse trabalho.

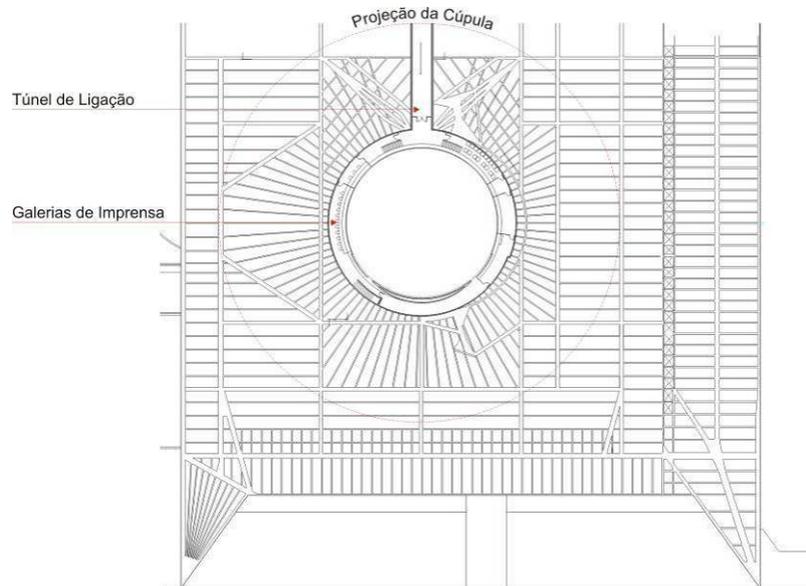


Figura 14: Planta Nível Túnel do Congresso Nacional. Fonte: Desenho do autor em Corel Draw (Baseado em Arquivo de AutoCad cedido por Ricardo André)

Quando a associação da vigas das grelhas for feita de forma contínua e infinitamente próximas, resulta em uma placa, ou laje, que apresenta assim um comportamento estrutural similar a uma grelha (REBELLO,2000).

A placa tem um desempenho estrutural muito eficiente, vencendo grandes vão com pequenas espessuras.

Uma laje também pode ser associada a vigas isoladas. Essa associação, viga x laje, forma uma secção em T, que aumenta a capacidade das vigas em absorver esforços.

Um exemplo de utilização da associação viga x laje está na Estação Largo 13, em São Paulo. Nesse edifício foram utilizadas vigas metálicas e lajes de concreto, que, devidamente ligadas através de conectores soldados nas vigas comportam-se como a secção em T. Essa associação utilizou não apenas a geometria do sistema estrutural, mas também se valeu do desempenho ideal dos materiais, pois dessa forma as vigas metálicas trabalham a tração e a laje de concreto a compressão (Figura 15).

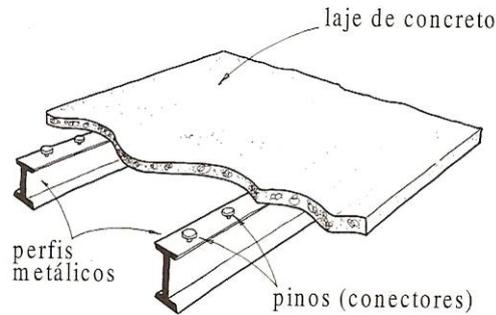


Figura 15: Associação vigas metálicas com laje de concreto. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 164.

Podemos observar a associação de outros elementos estruturais formando outros sistemas, como a cúpula. A cúpula é uma associação contínua arco x arco, que pode ser obtida pela repetição radial sucessiva de arcos muito próximos uns aos outros, como mostra a figura 16.

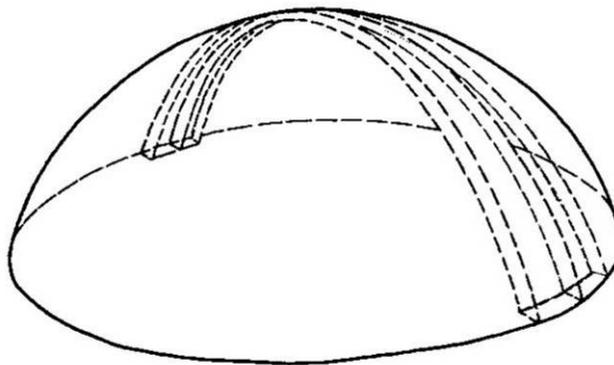


Figura 16: Cúpula formada pela sucessão radial de arcos. Fonte: REBELLO, 2000 pag. 141.

Sendo assim, para entendermos as funções estruturais de uma cúpula devemos analisar primeiro o funcionamento dos arcos e paralelamente dos cabos, que invertidos simetricamente em relação ao eixo horizontal, gera um sistema estrutural análogo.

Se pegarmos um cabo fixo nas duas extremidades e nele aplicarmos um carregamento este assumirá uma forma de equilíbrio que irá variar de acordo com a quantidade e a posição da(s) carga(s) aplicada(s). A forma assumida pelo cabo é o caminho que as forças – no caso dos cabos, apenas esforços de tração simples – percorrem até os apoios. Esse caminho recebe o nome de funicular (REBELLO, 2000).

Ao invertermos simetricamente esse sistema, em relação ao eixo horizontal, temos um arco funicular. Os arcos funiculares estão sujeitos a esforços inversos aos dos cabos, ou seja, um arco com formato funicular gera esforços somente de compressão simples. Com essa descoberta o homem foi capaz de construir grandes vãos com um

material muito comum e primitivo, o bloco de pedra, que possui uma grande resistência à compressão, mas é muito frágil à tração.

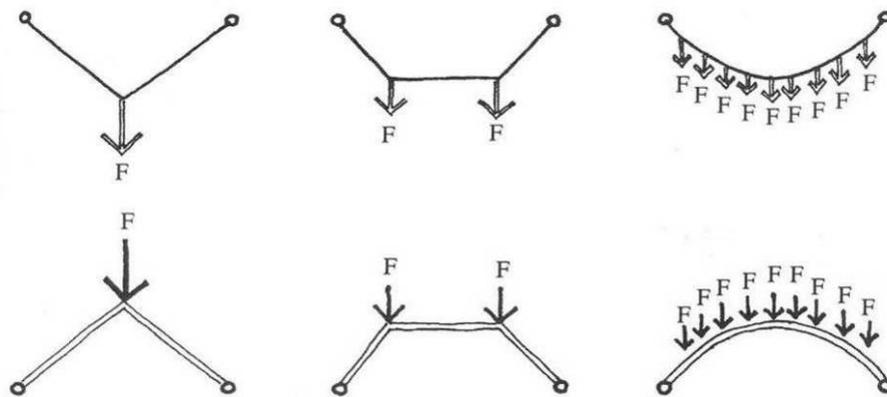


Figura 17: Formas Funiculares – Cabos e Arcos. Fonte: adaptado de REBELLO, 2000, pag. 91 e 92.

Assim, quanto mais próximos da forma funicular estiver o arco menos esforços de tração ocorrerão e será possível a utilização de menos material – espessuras menores – para vãos maiores. Cada vez que o funicular das cargas desvia-se do eixo do arco originam-se esforços de flexão, sendo que quanto maiores forem os desvios maiores serão esses esforços.

Sabe-se que para uma cúpula estar totalmente comprimida, ela deve ter uma abertura angular de 104° , isto é, a transição entre os esforços de compressão e tração ocorre com 52° , considerando um ângulo medido do topo para a base (REBELLO, 2000). No Museu Nacional em Brasília, Oscar Niemeyer e o engenheiro José Carlos Sussekind utilizaram deste princípio para gerar a forma da cúpula, a angulação no caso do Museu é de cerca de 58° , como pode ser observado na figura abaixo.

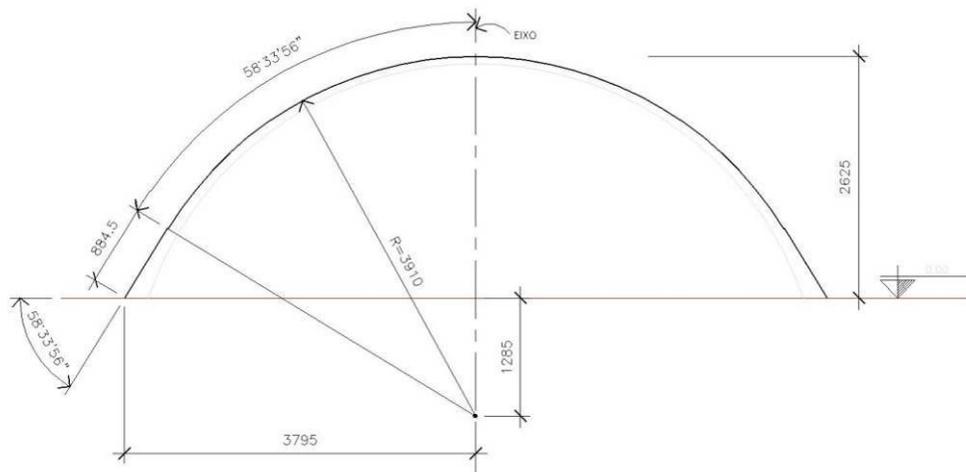


Figura 18: Corte Esquemático do arco gerador da cúpula do Museu Nacional. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

Existe também a tendência de abertura na base dos arcos carregados. Isso gera reações horizontais indesejadas nos apoios do arco. Essas reações são forças horizontais inversamente proporcionais à flecha do arco, arcos abatidos têm força horizontais maiores das bases do apoio que arcos menos abatidos, por isso a seção transversal nos arcos abatidos serem maiores que nos arcos de flechas maiores. A relação ideal entre flecha e vão é:

$$\frac{1}{10} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{5}$$

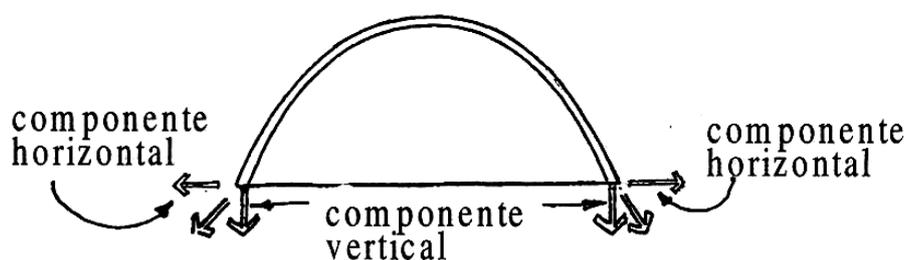


Figura 19: Reações horizontais na base do arco. Fonte: REBELLO, 2000

Uma cúpula, como visto, é formada pela sucessão radial dos arcos, portanto se seccionada por planos horizontais apresenta círculos denominados paralelos. Quando seccionadas por planos verticais que passam pelo centro dos paralelos, apresenta os arcos meridianos que têm a mesma forma do arco que lhe deu origem, conforme a figura abaixo.

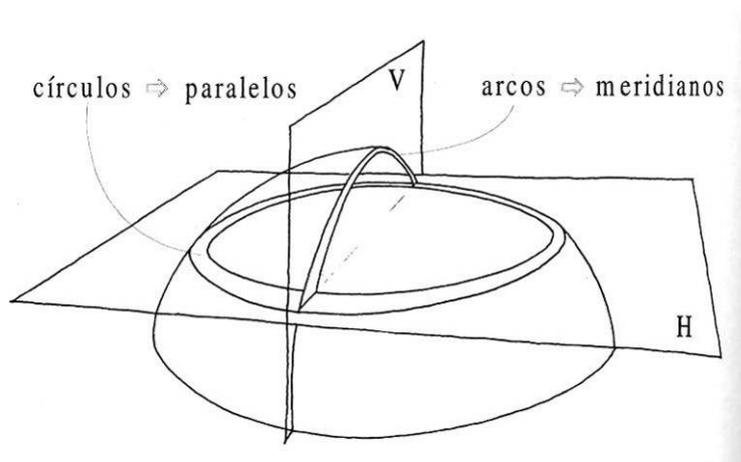


Figura 20: Paralelos e Meridianos. Fonte: REBELLO, 2000

Os paralelos comportam-se como anéis de travamento dos arcos dos meridianos e, por isso as cúpulas apresentam um comportamento funicular para qualquer tipo de carregamento, exceto cargas pontuais. Isso se deve ao fato de os paralelos não permitirem livre deformação dos arcos meridianos.

Com isso, para qualquer carregamento, exceto cargas concentradas, os arcos meridianos trabalharão sempre com forças de compressão, permitindo vencer grandes vãos com cúpulas de pequenas espessuras. A possibilidade de flambagem das paredes da cúpula, devido a sua esbelteza, é geralmente muito pequena graças à sua dupla curvatura.

A planta de formas da cobertura do Museu Nacional evidencia a presença da sucessão dos arcos paralelos, compondo a cúpula (Figura 21).

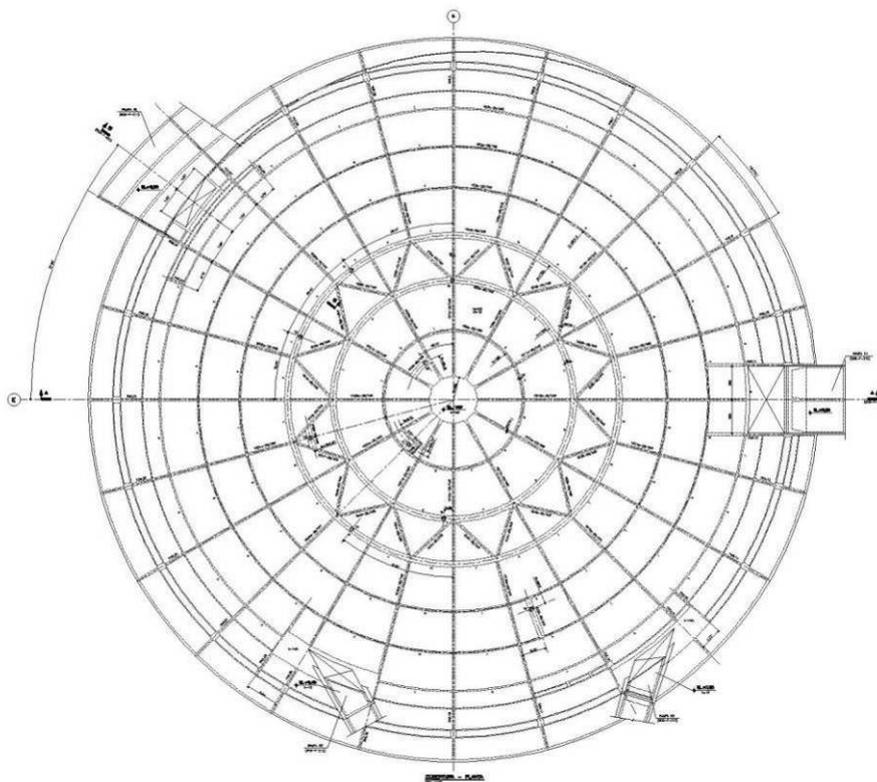


Figura 21: Planta de Cobertura. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

A associação dos elementos estruturais podem formar inúmeros sistemas estruturais, o limite é a criatividade do arquiteto, ou do engenheiro. A maioria das soluções estruturais são resultados de associações simples entre elementos básicos.

2.1. Sistemas Estruturais na Arquitetura

Uma das etapas mais difíceis no processo executivo de uma obra arquitetônica é a integração dos projetos de arquitetura e de estruturas. Isso acontece, principalmente por dois fatores. Primeiro, o fato de que na maioria dos casos os arquitetos não levam em conta a adequação do sistema estrutural ao projeto ainda na fase de criação. Segundo por existir um distanciamento do calculista com as questões formais e estéticas do projeto arquitetônico.

Obras consagradas de diversas épocas e nacionalidades utilizam o componente estrutural como parâmetro norteador do projeto. Nesses casos, a arquitetura nasce junto com a estrutura – “terminada a estrutura a arquitetura já está presente, simples e bonita” (NIEMEYER 2000, p. 81), diz Niemeyer ao descrever grande parte de suas obras. Isso mostra que é essencial para a concepção de um bom projeto o conhecimento técnico das estruturas, tanto dos materiais a serem utilizados quanto ao sistema estrutural que será adotado.

Em muitas edificações a própria função define o sistema estrutural e esse por sua vez é responsável pela forma. Mesmo que posteriormente este corpo principal receba outros elementos, a estrutura definirá sua forma e o espaço arquitetônico. Grandes coberturas, pontes e torres são construções dessa natureza, pois possuem funções simples e bem definidas e suas dimensões exigem soluções estruturais muitas vezes específicas para cada caso.

Em vários momentos da história da arquitetura o desenho estrutural se aproximou do resultado formal. Nessas construções podemos notar uma estrutura legível, aparentemente simples e óbvia, pois acontece naturalmente (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

Catedral de Notre Dame - Reims, França, 1211 a 1331.

Podemos notar essa aproximação do sistema estrutural com a arquitetura na arquitetura gótica da Catedral de Notre Dame de Reims, na França construída entre 1211 e 1311 – projeto do Arquiteto Jean d’Orbais. Observando as figuras 22 e 24 podemos notar que o arco gótico respeita o formato funicular – forma mais natural do arco para transmissão das cargas para o solo. Além disso, nas laterais da catedral, ao invés de rígidas colunas e paredes maciças, comuns nas igrejas românticas, vemos a eliminação da massa através de uma seqüência de arcos botantes e contrafortes que “encaminham” as gargas até as fundações (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

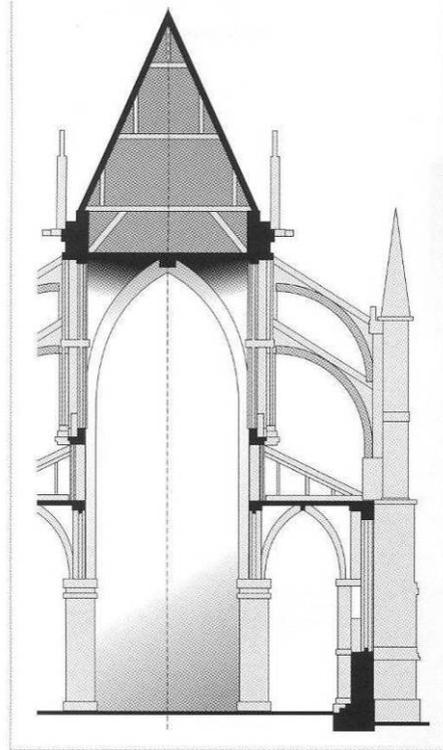


Figura 22: Desenho da secção da Catedral de Notre-Dame, Reims, França. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42



Figura 23: Vista interna da Catedral de Notre-Dame, Reims, França. Foto do autor.

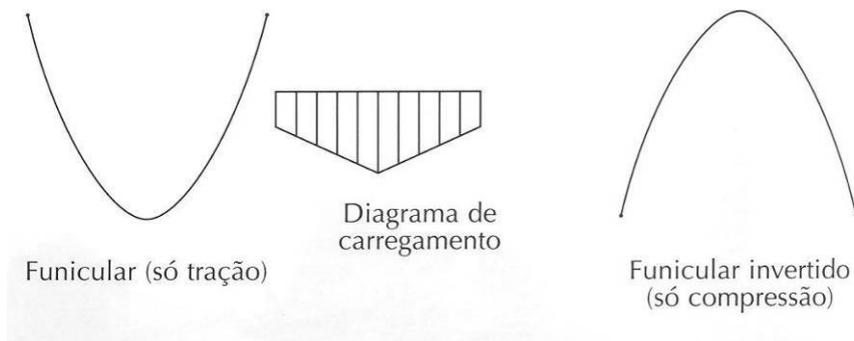


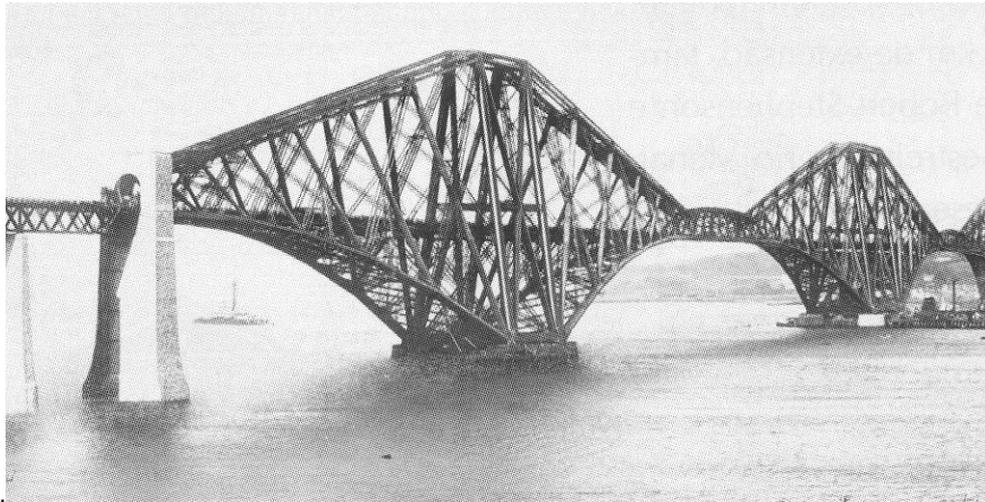
Figura 24: Esquema estrutural do Arco Funicular. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42

Forth Bridge – Edinburgh, Escócia, 1890.

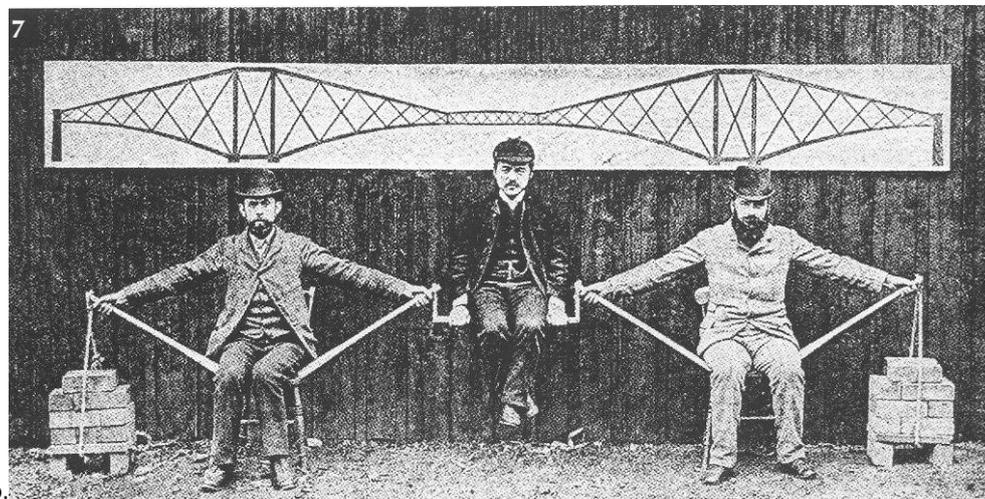
Outro exemplo histórico é a Forth Bridge, na Escócia, de 1890, projetada por Benjamin Baker e John Fowler. Esta ponte significou um grande avanço tecnológico, pois foi a primeira ponte de grande vão a ser construída inteiramente em aço (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

Nesse projeto notamos o contraste entre a robustez estrutural dos três apoios e a leveza dos vãos entre os apoios e nos extremos na ponte, forma que acompanha a variação do momento fletor. Os três apoios são formados por imensas treliças de aço apoiadas no centro e com dois balaços laterais, onde se apóiam treliças menores que vencem os vãos principais. Nos extremos as treliças se unem em grandes pilares que garantem, com seu peso, a estabilidade da estrutura (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

Além disso, é interessante observar a maneira empírica que os executores da ponte utilizaram para demonstrar o sistema estrutural utilizado no projeto. Através de uma “maquete humana” é possível notar os pesos colocados nas extremidades, que fazem o papel dos pilares. (Figura 25).



a.



b.

Figura 25: a. Forth Bridge, Escócia, 1890. b. “Maquete Humana”, executores demonstram o sistema estrutural. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 98.

Na Arquitetura Moderna Brasileira são vários os casos em que a técnica construtiva e o sistema estrutural sobressaem na forma arquitetônica. Nessa vertente arquitetônica podemos destacar a preocupação com a exploração da estrutura como elemento plástico e a busca da aplicação do conhecimento na construção.

Essas características aparecem em obras marcantes de diversos arquitetos e em épocas distintas da arquitetura brasileira. Como nos grandes planos e empenas estruturais de concreto armado, de Villanova Artigas, na FAU-USP, em São Paulo de 1961. No “maior vão livre do mundo” na época, no Museu de Arte de São Paulo – MASP, de Lina Bo Bardi em 1957. Na exploração lógica do sistema construtivo industrializado, de João Filgueiras Lima no Centro Administrativo da Bahia, em Salvador, de 1973. E na técnica refinada para gerar a forma, no Museu Brasileiro da Escultura em São Paulo, de Paulo Mendes da Rocha em 1988 (MACIEL, 2006).

O grande desafio dos arquitetos brasileiros era suprir a condição tecnológica atrasada, devido à industrialização tardia, consolidada somente após a Segunda Guerra

Mundial. Isso gerou no início do movimento moderno da arquitetura brasileira, obras que expressavam uma contradição, ao simular de maneira artesanal efeitos e elementos tecnológicos ainda não disponíveis no Brasil.

Surgem aí arquitetos que conseguem explorar e dominar tecnologias mais bem adaptadas a realidade local, dando ênfase à expressão tectônica¹, “a utilização da estrutura como elemento gerador do espaço e definidor da expressão plástica.” (SANTA CECÍLIA, 2006)

Os arquitetos modernistas, cada uma a sua maneira, expressavam em suas obras um “discurso sobre a técnica”. Niemeyer procurava mostrar o desenvolvimento da engenharia nacional por meio de suas obras públicas; Vilanova Artigas explorava empenas estruturais de concreto armado e lajes nervuradas permitindo grandes vãos; Paulo Mendes da Rocha estabelecia seu discurso sobre o lugar pela exibição do conhecimento técnico; João Filgueiras Lima fazia uso da exploração da lógica de montagem (MACIEL, 2006).

Museu de Arte Moderna - Rio de Janeiro, Brasil, 1953.

Nesse contexto se destaca a solução construtiva de Affonso Reidy no projeto do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro em 1953, que, segundo Maciel, 2006: “reduz a seção dos pilares pela utilização da compensação entre momentos fletores na base do ‘V’”. Porém, esse artifício de contrariar o percurso natural das cargas, imposto pela gravidade e ampliando seu percurso até a fundação, acaba onerando a estrutura. Em alguns casos tais artifícios estruturais são justificáveis pela questão estética.

¹ Recorro a Bruno Santa Cecília para definir o termo “tectônico: “(...)cabe aqui recuperar o significado do termo tectônico, desfazendo o entendimento equivocado de tratar-se de um sinônimo ou de um equivalente para a palavra construção. Etimologicamente, o termo deriva do grego tekton, que significa carpinteiro ou construtor. Historicamente, o significado do termo evoluiu para uma noção mais geral de construção passando a incorporar seu potencial poético. Em arquitetura, passou a designar não apenas a manifestação física do componente estrutural, mas a amplificação formal de sua presença em relação ao conjunto das demais partes. Portanto, o caráter tectônico de um edifício seria expresso pela relação de interdependência mútua entre estrutura e construção, a condicionar sua manifestação visível, ou seja, sua aparência.” (SANTA CECÍLIA, 2006 p. 6)



Figura 26: Vista do corpo principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, bloco de exposições. Rio de Janeiro. Fonte: CASTELOTTI, 2006, p.86

O MAM foi projetado por Reidy entre 1952 e 1953, sua construção ocorreu, por razões de orçamento, em três etapas. O conjunto da obra é formado por três blocos. O Bloco Escola, primeiro a ser inaugurado em 1953; o Corpo Principal, que abriga a galeria de exposição e Affonso Reidy jamais viu terminado, pois faleceu vítima de câncer em 1964 aos 54 anos, três anos antes da inauguração dessa fase da obra; e por fim o Teatro, recém construído e inaugurado ao final de 2006.

O local onde é situado o MAM é um enorme aterro a beira mar – Aterro do Flamengo – projetado também por Affonso Reidy, utilizou terra do Morro de Santo Antônio e conta também com um grande parque projetado por Burle Marx. A área ocupada pelo Museu tem 40 mil metros quadrados, cercado pelo mar e pelos jardins de Marx.

Affonso Reidy teve a preocupação, durante todo o processo do projeto em não influir na paisagem do local, deixando grandes vãos livres no térreo e dando bastante transparência ao edifício (SERAPIÃO, 2007). Outra escolha do arquiteto foi a de usar os materiais de forma natural, observa-se o concreto da estrutura, o vidro das grandes janelas, os tijolos das fachadas em alvenaria e o alumínio nos brises das fachadas de grande incidência solar, usando suas cores e texturas de maneira harmoniosa.

O corpo principal do Museu abriga a área de exposição. É um bloco longilíneo, de 130 metros de comprimento e 16 metros de largura, com 2 pavimentos e um mezanino. Toda a área de exposição é livre, sem colunas, o que responde a uma necessidade primária do programa, liberdade para montar-se qualquer tipo de exposição, além de contribuir para a transparência do edifício e assim para sua relação com o entorno. O pé direito varia entre 3.60 metros, 6.40 metros e 8 metros no ponto mais alto. Esse

bloco é estruturado por 14 pórticos em concreto armado, espaçados de 10 em 10m, vencendo um vão de 26m entre os apoios (VASCONCELLOS, 2004). Esses pórticos são formados por pilares que seguem a forma de acordo com a necessidade dos esforços. Seu perfil começa delgado na base e vai aumentando conforme chega na viga superior.

Os pilares externos têm 7 metros de altura e apóiam a cobertura, são inclinados e se bifurcam no contato com o solo, formando o famoso “V” que gerou inveja até mesmo em Le Corbusier, segundo citação atribuída a ele em SERAPIÃO, 2007, em sua visita ao Brasil em 1962, Le Corbusier teria dito: “Ora veja: eu quis fazer esta coluna, mas não tinha armação desse tipo” (CORBUSIER *appud* SERAPIÃO, 2007, p. 60). Na parte interna e menor do “V” está apoiada a laje do primeiro piso. Abaixo da linha do solo, os blocos de apoio são ligados transversalmente por um tirante de concreto protendido que absorve o empuxo horizontal de 200t.



Figura 27: Detalhe do pilar em “V” do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Foto de Meindert Versteeg, 2007. Fonte: SEGRE, 2007. p. 6

O segundo piso, ou mezanino é suspenso por meio de tirantes sustentados pelos pórticos, criando assim um ambiente mais transparente e fluido, conforme pregava a arquitetura moderna, misturando o ambiente com a paisagem do entorno, unindo o público com o privado (VASCONCELLOS, 2004).

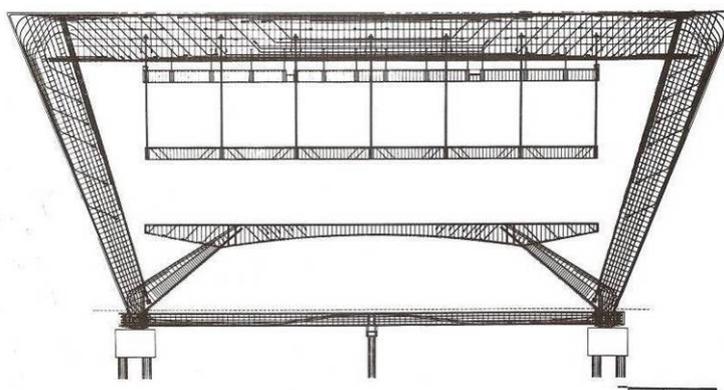


Figura 28: Corte do pórtico do bloco principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, armaduras.

Fonte: VASCONCELLOS, 2004. p. 256

O elemento mais marcante em toda a arquitetura do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro é, sem dúvida, a estrutura do pórtico, apoiado nos pilares em “V”, que possibilitaram que o arquiteto alcançasse o resultado arquitetônico desejado na sua forma estrutural mais pura.

A figura 29 mostra o diagrama de momento fletor do modelo estrutural do pórtico utilizando o programa Ftool. Na seqüência (figura 30) temos os mesmos diagramas para uma forma tradicional de pórticos. Nessa comparação, vemos que com os pilares em “V” e o segundo piso pendurado no pórtico através de tirantes Reidy consegue diminuir o momento na laje do primeiro piso, permitindo vigas e lajes menores, vãos maiores e ausência de colunas internas.

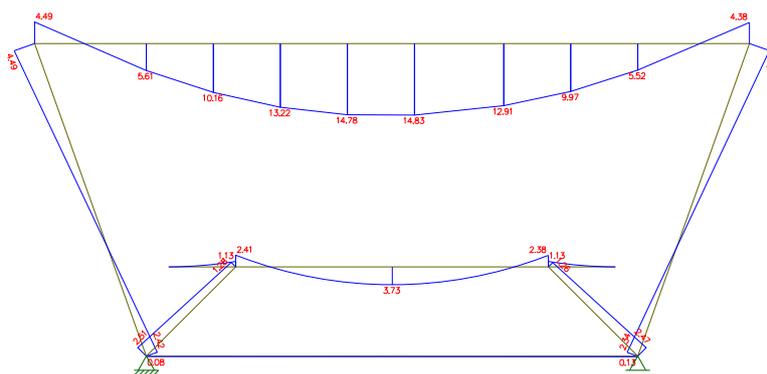


Figura 29: Diagrama de momento fletor do pórtico do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Desenho do autor. Programa FTOOL.

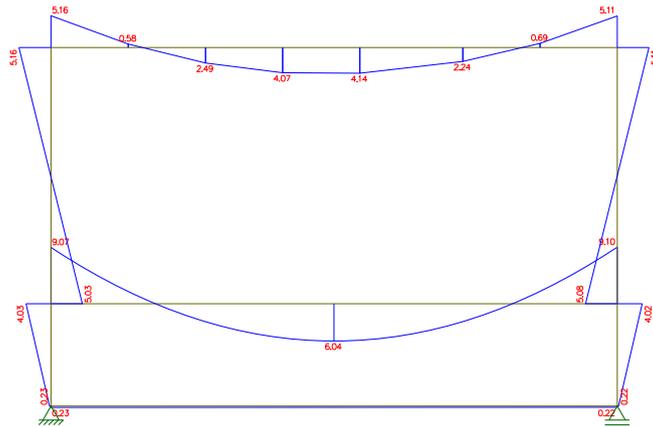


Figura 30: Diagrama de momento fletor simulando uma forma tradicional para o pórtico do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. Desenho do autor. Programa FTOOL.

Estação Largo 13 - São Paulo, 1986.

Outro exemplo de estrutura porticada, em que o sistema estrutural é a principal componente do resultado estético é na Estação Largo 13, em São Paulo, projeto de João Walter Toscano, Odiléia Setti Toscano e Massayoshi Kamimura de 1986. Nesse projeto a estrutura, em aço, é formada por uma série de 17 pórticos biarticulados que sustentam o piso superior por meio de vigas transversais que são atirantadas aos pórticos.

Além do sistema de pórticos destaca-se a coerente utilização dos materiais que formam a laje do piso superior. Essa laje é uma estrutura maciça de concreto armado conectada aos perfis metálicos, caracterizando uma viga-mista, onde o concreto trabalha à compressão e o aço à tração, aproveitando o melhor desempenho de cada material.



Figura 31: Estação Largo 13, São Paulo, SP. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 21.

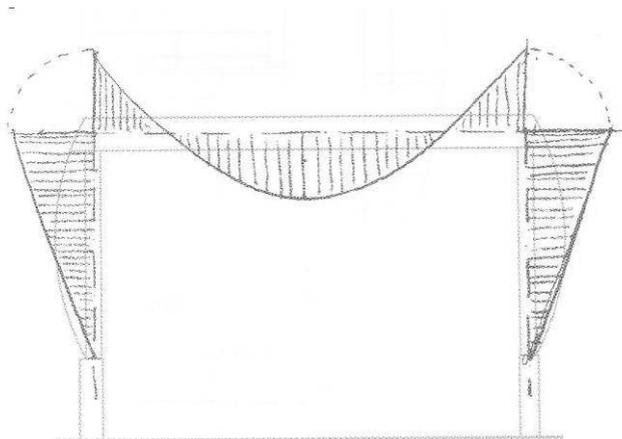


Figura 32: Diagrama de momento fletor para o pórtico da Estação Largo 13, São Paulo, SP. Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 21.

2.2. Sistemas Estruturais na Arquitetura de Oscar Niemeyer em Brasília

Na arquitetura de Oscar Niemeyer é evidente a presença marcante do Sistema Estrutural na definição da forma e assim no resultado plástico da obra construída. Niemeyer gosta de valorizar o trabalho do engenheiro, no documentário “A Vida é um Sopro” de Fabiano Maciel ele mesmo diz:

Eu valorizei o trabalho do engenheiro. E lá em Brasília, quando uma estrutura se concluía a arquitetura já estava presente. (...) Arquitetura e Estrutura como coisas que nascem juntas e juntas devem se enriquecer. (Oscar Niemeyer, no filme “Oscar Niemeyer, A Vida é um Sopro”, Direção: MACIEL, Fabiano – Europa Filmes, 2007)

Nos palácios de Brasília, Niemeyer procurou um apuro tecnológico que o permitisse usar formas simples e puras, para isso teve como principal apoio a estrutura e seu grande parceiro, o engenheiro Joaquim Cardozo. Os projetos dos Palácios são caracterizados pela própria estrutura, em uma busca de soluções inovadoras, mas sempre dentro da lógica do sistema estático, buscando sempre o limite máximo da resistência dos materiais (PORTO, 2007).

Palácio da Alvorada – Brasília, 1956-1957.

O primeiro palácio a ser construído em Brasília foi o Palácio da Alvorada, em 1956, antes mesmo de aprovado o Plano Piloto de Lúcio Costa. Esse palácio foi também o primeiro edifício definitivo construído em Brasília.

No projeto do palácio destaca-se a forma dos apoios dos pilares, que parecem apenas tocar levemente o solo. Esses pilares externos têm um desenho característico, conseguido através da genialidade de Joaquim Cardozo que, para aliviar as cargas incidentes nas colunas, criou apoios internos que recebem a maior parte das cargas.

Além disso, a laje da cobertura não é contínua no trecho da varanda e sua espessura diminui até encontrar os pilares, artifício que diminui ainda mais a carga transferida para as colunas da fachada (PORTO, 2007).

Na Figura 33 são mostrados três cortes transversais do palácio, onde podemos notar a presença dos pilares internos e as lajes, do corpo central, mais robusta e da varanda externa, mais leve e em curva, diminuindo em direção aos pilares externos que suportam apenas as cargas dessa laje e da laje de piso da varanda (VASCONCELOS, 1992).

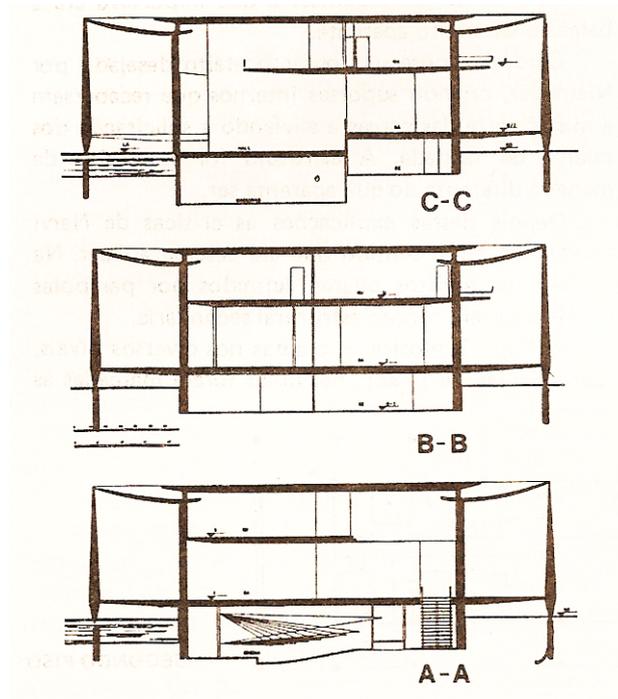


Figura 33: Cortes transversais do Palácio da Alvorada. Fonte: VASCONCELOS, 1992 (Volume I), pág. 88.

Cardozo também “escondeu” os apoios no volume principal. Essa caixa de vidro, que parece flutuar no espelho d’água está fortemente apoiada em uma sólida base que é escondida pela escultural colunata. Essa colunata, na realidade, é, segundo UNDERWOOD, 2003: “uma arcada parabólica invertida, suportadas por arcos saídos de baixo, que mal tocam o solo” (UNDERWOOD, 2003, p. 84). Além disso, para dar a sensação de que os pilares estão “pousados” sobre o solo Joaquim Cardozo recuou do alinhamento da fachada os verdadeiros apoios das colunas, esses apoios foram soterrados após o aterro final, mas podem ser observados na figura 34 (VASCONCELOS, 1992).

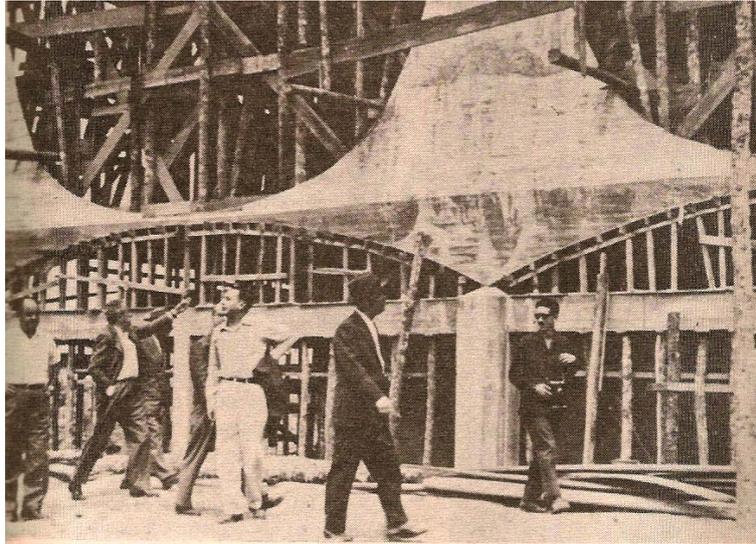


Figura 34: Foto da construção em que aparecem os apoios dos pilares do Palácio da Alvorada antes de serem aterrados. Fonte: VACONCELOS, 1992 (Volume I), pág. 89.

Soluções similares, de diminuir a espessura da laje de cobertura na região mais próxima à borda e distribuir a maior parte da carga em pilares internos para priorizar a estética da fachada, foram utilizadas nos projetos do Palácio do Planalto e do edifício do Supremo Tribunal Federal, ambos de 1958.

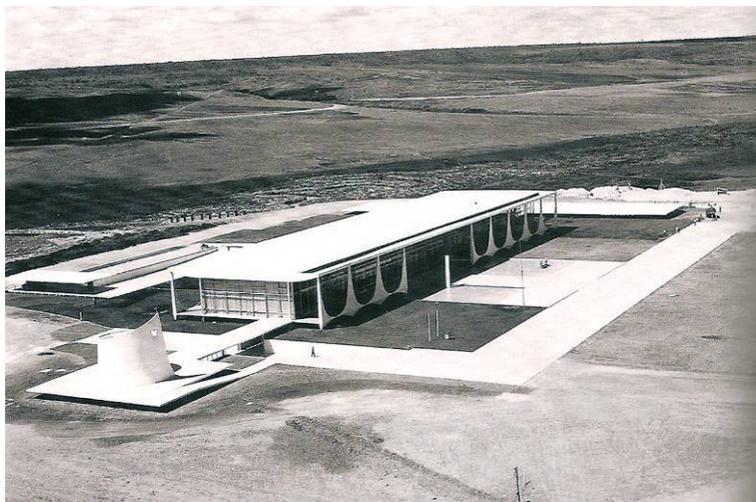


Figura 35: Palácio da Alvorada, Brasília 1957. Foto : Marcel Gautherot. Fonte: UNDERWOOD. 2003 p. 86.

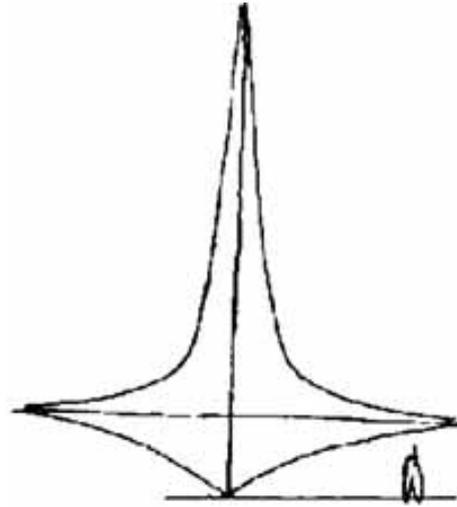


Figura 36: Croqui de Niemeyer para a coluna do Palácio da Alvorada. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.



Figura 37: Vista da varanda do Palácio da Alvorada. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer;

Catedral Metropolitana de Brasília – Brasília, 1959.

Entre as obras de Oscar Niemeyer, a Catedral de Brasília se destaca por ter uma estrutura inovadora e ousada totalmente aparente na obra terminada. A estrutura da Catedral foi responsável por valorizar o trabalho dos profissionais brasileiros no cenário mundial, afirmando a competência dos engenheiros da época (PESSOA, 2002).

A Catedral de Brasília foi construída em duas fases. Na primeira fase, em 1959, foi erguida a estrutura principal, formada por 16 pilares curvos e uma laje de cobertura situada abaixo do topo dos pilares. Esses pilares, em um primeiro projeto seriam 21, e foram reduzidos por motivos estéticos. Na segunda fase, entre 1979 e 1970, foi concluída a obra com a execução do batistério, do espelho d'água, do campanário e os acabamentos na nave principal – rampa, vitrais, sacristia.

A simplicidade do programa arquitetônico e da planta baixa do conjunto contrasta com a complexa solução estrutural adotada. Apesar do interior todo revestido em mármore e das três esculturas de Alfredo Ceschiatti, os Anjos pendurados no teto como se pairassem sobre os visitantes, o grande destaque na Catedral é sua estrutura. O acesso à nave principal é feito através de uma rampa que leva até o subsolo, deixando no nível da rua apenas a cobertura, destacada de qualquer outro elemento.



Figura 38: Estrutura dos pilares da Catedral de Brasília, 1959 – primeira fase da construção. Fonte: Arquivo Público do DF.

O projeto estrutural da Catedral consiste nos 16 pilares distribuídos em uma circunferência de 60 metros de diâmetro. Esses pilares unidos tomam a forma de um parabolóide hiperbólico e são sustentados por dois anéis de concreto armado. O primeiro contorna toda a base da estrutura e funciona como um tirante, sob tração, absorvendo todos os esforços horizontais gerados pelas 16 colunas. O segundo anel, de compressão, passa por dentro dos pilares no ponto onde esses se encontram, portanto não é aparente na estrutura. A função desse anel de compressão é impedir que as colunas se fechem. A laje de cobertura não tem função estrutural, servindo apenas como vedação (PESSOA, 2002).



Figura 39: Detalhe da construção do anel de tração na base da Catedral de Brasília, 1959. Fonte: Arquivo Público do DF.

Segundo Carlos Magalhães, arquiteto responsável técnico da obra, então funcionário da Novacap, em depoimentos escritos em 2001, entre pilares e o anel inferior de tração existem placas de neoprene de 2,5cm de espessura (PESSOA, 2002). Esse detalhe faz com que a junção dos pilares com a fundação seja rótula, transferindo para as fundações apenas esforços verticais.

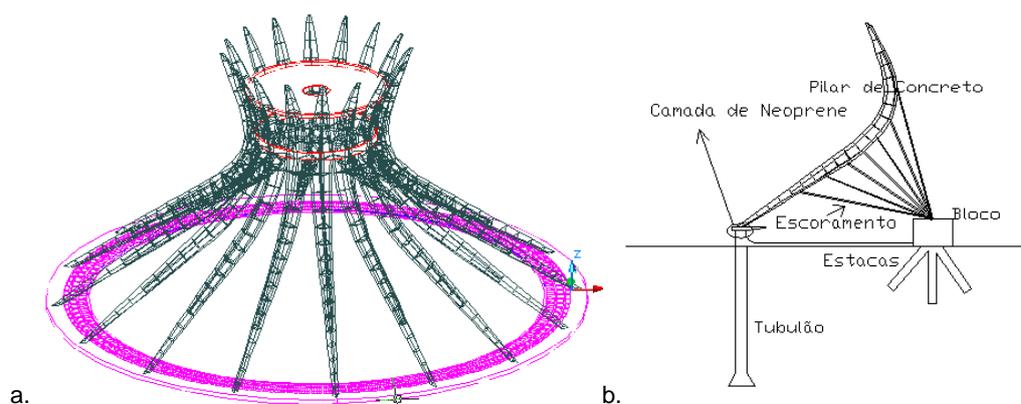


Figura 40: a. Estrutura da Catedral de Brasília. Programa AutoCAD. b. Estruturas de escoramento dos pilares por Carlos Magalhães, 2001. Fonte: PESSOA, 2002

Para a execução da estrutura as formas dos pilares foram construídas no próprio canteiro, com o auxílio de desenhos em escala real, pois a secção dos pilares varia ao longo de todo seu comprimento e ainda possuem “caixões perdidos” em sua secção para que a proporção dos pilares obedecesse o desenho do arquiteto, mantendo a estabilidade da estrutura, sem aumentar desnecessariamente o peso da peça. Além disso, para o escoramento das formas foram construídos 16 blocos de fundação e 80 estacas metálicas (conforme desenho na figura 40). Estas estacas foram cortadas no nível do piso inferior e ainda estão sob o solo (PESSOA, 2002).

Na figura 41 temos os diagramas de forças cortantes no eixo vertical Y e o diagrama de momentos fletores obtidos por PESSOA, 2002 no programa SAP 2000. Nesses diagramas podemos notar que a variação do tamanho da secção dos pilares da Catedral acompanham o aumento dos esforços a que a estrutura é submetida.

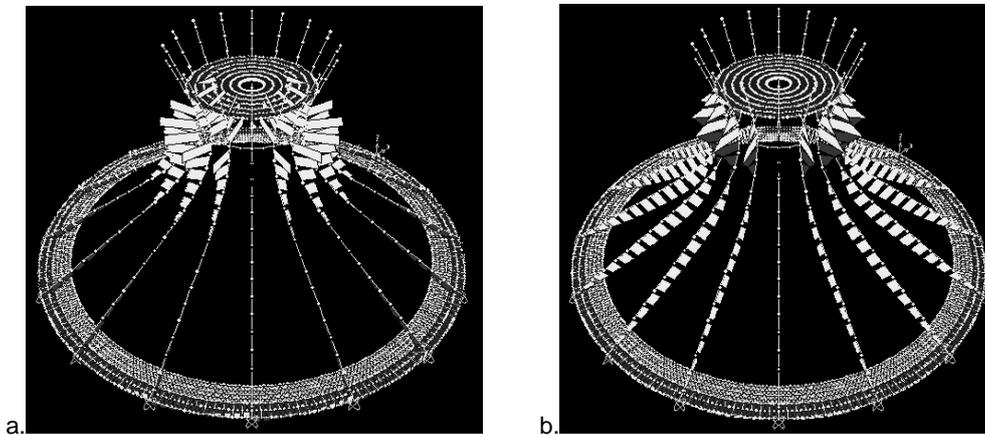


Figura 41: a. Diagrama de forças cortantes no eixo vertical Y. b. Momentos fletores máximos. Programa SAP 2000. Fonte: PESSOA, 2002

Sede do Touring Club - Brasília, 1962.

Um exemplo na arquitetura de Oscar Niemeyer, onde é possível destacar o desenho arquitetônico seguindo as linhas do sistema construtivo é o antigo Touring Club, em Brasília, projetado em 1962.

Situado no encontro do Eixo Monumental com o Eixo Rodoviário, local que, segundo o Plano Piloto de Lúcio Costa, era destinado a uma casa de Chá, foi projetado para abrigar, em seu pavimento térreo, serviços técnicos de assistência automobilística e, em seu pavimento superior, no nível do eixo rodoviário, um salão de exposições, auditório para 140 pessoas e gabinetes além de amplas varandas e ambientes de estar com visão privilegiada da esplanada dos ministérios (FONSECA, Roger, 2007).

Podemos observar nas figuras 42 e 43 como é clara a semelhança da forma arquitetônica da viga de cobertura do edifício com o seu gráfico de momento fletor, evidenciando o uso do amplo conhecimento do sistema estrutural para o resultado estético desejado.



Figura 42: Antigo Touring Club do Brasil, Brasília. Foto do Autor.

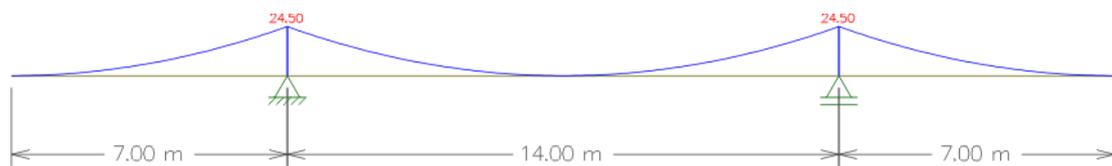


Figura 43: Diagrama de Momento Fletor da viga de cobertura do Touring Club do Brasil, Brasília. Desenho do autor. Programa FTOOL.

Um desenho de viga muito semelhante a esse já havia aparecido em outra obra de Niemeyer. A cobertura do anexo do late Clube de Pampulha em Belo Horizonte, de 1961 apresenta uma situação semelhante, porém nesse caso os balanços não são simétricos. Isso gera uma mudança no diagrama de momento fletor, que apresenta um momento fletor negativo maior no apoio próximo ao maior balanço (Figura 44). Essa diferença no desenho do gráfico de momento fletor foi repetida pelo arquiteto na forma das vigas (Figura 45).

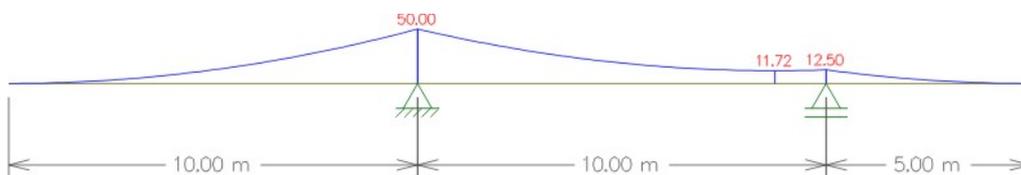


Figura 44: Diagrama de Momento Fletor de uma viga bi-apoiada com balanços não simétricos. Desenho do autor. Programa FTOOL.



Figura 45: Anexo do late Clube Pampulha. Fonte: FONSECA, Roger, 2007, p. 79.

Instituto Central de Ciências (ICC) da UnB – Brasília, 1962-1975.

O campus da Universidade de Brasília foi inaugurado em 21 de Abril de 1962, data em que a capital celebrava o seu segundo aniversário, mas sua fundação a é datada pela lei de criação da Universidade de Brasília (Lei nº 3998 de 15 de Dezembro de 1961, complementada pelo decreto nº 500 de 15 de Janeiro de 1962, aprovando o estatuto da Fundação Universidade de Brasília) (FONSECA, Regis, 2007).

O plano de urbanização da UnB, realizado por Oscar Niemeyer em 1962, então chefe do CEPLAN – Centro de Planejamento da UnB, traz a unificação das oito unidades acadêmicas propostas por Lúcio Costa em um único edifício, o Instituto Central de Ciências (ICC). Além disso, esse plano contempla uma grande praça, denominada Praça Maior. Nessa praça estariam localizados a Reitoria, a Biblioteca, um museu (Museu da Civilização Brasileira) e o Auditório de Aulas Magnas.

Desse conjunto foram construídos: o ICC, entre 1962 e 1975; a Biblioteca Central, entre 1970 e 1973; a Reitoria, entre 1972 e 1975 e a área residencial da Colina em 1963, além do Centro Esportivo, de 1969 a 1972, que foi transferido para as proximidades do setor de clubes pelo plano de Niemeyer (FONSECA, Regis, 2007).

Talvez a maior contribuição do arquiteto para a Universidade de Brasília, a Praça Maior não saiu do papel. Recentemente, em novembro de 2009, foram publicados vários desenhos, estudos e croquis de Oscar Niemeyer para essa praça, pela revista Darcy (revista de jornalismo científico e cultural da Universidade de Brasília). Essa coleção de croquis e estudos mostra como a idéia da praça, a volumetria e a forma de seus edifícios evoluíram na idéia de Niemeyer (CAMPOS, 2009) (Figura 46).

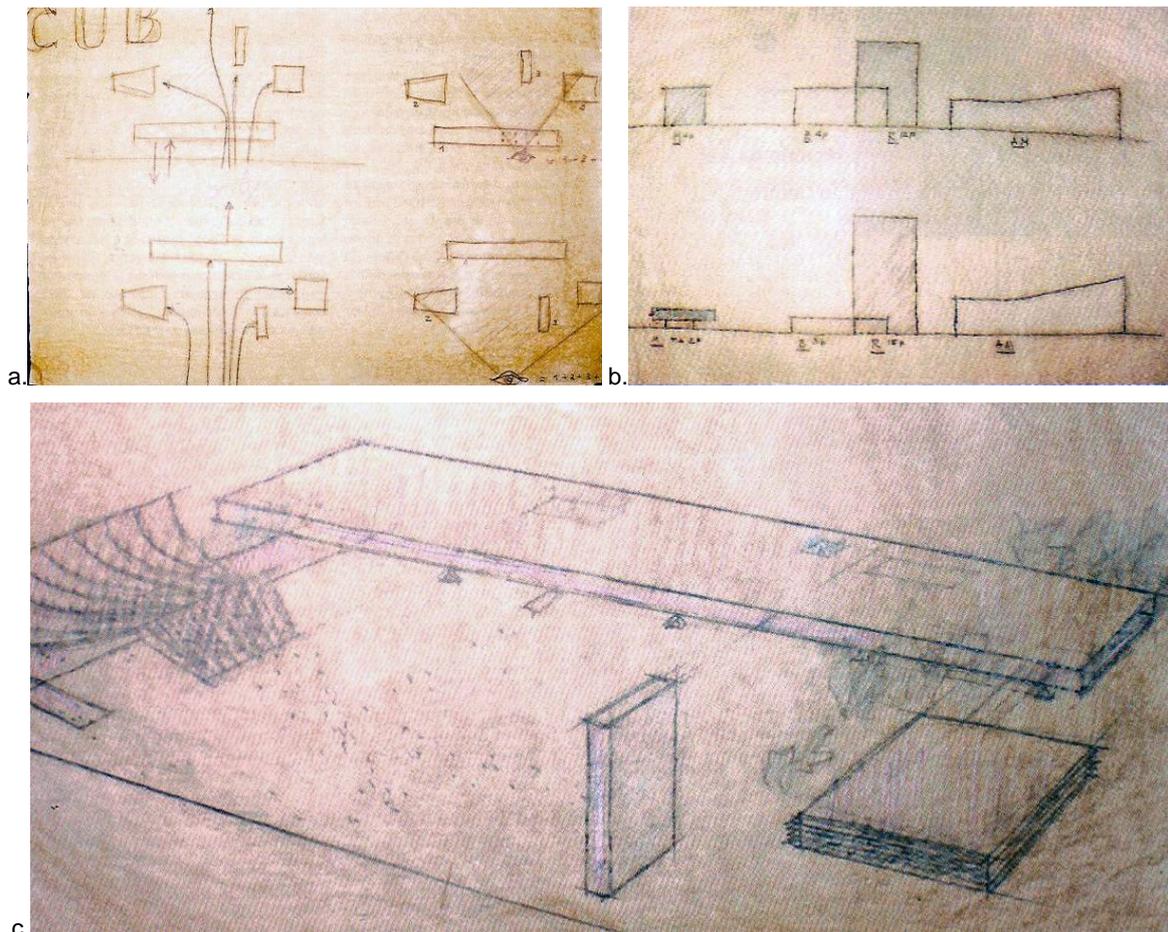


Figura 46: a. Estudo de fluxos para diversas situações dos edifícios; b. Estudo das volumetrias dos edifícios; c. Croqui da Praça Maior com os quatro edifícios. Desenhos de Oscar Niemeyer para a Praça Maior da UnB.

Fonte: Revista Darcy, nº 3 - Nov. e Dez. de 2009, pp. 56-61.

O Edifício do ICC, construído entre 1962 e 1975, é um edifício de cerca de 720 metros de extensão com duas alas paralelas afastadas 16,50 metros, formando uma grande praça ao longo de todo o edifício. As duas alas formam os blocos A e B. O bloco A, corresponde à ala dos laboratórios e possui 29,60 metros de largura. Já o bloco B corresponde à ala dos auditórios e possui 26,65 metros de largura. No projeto original esse espaço entre as alas teria coberturas de cascas de concreto de diversos formatos, coberturas estas que não foram construídas (MOREIRA, 2007).

Além disso, também não foram construídos dois auditórios para quinhentas pessoas, devido ao aumento da ocupação do subsolo e da criação de uma rua interna que percorre todo o prédio. Outra mudança no projeto original ocorreu na sua ocupação. Na idéia do arquiteto essa seria feita de forma transversal, ou seja, cada faculdade contaria com um trecho do bloco de auditórios e outro do bloco de laboratórios. Porém, com a ocupação sendo feita de maneira longitudinal os espaços destinados aos auditórios são utilizadas como salas de aula (FONSECA, Regis, 2007).

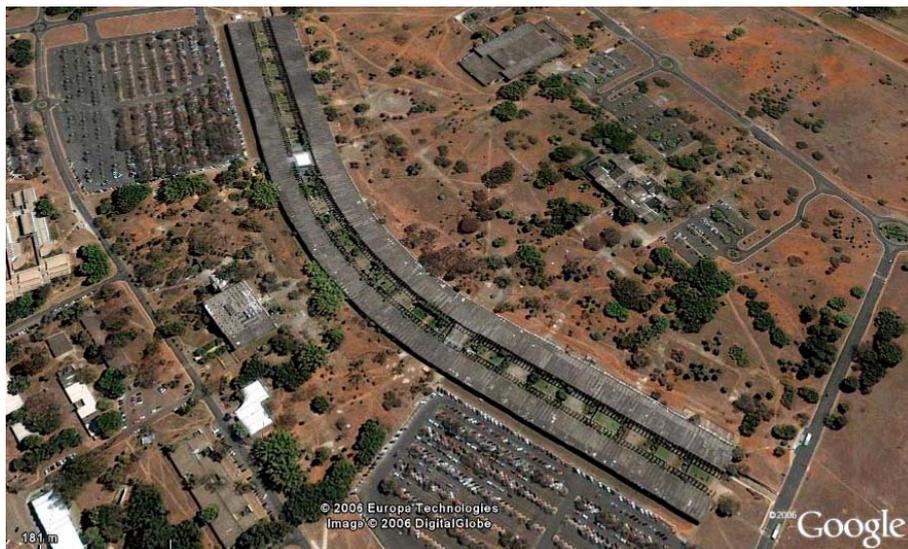


Figura 47: Imagem de satélite do ICC. Fonte: MOREIRA, 2007, p. 23.

A estrutura do ICC é constituída por 4 linhas de pilares pré-moldados de 0,20x1,50 metros espaçados a cada três metros e com 10 metros de altura. Esses pilares foram moldados com esperas, encaixes que receberiam as vigas do piso térreo e dos mezaninos e foram por sua vez apoiados nas sapatas a través de encaixes previstos nas mesmas.



Figura 48: Montagem das vigas pré-moldadas da cobertura do ICC. Fonte: FONSECA, Regis, 2007, p. 6.

Apesar de não possuir um desenho arquitetônico tão ousado quanto aos outros edifícios construídos em Brasília na mesma época, o Instituto Central de Ciências é de grande importância para o avanço técnico da engenharia, pois foi um grande canteiro experimental da tecnologia do pré-moldado, sendo considerado um marco desse segmento no Brasil (MOREIRA, 2007).

Palácio do Itamarati – Brasília, 1963-1970.

Construído no período entre 1963 e 1970, tendo sofrido diversas paralisações em sua obra, o Palácio do Itamaraty foi inaugurado em 21 de Abril de 1970 com a realização da primeira solenidade de formatura de diplomatas. O conjunto, compreendido por três edifícios abriga o Ministério das Relações Exteriores em uma área construída de aproximadamente 75 mil metros quadrados. O Palácio do Itamarati é um desses prédios e possui, em planta, uma forma quadrada de 84 metros de lado, com uma altura de 17,56 metros, sendo 4,27 no subsolo (SANTOS, 2007).



Figura 49: Fachada do Palácio do Itamaraty, Brasília. Foto do autor.

No volume do edifício do palácio se destaca as suas quatro fachadas monumentais, formadas cada uma por 15 pilares separados por um vão de 6 metros. Unindo os pilares no topo temos arcos ligados à cobertura. Essas fachadas envolvem uma fachada interna de vidro que aparenta ter uma estrutura totalmente independente da cobertura. Os pilares têm uma secção trapezoidal, com a parte mais fina virada pra parte exterior do prédio o que confere mais leveza a fachada.

As vigas internas do edifício possuem altura máxima de 1,20 metros – definida pela arquitetura e vãos livres de 36 metros. O que exigiu do calculista, o engenheiro Joaquim Cardozo, soluções arrojadas, mesmo para os dias atuais, como a emenda dos ferros por solda e a adoção de contraflechas nas vigas, contrabalanceando as elevadas deformações na retirada dos escoramentos (SANTOS, 2007).



Figura 50: Jardim interno do Palácio do Itamaraty, Brasília. Foto do autor.

Na estrutura de cobertura foram concebidas vigas em dois sentidos. As vigas-faixas Norte-Sul têm secção com 4 metros de largura e 0,60 metros de altura, enquanto as vigas transversais (Leste-Oeste) têm secção de 0,20m de largura por 1,20m de altura. Podemos notar pelo diagrama de momento fletor obtido por Santos (2007) através do programa SAP 2000 para as vigas na direção Leste-Oeste (Figura 51) os esforços estão concentrados nos pilares internos da estrutura, o que permite, a exemplo dos outros palácios, maior leveza nas colunas da fachada.

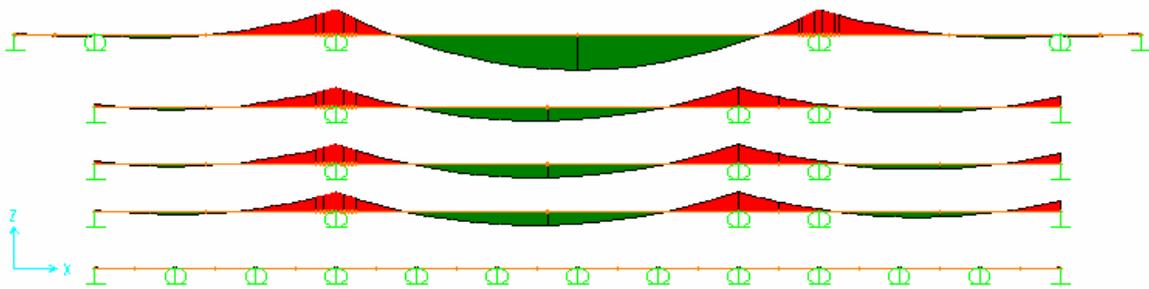


Figura 51: Diagrama de momentos fletores nas vigas no sentido Leste-Oeste do Palácio do Itamaraty. Fonte: SANTOS, 2007.

Palácio da Justiça – Brasília, 1962-1972.

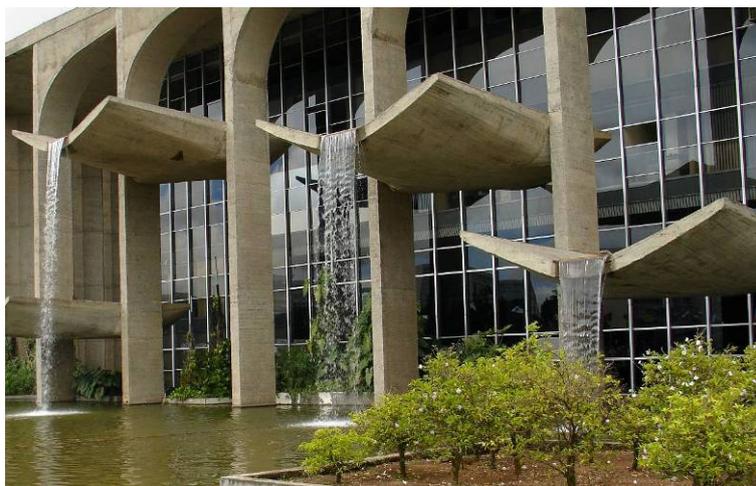


Figura 52: Fachada do Palácio da Justiça em Brasília. Foto do autor.

A pedra fundamental para a construção do Palácio da Justiça, primeira sede própria do Ministério da Justiça foi lançada em 5 de maio de 1962, porém sua construção só foi iniciada em 12 de outubro de 1965, com o início da execução das fundações. Durante esse período, entre o lançamento da pedra fundamental e o início da obra, muito pouco foi feito, como sondagem do terreno, montagem de canteiro e escavações.

A construção do palácio foi marcada por interrupções e correções no projeto, que geraram atrasos em sua conclusão. Entre essas correções estão duas importantes intervenções do arquiteto Oscar Niemeyer que, em 1985, anos após a inauguração do edifício, considerou que seu projeto não havia sido seguido na execução.

Uma delas foi a reformulação dos arcos da fachada principal, que haviam sido feitos como arcos plenos ao invés de semi-arcos (Figura 53). A segunda foi a retirada do revestimento de mármore nas colunas, deixando-as em concreto aparente (VIOTTI, 1985 *appud* MOREIRA, 2006).



a) Fachada com os arcos plenos



b) Fachada com os arcos modificados

Figura 53: Modificações na fachada do Palácio da Justiça em Brasília. Fonte: MOREIRA, 2007.

O período em que a obra tomou mais corpo foi entre 1966 e 1969, quando foi erguida e estrutura de concreto armado pela construtora Civilsan (MOREIRA, 2007). A inauguração do Palácio da Justiça aconteceu finalmente em 3 de julho de 1972.

A exemplo dos outros palácios do Eixo Monumental projetados por Niemeyer, o Palácio da Justiça também possui um núcleo central envidraçado, este com cinco pavimentos e um subsolo. Esse núcleo foi construído primeiro, só depois foram erguidas as quatro fachadas e a cobertura da edificação.

As fachadas são todas diferenciadas. Na fachada principal temos as seis famosas fontes projetadas em balanço por Niemeyer, que, de diferentes alturas, jogam a água para o espelho d'água do jardim em frete ao edifício, projetado pelo paisagista Roberto Burle Marx. Essa fachada é formada por 9 semi arcos que ligam pilares extremamente esbeltos, espaçados a cada 6,5 metros (MOREIRA, 2007).

A fachada oeste chama a atenção pelo "brise-soleil" formado por uma seqüência de laminas de concreto que vão do chão ao topo do edifício. Essas lâminas possuem espessuras, angulações e vãos variáveis, o que dá a essa fachada um dinamismo e um movimento bem singular. Em contraste à fachada oeste, a fachada leste apresenta uma seqüência de sete pilares esbeltos, espaçados a cada 13 metros, deixando o corpo interno nessa fachada bem exposto.

A fachada posterior do edifício é permite uma comparação direta com a fachada principal. Nela os pilares estão dispostos da mesma forma que na primeira, mas encontram a cobertura em arcos plenos, ao invés dos semi-arcos e não possuem as fontes em balanço.

As quatro fachadas e a cobertura formam um envoltório retangular de 84 x 75 metros, protegendo o núcleo central quadrado de 61,1 metros de lado e formando assim um avarandado de 7 a 11 metros em torno de todo o edifício.

Internamente o que chama a atenção na arquitetura do Palácio da Justiça é o seu jardim interno. Situado no terceiro piso, com pé direito de 10,1 metros esse jardim, também projetado por Burle Marx, tem as vigas da cobertura formando um grande pergolado, com vão de 18 e 32m.

O projeto estrutural do palácio foi desenvolvido no Escritório Técnico Arthur Luiz Pitta – Etalp, em São Paulo. Para as lajes do núcleo do palácio foram projetadas como lajes nervuradas com vigas de 0,50 metros de altura e em alguns pontos específicos nas lajes foi necessário aplicar uma contraflecha de 3 centímetros

No terceiro pavimento, pela presença do jardim interno foram necessárias transições na estrutura. Além disso, foi criada uma serie de pilares, espaçados a cada 45 centímetros, formando uma espécie de brise, que começa na viga-faixa do terceiro pavimento e vai até a cobertura, recebendo as vigas que formam o pergolado do jardim.

Na cobertura foram utilizadas vigas contínuas de 1,30 metros de altura no menor vão – 75,1 metros – com vãos variados que atingem 18 e 32 metros sobre o jardim interno e estão apoiadas em vigas-faixa com vão que chegam a 13 metros, de acordo com a distância entre os pilares onde estão apoiadas. Na cobertura existem contraflechas de até 5 centímetros (MOREIRA, 2007).

Os gráficos da figura 54 mostram o diagrama de deformações para as lajes do terceiro pavimento e da cobertura. Com esses gráficos podemos notar como as contraflechas foram utilizadas nos pontos mais críticos da estrutura.

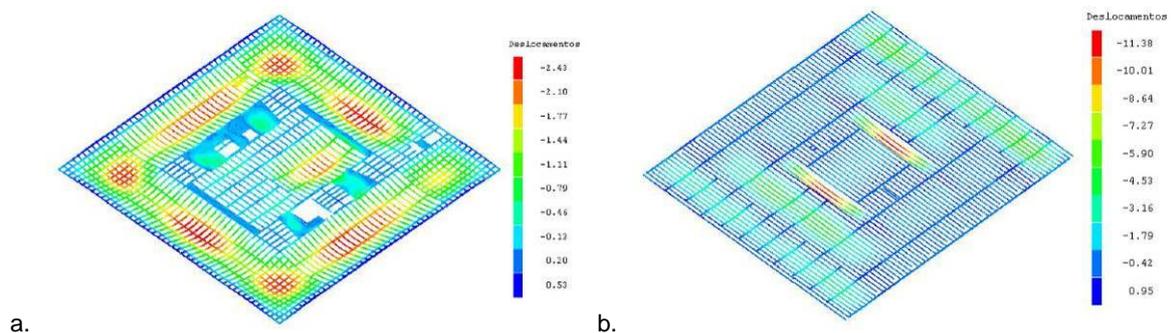


Figura 54: a. Gráfico de deslocamento da grelha laje do terceiro pavimento e b. gráfico de deslocamento da grelha da laje de cobertura do Palácio da Justiça. Programa CAD/TQS. Fonte: MOREIRA, 2007.

Ponte Costa e Silva - Brasília, 1967.

Alguns anos depois, na ponte Costa e Silva em Brasília, de 1967, Niemeyer utilizou claramente seus conhecimentos sobre o sistema estrutural. O resultado da obra evidencia a proximidade da forma com a necessidade estrutural. Nesse projeto, Niemeyer sugeriu uma solução arquitetônica e estética com referência na arquitetura da cidade mas que estava em total harmonia com a solução estrutural. A ponte possui um vão central de 220 metros, associado a dois vãos menores de 110 metros cada, uma solução estrutural – grande vão ladeado por vãos menores – de total conhecimento do arquiteto, e pode ser notada em vários palácios de Brasília (FONSECA, Roger, 2007).

Na figura 56 temos o diagrama de momento fletor realizado por FONSECA, Roger (2007) seguido de uma ilustração do mesmo autor em que o mesmo gráfico aparece invertido. Essas ilustrações mostram como é evidente a relação do sistema estrutural adotado por Oscar Niemeyer com o resultado formal da Ponte Costa e Silva.



Figura 55: Vista aérea da Ponte Costa e Silva em Brasília. Foto de Augusto Areal. Fonte: Infobrasília.

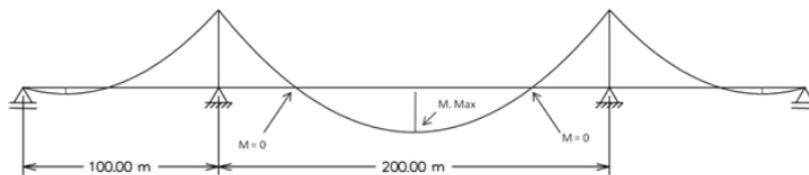


Figura 4.27 – Resultado do gráfico dos esforços de Momento Fletor realizado pelo autor. Fonte: FT00L (MARTHA, 2002).

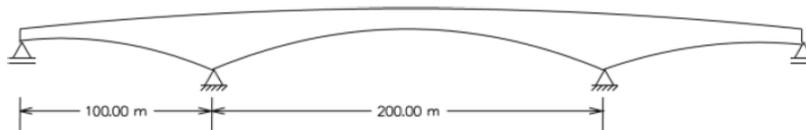


Figura 4.28 – Resultado formal obtido ao se inverter o gráfico de momento fletor, a forma arquitetônica tendo como referência a forma do gráfico de momento. Desenho realizado pelo autor. Fonte: (Photoshop, 2007).

Figura 56: Ilustrações com base no Gráfico de Momento Fletor para a Ponte Costa e Silva. Fonte: FONSECA, Roger, 2007, p. 105.

Museu Nacional Honestino Guimarães – Brasília, 2006.

Apesar de não fazer parte da mesma fase da carreira de Oscar Niemeyer que as outras obras analisadas aqui, a inclusão do Museu Nacional nessa lista se justifica pelo fato deste fazer parte do conjunto de obras do arquiteto para a Esplanada do Ministério e pelo fato de que esse edifício apresenta uma estrutura marcante, definidora de sua forma arquitetural.

O Museu Nacional Honestino Guimarães em Brasília, conhecido apenas como Museu Nacional, foi inaugurado em 15 de Dezembro de 2006, mas sua história começa muito antes, já nos planos de Lúcio Costa para a Nova Capital.

O projeto arquitetônico concebido por Oscar Niemeyer para esse edifício foi desenvolvido para substituir um projeto originalmente criado em 1970 e que, por ser de uma estrutura mais ousada, foi considerado muito caro e posteriormente substituído por um projeto mais simples e barato.

Esse museu é um exemplo dos trabalhos mais recentes do arquiteto, quando Niemeyer já explora com muita experiência e simplicidade as qualidades estruturais do concreto armado. Na questão estrutural Niemeyer teve a importante contribuição do engenheiro José Carlos Sussekind, que esteve ao seu lado em diversas obras nos últimos 30 anos.

Nos projetos originais do Plano Piloto de Brasília, apresentados pelo urbanista Lúcio Costa na década de 50 já estava previsto a construção de um museu, e este museu deveria ter o porte e a importância que uma capital nacional merece.

Porém, passaram-se alguns anos até que Brasília tivesse esse museu. Em 1970, na mesma época do projeto e construção do teatro Nacional, foi desenvolvido o projeto arquitetônico do conjunto Cultural de Brasília que continha em seu programa, além do Teatro Nacional, uma biblioteca, salas de música, cinemas e o museu. Esse primeiro projeto para o museu era bem diferente do que foi construído. Tratava-se de um edifício de 180 metros de comprimento com dois balanços de 70 metros para cada lado, suspenso na cobertura através de tirantes, e seria, provavelmente, um recorde na história do concreto armado (SUSSEKIND, 2002). Mas esse projeto ficou apenas no papel.

Em 1999, Oscar Niemeyer foi novamente chamado para rerepresentar um projeto para Conjunto Cultural e propôs um conjunto de quatro prédios – Centro Musical, Cinemas, Museu e Biblioteca. O conjunto seria disposto dos dois lados da esplanada dos ministérios, somando-se ao Teatro Nacional, complementando projeto concebido por Lúcio Costa e ocupando o Setor Cultural Norte com o Centro Musical e os Cinemas e o Setor Cultural Sul com a Biblioteca e o Museu. Os dois lados do Complexo seriam unidos por meio de uma passagem subterrânea que ainda contaria com lojas e estacionamento.

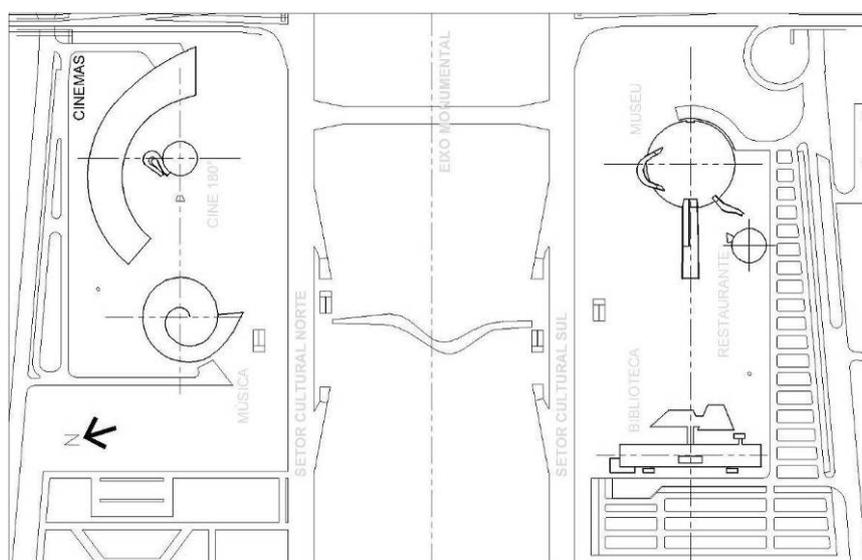


Figura 57: Implantação do Conjunto Cultural. Fonte: Museu Nacional

O Museu, por motivos econômicos e de prazo, teve seu projeto refeito, mas ainda não seria o projeto definitivo. Inicialmente o museu seria abrigado em uma cúpula de 40 metros de diâmetro, seu acesso se daria por uma rampa curva virada para a esplanada (SERAPIÃO, 2007). Essa cúpula abrigaria além do museu um restaurante panorâmico com jardim, o que induziria a duas aberturas assimétricas na parte superior da cúpula. Além disso, o projeto inicial teria janelas circulares na porção intermediária para iluminação dos espaços internos.

No projeto definitivo, por volta de 2002, Niemeyer decidiu por dobrar o tamanho da cúpula, segundo ele por notar, após estudos de uma maquete que representava quase toda a Esplanada dos Ministérios, que a escala desse edifício estava muito pequena diante do conjunto (SUSSEKIND 2002), fazendo com que a cúpula passasse a ter o diâmetro de 80 metros.

Foi então que, em 15 de Dezembro de 2006, data em que se comemorava o 99º aniversário de Oscar Niemeyer, o Museu Nacional Honestino Guimarães foi inaugurado, com a exposição Niemeyer por Niemeyer na qual eram expostas fotografias e desenhos das principais obras do arquiteto em seus mais de 70 anos de carreira.

O Museu é formado por um grande espaço de exposições, que, ao contrário de um museu comum, se destaca como um espaço amplo e propício para grandes exposições contemporâneas. O próprio Niemeyer assim descreve o espaço: “Não é um museu de obras fixas, mas um espaço contemporâneo, um museu de idéias, do experimental, que possa receber uma série de exposições e obras do Brasil e do mundo.” (NIEMEYER, *apud* SUSSEKIND, 2002).

Além do salão de exposições, o edifício de 13.653 m² de área construída ainda conta com dois auditórios, um para 700 e outro para 80 lugares; um mezanino com formas irregulares, suspenso e sustentado no teto da cúpula por meio de tirantes; dois elevadores para público e um elevador (plataforma) de carga; diversas salas para reservas técnicas e restauração e áreas para conservar obras não expostas. Com a mudança no projeto o restaurante passou a ocupar um anexo, de planta circular na parte de fora da cúpula e o estacionamento, agora ao ar livre, uma área mais a sudoeste do Setor.

A plasticidade da arquitetura do museu se dá, a princípio pela própria cúpula, que com 28 metros de altura se impõe na paisagem da esplanada e também pelos elementos que se destacam dela. A grande rampa do acesso principal, um plano inclinado de 52 metros de comprimento, virado para a Biblioteca dá unidade ao conjunto. Mas o maior destaque no exterior do Museu é a rampa que une o salão de exposições ao mezanino. Esta rampa sai do edifício fazendo um “passeio” pela esplanada e retornando ao interior no outro nível.



Figura 58: Vista externa do Museu nacional. Foto do Autor

Internamente, a arquitetura do museu também impressiona. O nível do salão de exposições está localizado sobre uma grande laje totalmente livre e com um pé-direito monumental. O teto da cúpula é um grande “céu de concreto” para esse espaço que ainda abriga o mezanino em formato orgânico, cheio de curvas, para o qual se tem acesso por uma grande rampa, pela rampa externa e por elevadores. Esse mezanino está totalmente suspenso pelos tirantes na estrutura da própria cúpula, e por isso mantém o espaço do salão totalmente livre, sem pilares.

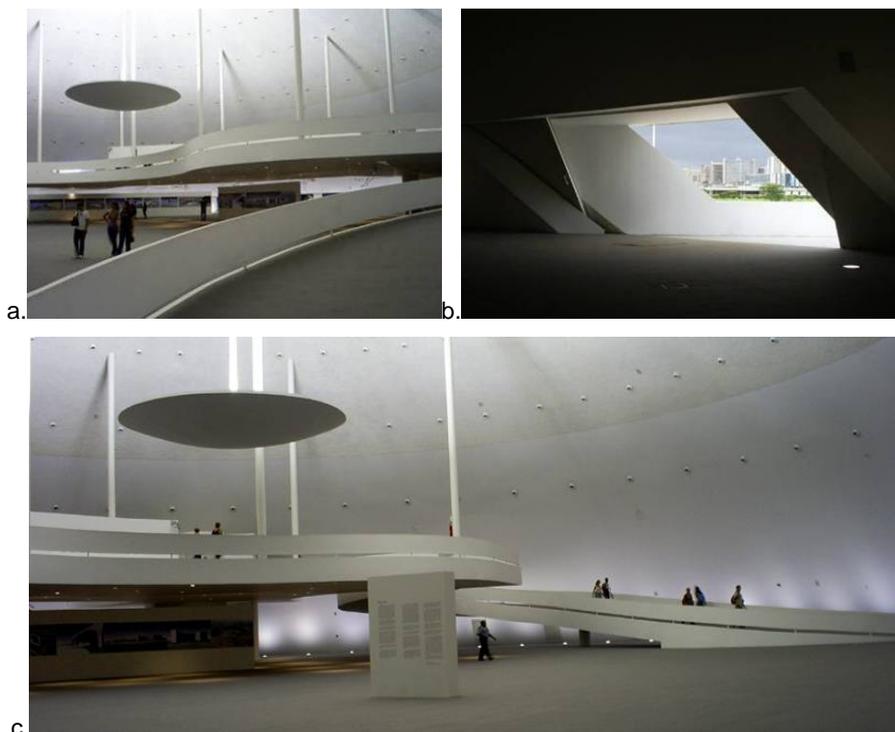


Figura 59: Vistas Internas do Museu Nacional. Fonte: Skyscrapercity

A forma plástica da arquitetura do Museu Nacional resulta de um sistema estrutural conhecido como cúpula. Nesse caso o arquiteto usou esse sistema de forma bem evidente, e ainda reforçou a estrutura da cúpula para nela “pendurar” o mezanino e a rampa externa.

Apesar do desempenho da cúpula ser ideal apenas para cargas distribuídas uniformemente, Oscar Niemeyer aplicou, no último piso, um mezanino apoiado em tirantes fixados nos arcos da cobertura. Esta decisão gerou esforços pontuais bem definidos no conjunto, o que, por sua vez, geraram esforços de flexão na estrutura.

Nesse caso, como a cúpula não apresenta somente esforços de compressão, os esforços de flexão geram grandes esforços horizontais nos apoios causando uma tendência da cúpula aumentar de tamanho na base. Essa tendência gera um efeito chamado de “Perturbação de Borda” (REBELLO, 2000). A perturbação de borda é o aparecimento de momento fletor na borda da cúpula, indicado por uma brusca mudança na curvatura, já que não há possibilidade de deslocamentos na base do arco.

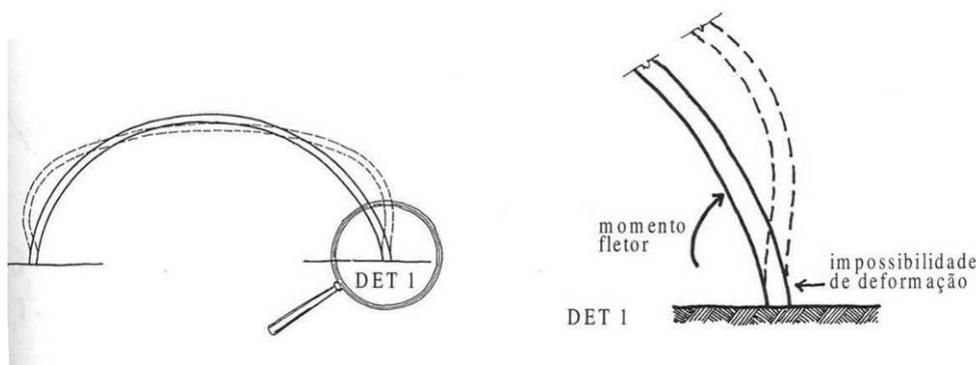


Figura 60: Perturbação de Borda. Fonte: REBELLO, 2000

Para combater esse fenômeno, José Carlos Sussekind se valeu de duas soluções. Primeiro, como pode ser notado na foto da figura 61a, ele utilizou um grande anel de compressão na base da cúpula e, além disso, também aumentou a espessura da cúpula junto ao apoio, usando inclusive uma parede dupla nessa região (Figura 61b).

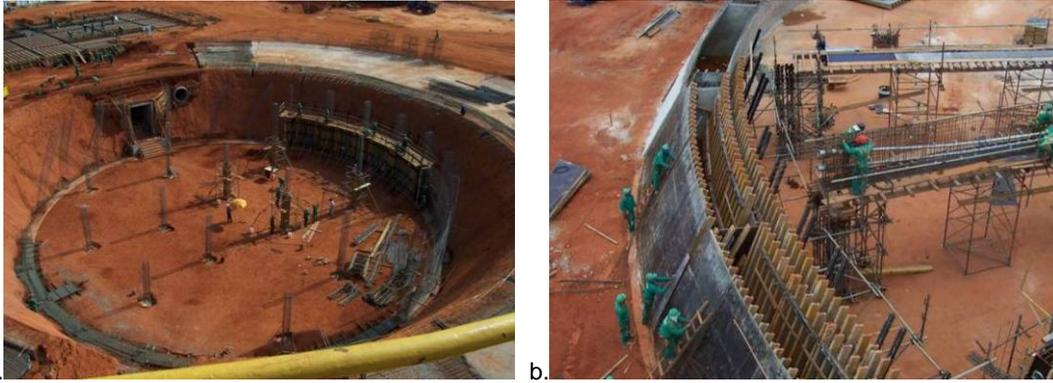


Figura 61: a.Execução das Fundações e do Anel de Compressão na base da cúpula. b. Execução da base da cúpula – parede dupla.Fonte: VIA Engenharia.

Outro grande desafio para o engenheiro José Carlos Sussekind foi a grande laje do pavimento de exposições, pois esta laje de 80 metros de diâmetro não possui nenhum apoio central, deixando livre todo o diâmetro do meridiano. Isto permitiu total liberdade para a instalação dos auditórios no pavimento inferior. Esse desafio apareceu no momento em que o arquiteto Oscar Niemeyer resolveu dobrar o tamanho da cúpula, dobrando também o tamanho da laje.

Este grande vão foi possível graças ao conjunto de vigas radiais que, nas extremidades se apóiam nos arcos da cúpula e, no centro, comprimem um maciço de concreto suspenso.



Figura 62: Escoramento das Vigas Radiais. Fonte: VIA Engenharia.



Figura 63: Vigas Radiais concretadas. Fonte: VIA Engenharia.



Figura 64: Laje do pavimento de exposições concretada. Fonte: VIA Engenharia.

Acima desse nível está o mezanino, sustentado pelos tirantes na estrutura da própria cúpula. A laje desse mezanino possui uma forma orgânica, cheia de curvas e totalmente livre de pilares. A planta de formas do mezanino mostra o desenho das vigas, também sinuosas nessa laje, que permitiram a sustentação da forma curva desejada pelo arquiteto (Figura 65).

Na seqüência (Figura 66) o corte mostra os tirantes que sustentam a laje do mezanino e o ponto de contato deles na estrutura da cúpula. Essa estrutura teve que ser reforçada nesses pontos, como se vê no detalhe (Figura 67).

Para o engenheiro José Carlos Sussekind essa solução estrutural, encontrada ainda quando o projeto previa um segundo mezanino para o restaurante, foi um dos pontos mais importantes do projeto, pois pode evidenciar o grande plano livre do salão de exposições.

Conversamos e chegamos a uma ótima solução, que acho útil registrar: vamos usar e reforçar a cúpula para, também, suportar as lajes do mezanino, do restaurante e do mirante, suspendendo-as (até a cúpula) por intermédio de tirantes. Com isso o nível principal (térreo) das exposições exibirá um quase inacreditável diâmetro livre de 80 metros, assim criando um espaço cuja

amplitude espantará os visitantes.(José Carlos Sussekind, em Conversa de Amigos, SUSSEKIND, J. Carlos e NIEMEYER, Oscar, Ed. Revan, 2001, p.73)

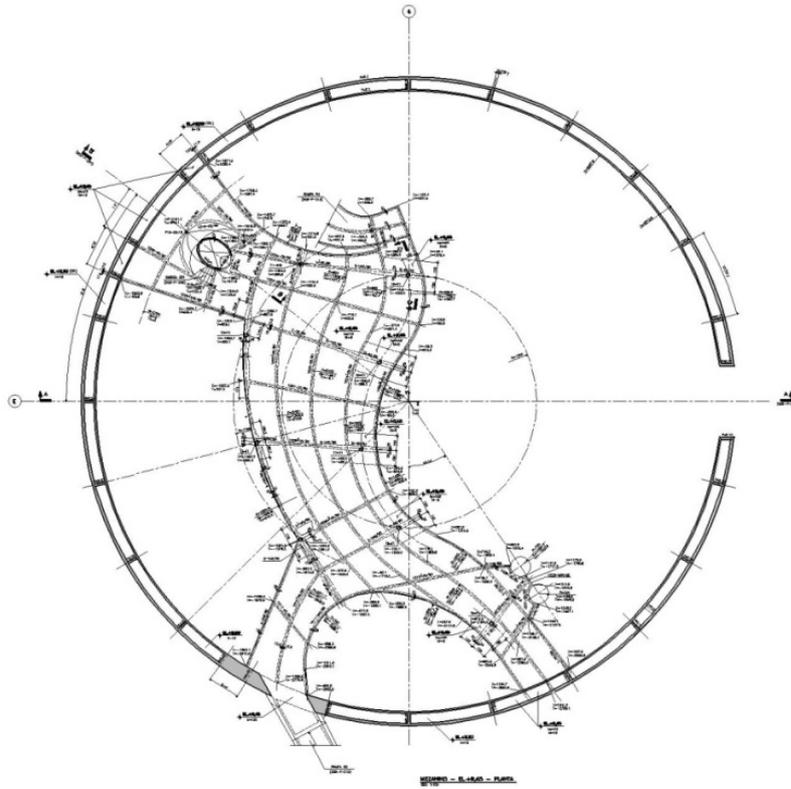


Figura 65: Planta de Formas do Mezanino. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

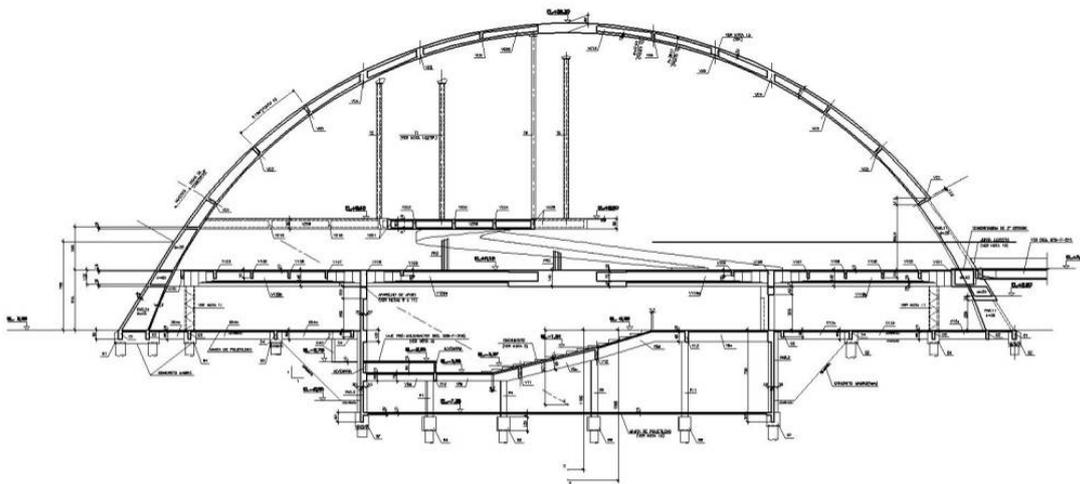


Figura 66: Corte Longitudinal. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

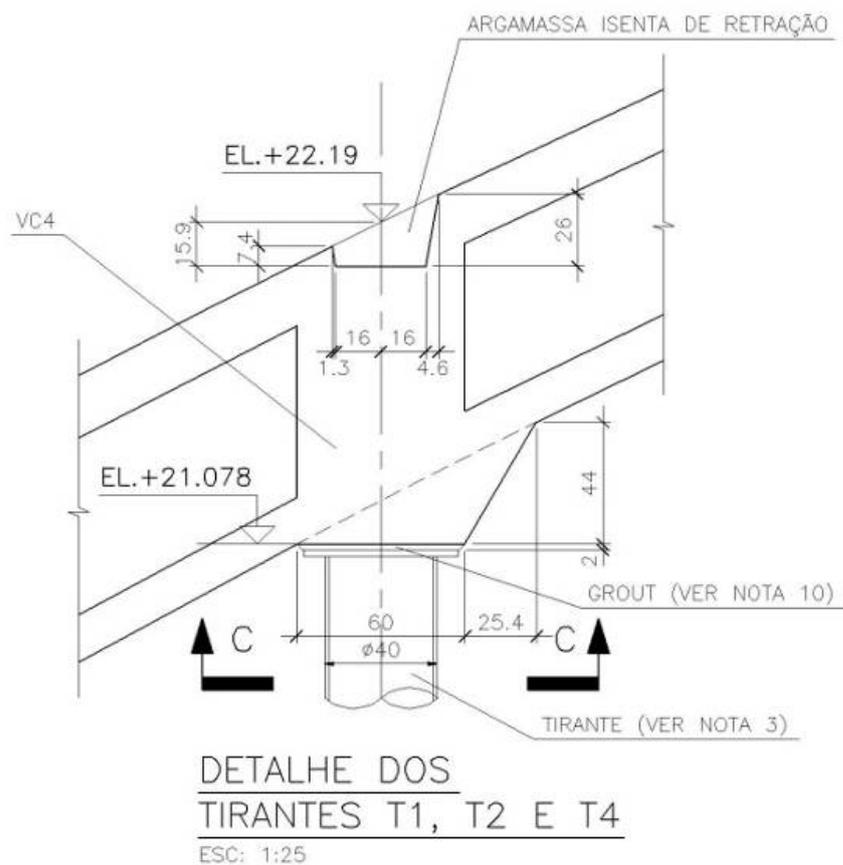


Figura 67: Detalhes dos Tirantes. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

Outro elemento que chama atenção na arquitetura do museu é a rampa externa, que une o piso principal do salão de exposições com o mezanino. Essa rampa tem um balanço de quase 20 metros que também necessitou de atenção especial do calculista, que achava ser esse seu único desafio estrutural no projeto, isso antes do projeto ser modificado, quando este ainda previa uma cúpula de “apenas” 40 metros, com lajes de, no máximo, 40 metros de vão (SUSSEKIND, 2002).

Essa rampa, que sai da cúpula em curva, retornando a mesma no andar superior, não possui nenhum apoio a não ser a própria parede da cúpula, no início e no final da rampa. Ela se sustenta longitudinalmente com duas vigas de borda que variam de 1,25m a 1,85m de altura, dos quais 0,85m já servem como guarda corpo. Transversalmente ela se apóia em uma seqüência de 11 vigas dispostas de forma radial ao longo do comprimento da rampa (Figuras 69 e 70).

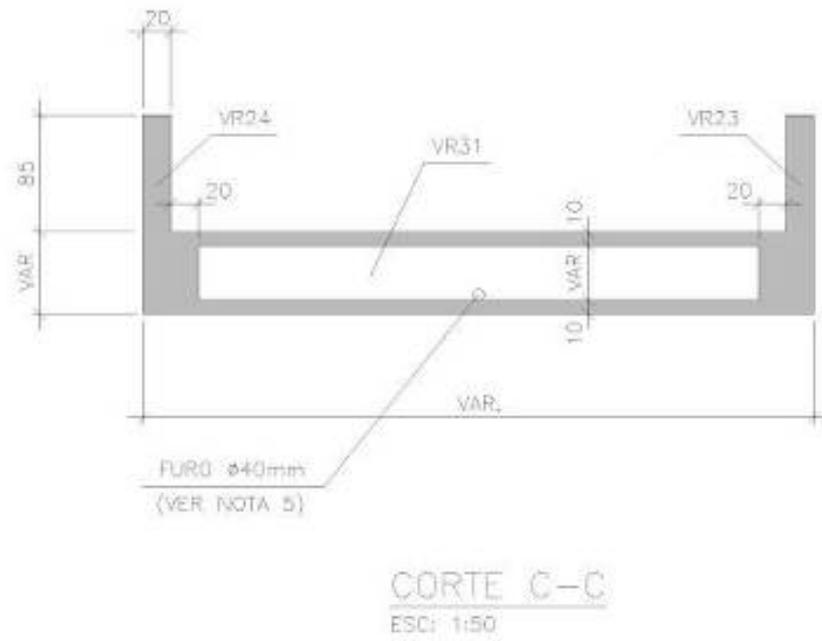


Figura 70: Corte da Rampa 3. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.



Figura 71: Concretagem da Rampa 3. Fonte: VIA Engenharia.

3. OS CALCULISTAS DE NIEMEYER

Oscar Niemeyer foi responsável por alguns dos mais ousados projetos de arquitetura, no que se refere ao grau de dificuldade técnica para o cálculo estrutural, basta observar as formas da Catedral de Brasília, ou da cúpula invertida do Congresso Nacional. Este capítulo tem como objetivo apresentar os importantes engenheiros, que tiveram grande influência na Carrera de Niemeyer e foram responsáveis pelos cálculos das suas principais obras.

Em “Minha Arquitetura”, Niemeyer faz referência a esses grandes engenheiros ao dizer – “A preocupação que sempre mantive em relação às estruturas é compreendida pelos técnicos do concreto armado com que até hoje trabalhei” (NIEMEYER, 2000).

Em diversas publicações sobre sua arquitetura, não raro Oscar Niemeyer cita com muito respeito e admiração seus parceiros e colaboradores calculistas, e entre eles Niemeyer destaca quatro engenheiros – Emílio Baumgart, Joaquim Cardozo, Bruno Contarini e José Carlos Sussekind .

A primeira influência de Oscar Niemeyer na engenharia estrutural, Emílio Baumgart foi um pioneiro do concreto armado no Brasil e no mundo. Considerado como o “pai do concreto armado no Brasil” (VASCONCELOS, 1992, pág. 196), foi responsável pelo cálculo estrutural, entre outros, no projeto do Edifício do Ministério de Educação e Saúde, no Rio de Janeiro em 1936, primeiro grande projeto com a participação de Oscar Niemeyer.

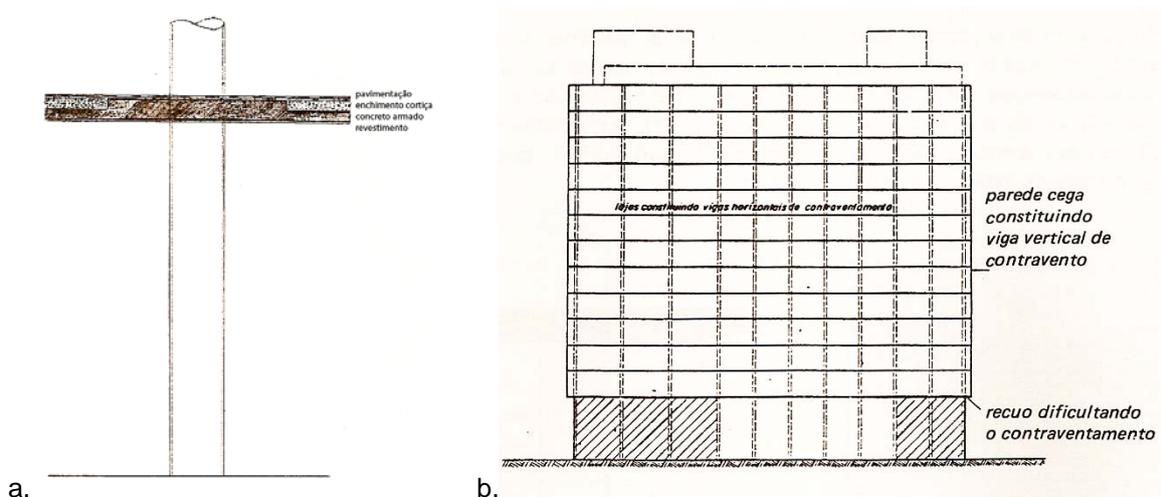


Figura 72: a. Sistema estrutural da laje “cogumelo tipo Baumgat”; b. Funcionamento do sistema estrutural de contraventamento desenvolvido por Baumgart para o edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro. Fonte: VASCONCELOS, 1992 (Volume I), págs 29 e 30.

No projeto do Ministério de Educação e Saúde, Emílio Baumgart precisou inovar no uso das técnicas existentes do uso do concreto armado para manter as novas idéias modernistas propostas por Le Corbusier para o projeto. Entre essas inovações está a utilização da laje “cogumelo”, mas de uma forma diferente, mantendo o teto liso exigido pela equipe de arquitetos e as soluções de contraventamento do edifício, hoje muito difundida, mas que na época se tratava de uma novidade (VASCONCELOS, 1992).

Emílio Baumgart se formou engenheiro em 1919 pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro, mas antes mesmo de se formar já trabalhava, desde 1912, na Companhia Construtora de Cimento Armado, do alemão Lambert Riedlinger que, ao trazer ao Brasil os conhecimentos tecnológicos da época sobre o concreto armado, proporcionou a Baumgart a oportunidade de aprender mais sobre o assunto do que seus colegas de faculdade. Ainda como estudante já foi responsável por importantes obras de engenharia, como sua primeira grande obra, a Ponte Maurício de Nassau em Recife, Pernambuco, com 180 metros de comprimento.

Além da ponte Maurício de Nassau, a maior da época em concreto armado, Baumgart projetou várias estruturas para a empresa de Riedlinger, como o Hotel Glória e o Copacabana Palace, no Rio de Janeiro. Com a falência da empresa alemã, Wayss & Freytag, que tomou conta da construtora de Riedlinger em 1923, pouca documentação existe sobre esse importante período da engenharia brasileira. (VASCONCELOS, 1992).

Após se formar, Emílio Baumgart tentou formar sua própria construtora, para vencer os preconceitos ainda existentes na época com o concreto armado. Como não era um bom administrador, sua empresa faliu após dois anos de atividades. A partir daí Baumgart se dedicou somente ao cálculo, fundando em 1925 o primeiro escritório especializado em cálculo estrutural no Brasil (VASCONCELOS, 1992). Esse escritório se tornou uma verdadeira escola prática de cálculo de concreto armado, onde vários engenheiros brasileiros e estrangeiros, que posteriormente se tornaram grandes nomes da engenharia, aprenderam com Baumgart a lidar com essa tecnologia.

Baumgart foi autor de projetos de grande importância para a engenharia brasileira. Como o edifício A Noite, no Rio de Janeiro, que, com seus 24 andares foi o mais alto da época em estrutura de concreto armado. E a ponte sobre o rio do Peixe, em Santa Catarina, que foi a primeira a ser construída utilizando a técnica dos balanços sucessivos (THOMAZ, s.d.).



Figura 73: Ponte sobre o Rio do Peixe, Santa Catarina, 1930. Fonte: (THOMAZ, s.d.)

Bruno Contarini, outro grande nome da engenharia brasileira com grande destaque no exterior, foi responsável por diversas obras da fase internacional de Niemeyer, como a sede da editora Mondadori em Milão na Itália em 1968 e a Universidade de Constantine, na Argélia em 1969.

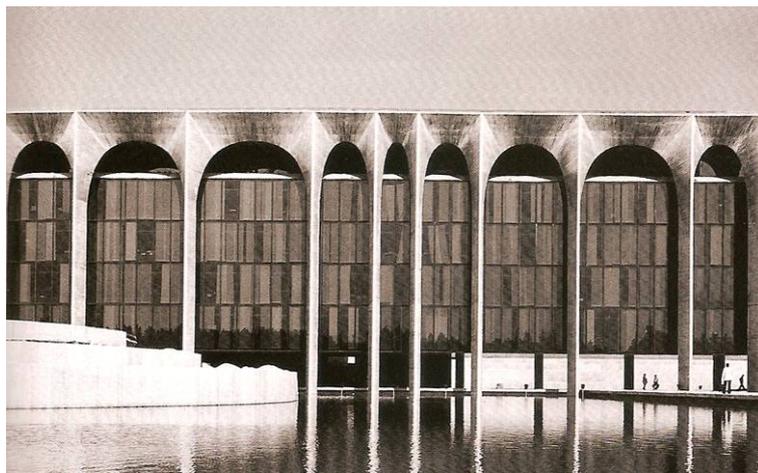


Figura 74: Sede da Editora Mondadori em Milão, Itália. Fonte: UNDERWOOD, 2002, pag. 111.

Contarini nasceu no Rio de Janeiro em 1933, e se formou na Escola Nacional de Engenharia da Universidade do Brasil, em sua cidade natal, além de se especializar com os cursos de Arquitetura e de Pontes e Grandes Estruturas e Portos de Mar, Rios e Canais (VASCONCELOS, 1992).

Em 1966, dez anos depois de formado, com uma vasta experiência adquirida no campo e diversos projetos importantes no currículo, Contarini foi convidado a lecionar o curso de Concreto Protendido na PUC do Rio de Janeiro, dedicando grande parte de sua vida à carreira acadêmica.

Em 1967 Contarini assume o cargo de chefe do Centro de Estudos e Projetos na Construtora Rabello S.A., e dois anos depois é enviado à Argélia onde é responsável por uma série de projetos estruturais de importantes obras do arquiteto Oscar Niemeyer (VASCONCELOS, 1992).

Entre as obras calculadas por Bruno Contarini no Brasil destacam-se: o Instituto Central de Ciências – ICC, da Universidade de Brasília em 1962, o superior Tribunal de Justiça, em Brasília em 1989 e o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói de 1996, eleito uma das sete novas maravilhas da arquitetura pela revista “Conde Nast Traveller” (LOTURCO, 2006). Destaca-se ainda, de 1970 a 1974, a participação de Contarini, como Diretor Técnico responsável pela construção da Ponte Presidente Costa e Silva, a Rio-Niterói, considerada a maior ponte em concreto protendido do hemisfério sul, com 13,3 quilômetros de extensão e com altura máxima no vão central de 72 metros.

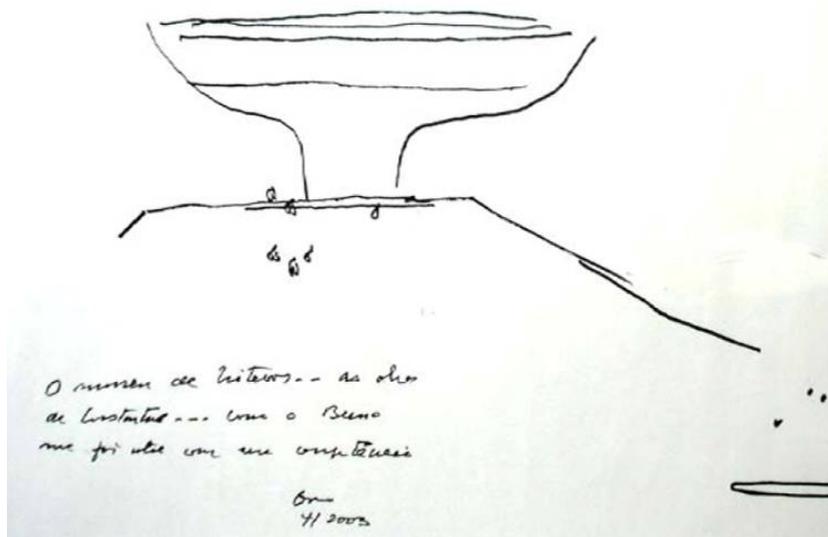


Figura 75: Croqui de Niemeyer para o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói, no texto, uma alusão à contribuição de Bruno Contarini. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

Outro engenheiro citado por Niemeyer é José Carlos Sussekind, nascido no Rio de Janeiro em 1947, se formou em engenharia estrutural pela PUC do Rio de Janeiro em 1969. No ano seguinte, na mesma escola graduou-se mestre em estruturas e fundações.

Sussekind iniciou sua carreira de calculista ao lado de Oscar Niemeyer e nas últimas décadas foi responsável pelo cálculo estrutural de suas obras, entre elas o Museu Oscar Niemeyer em Curitiba, 2002 e, mais recentemente o Museu Nacional em Brasília, 2007.

O início da parceria de Sussekind com Oscar Niemeyer é marcada por um fato interessante. Ainda estagiário da construtora Rabello, chefiada por Bruno Contarini, responsável pelos projetos estruturais do arquiteto na época, Sussekind foi enviado, por

falta de engenheiros disponíveis na empresa, ao escritório do arquiteto. Nessa visita, Sussekind não soube responder de imediato as dúvidas de Niemeyer e solicitou um dia para estudar o assunto.

Como Niemeyer não gostava de esperar por respostas técnicas, para não atrapalhar seu processo criativo, os engenheiros da empresa ligaram para Niemeyer em resposta ao acontecido, porém o arquiteto respondeu: “manda o menino vir amanhã, que o menino ficou de estudar” (SUSSEKIND, em depoimento gravado para O Globo Online em 30 de agosto de 2006).

Desse episódio surgiu não só uma grande oportunidade profissional, mas também uma grande amizade. Sussekind passou a ser responsável pelo cálculo estrutural de todas as obras de Niemeyer, além de visitar a casa do arquiteto freqüentemente, não só pra falar de arquitetura e de projetos, mas para conversar “sobre coisas da vida” (SUSSEKIND *appud* LOTURCO, 2007).

Com essa parceria Sussekind tem desafiado os limites do concreto armado nos últimos 30 anos. Recentemente, no projeto do Palácio Tiradentes, parte do conjunto da Cidade Administrativa Tancredo Neves em Belo Horizonte, também de autoria de Oscar Niemeyer, Sussekind utiliza a mais alta tecnologia do concreto protendido para viabilizar mais um arrojado desafio estrutural proposto pelo arquiteto, uma caixa de 147 metros suspensa por tirantes, o maior prédio suspenso do mundo (KISS, 2010).



Figura 76: Palácio Tiradentes, em Belo Horizonte – MG. Fonte: Revista Techne, nº 154. Janeiro de 2010.

Entre os engenheiros e calculistas que trabalharam com Oscar Niemeyer, destacamos Joaquim Cardozo, engenheiro responsável pelo cálculo estrutural da Igreja Nossa Senhora de Fátima e do Palácio do Congresso Nacional, obras de Oscar Niemeyer que são os estudos de caso desse trabalho.

3.1. Joaquim Cardozo



Figura 77: Joaquim Cardozo “O Engenheiro da Poesia” – Desenho de Carlos Scliar, 1961. Fonte: Site oficial de Joaquim Cardozo, Rede de Idéias.

Joaquim Cardozo foi um homem muito culto, segundo Oscar Niemeyer, o homem mais culto que já conheceu (NIEMEYER, 2000). Foi poeta, escritor, engenheiro, caricaturista, topógrafo, professor, teórico de arquitetura e calculista de estruturas. Estas são as várias facetas de Joaquim Cardozo, homem de suma importância para a viabilização de várias obras do arquiteto Oscar Niemeyer desde 1941, com o projeto do Conjunto da Pampulha em Belo Horizonte, considerado um marco na Arquitetura Modernista Brasileira. Participou também do projeto dos principais palácios e edifícios monumentais de Brasília, como os Palácios da Alvorada, do Planalto, a Catedral e o Congresso Nacional.

Conhecido como o Engenheiro da Poesia, Joaquim Cardozo é considerado um dos pioneiros do movimento moderno da arquitetura brasileira por integrar, sob a chefia do arquiteto Luis Nunes a equipe da Diretoria de Arquitetura e Urbanismo (DAU) em Pernambuco de 1934 a 1937, uma das primeiras iniciativas organizadas de difusão do movimento modernista na Arquitetura e construção (SANTANA 1998).

Nascido em 26 de agosto de 1897, em Recife, Pernambuco, desde muito cedo demonstrou interesse nas diversas áreas do conhecimento que marcariam sua vida no

futuro, aos 16 anos aparece entre os redatores do jornal “O Arrabalde” e no ano seguinte torna-se caricaturista de charges políticas do Diário de Pernambuco (SANTANA, 1998).

Em 1915, ingressa na Escola Livre de Engenharia de Pernambuco, curso que interrompeu em 1919 para servir o exército e só seria retomado em 1927, para completá-lo quinze anos depois, em 1930, conforme aponta Maria da Paz Ribeiro Dantas na biografia do engenheiro (DANTAS, 2004).

Durante esse período Cardozo realiza diversos trabalhos como topógrafo da Comissão Geodésica de Pernambuco e participa ativamente dos movimentos modernistas da Semana de Arte Moderna, quando se envolveu em um ciclo de amizades do meio jornalístico, artístico e intelectual, chegando a dirigir a Revista do Norte, na qual divulga suas qualidades como poeta, artista gráfico, crítico literário e de artes plásticas.

A carreira de engenheiro calculista de Joaquim Cardozo pode ser dividida em três momentos, os dois primeiros destacados por ele mesmo em artigo publicado na revista Módulo em 1965, “Dois episódios na História da arquitetura moderna brasileira” (CARDOZO, 1965).

O primeiro episódio é o movimento encabeçado pelo arquiteto Luis Nunes em Recife entre 1934 e 1937. Nessa mesma época é construído o Edifício Gustavo Capanema, então sede do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro. Projeto da equipe liderada por Lúcio Costa, que contava com Oscar Niemeyer, ainda no começo de sua carreira como arquiteto, além dos arquitetos Carlos Leão, Affonso Eduardo Reidy, Ernani Vasconcellos e Jorge Machado Moreira e com consultoria de Le Corbusier, se tornou o marco de partida da arquitetura moderna brasileira (Cardozo, 1965).

Luis Nunes, arquiteto formado na Escola de Belas Artes do Rio de Janeiro, na qual, com fortes influências de Lúcio Costa, tornou-se “um dos mais ardorosos partidários do novo estilo” (CARDOZO, 1965) e em 1934 leva toda essa influência para Recife, onde com apoio político consegue fundar a DAC, Diretoria de Arquitetura e Construção, que durante um ano foi responsável por projetar, construir e fiscalizar todas as obras públicas do estado de Pernambuco. Faziam também parte dessa equipe o paisagista Roberto Burle Marx, além de outros arquitetos, engenheiros e estudantes (SANTANA, 1998). Mais tarde essa diretoria sofreu algumas mudanças e sua responsabilidade foi ampliada, tornando-se Diretoria de Arquitetura e Urbanismo (DAU).

Em outubro de 1935, a DAU, por meio do projeto de Luis Nunes, foi responsável pelo Pavilhão de Pernambuco na exposição comemorativa da Revolução Farroupilha em Porto Alegre. Lá foram expostos todos os projetos e obras desenvolvidos nessa fase, sendo que essa exposição é considerada a primeira exposição de Arquitetura Moderna no Brasil (DANTAS, 2004).

Entre esses projetos se destacam: Pavilhão Luiz Nunes de 1937 (antigo Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE) – (Figura 80), a Caixa D'água de Olinda de 1937 (Figura 78), a Escola Rural Alberto Torres, construída em 1935 e 36 (Figura 81).



Figura 78: Caixa d'Água e Igreja da Sé em Olinda - PE, em foto de G. E. Kidder Smith para "The Architectural Review", março de 1944. Fonte: Portal Vitruvius - Arquitectos 072, maio de 2006.



Figura 79: Laboratório de Anatomia Patológica em Recife, projeto do Arq. Luis Nunes, 1936 foto de G. E. Kidder Smith para a exposição "Brazil Builds" em Nova York – 1943. Fonte: Portal Vitruvius - Arquitectos 072, maio de 2006.



Figura 80: Croqui do Pavilhão Luiz Nunes (Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE). Fonte: Croquis de Arquitetura.



Figura 81: Rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arquiteto Luiz Nunes, construído em 1935-36. Fonte: Ângelo Rigon.

Para Cardozo, os edifícios construídos por essa Diretoria entre 1935 e 1937, ano em que o Golpe de Estado de 10 de Novembro praticamente encerrou suas atividades, apresenta uma “generalização de idéia de ordem e de unidade” que caracterizam o movimento moderno na arquitetura, cuja “força e capacidade de execução” representam uma linguagem brasileira (CARDOZO, 1965).

O segundo momento, também destacado pelo próprio engenheiro em seu artigo de 1965, é o “Episódio da Pampulha”, e começa com a mudança de Joaquim Cardozo para o Rio de Janeiro, depois de um discurso proferido como paraninfo da turma de formandos de 1939 do curso de Engenharia da Escola de Belas Artes Cardozo, em que faz críticas ao “Estado Novo” e é demitido, mudando-se então para a então capital do país onde passa a fazer parte do SPHAN – Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, ao lado de Rodrigo de Mello Franco, Lúcio Costa, Roberto Burle Marx e Oscar Niemeyer, com quem desenvolve uma importante amizade.

Niemeyer convida Joaquim Cardozo para fazer o cálculo estrutural dos edifícios do projeto do Conjunto da Pampulha, construído às margens deste lago em Belo Horizonte a pedido de Juscelino Kubitschek, então prefeito da cidade.

O conjunto é formado pelo Cassino, a Casa de Baile, o late Clube e a Igreja de São Francisco; havia também o projeto de um hotel, que não foi construído. Esse projeto ocorreu no período entre 1941 e 1945 e teve a participação decisiva de Joaquim Cardozo que, integrado ao projeto desde o início por Niemeyer, acompanhou com sensibilidade o arrojo estrutural das novas formas propostas pelo arquiteto, criando novos detalhes construtivos para dar vida às formas livres, tão diferentes da rigidez que se via na época (SANTANA, 1998).

Uma das características desse projeto que o torna mais um marco na história da arquitetura moderna brasileira e na carreira de Joaquim Cardozo e Oscar Niemeyer é o fato de sua forma ser totalmente fiel à estrutura que a suporta, “a realidade do equilíbrio é perfeitamente sensível, compreensível pelo menos, impondo-se sem qualquer efeito ilusório ou misterioso a relação entre carga e suporte.” (CARDOZO, 1955 *appud* SANTANA, 1998). Na arquitetura que surgia, amparada no talento inventivo de Joaquim Cardozo, Niemeyer pode explorar sua criatividade e criar formas puras, livres, onde a estrutura já exhibe a arquitetura, sem a necessidade e os excessos dos elementos decorativos, sendo que a beleza surge do equilíbrio estrutural da forma.



Figura 82: Fundos da Igreja São Francisco de Assis - Paineis de Portinari 1945-55 (Conjunto da Pampulha).

Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.



Figura 83: Antigo cassino, 1950, atual Museu de Arte da Pampulha (Conjunto da Pampulha). Foto de Câncio de Oliveira (Museu Histórico Abílio Barreto).Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.



Figura 84: Casa do Baile. 1943-48 (Conjunto da Pampulha). Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.

Assim como no primeiro período, este também foi marcado e documentado com uma importante exposição, desta vez com a “Brazil Builds”, no Museu de Arte Moderna de Nova York em 1943, onde foram expostas fotos de G. E. Kidder Smith de edifícios de São Paulo, Rio de Janeiro, Recife e os da Pampulha, boa parte deles calculados por Joaquim Cardozo.

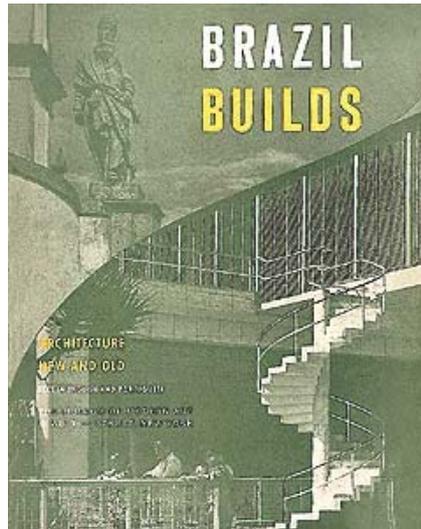


Figura 85: Capa do Catálogo da Exposição “Brazil Buids”, Museu de Arte Moderna de Nova York em 1943. Organizado por Phillip Goodwin e G. E. Kidder Smith. Fonte: Revista Projeto Design, Ed. 301 - Março de 2005.

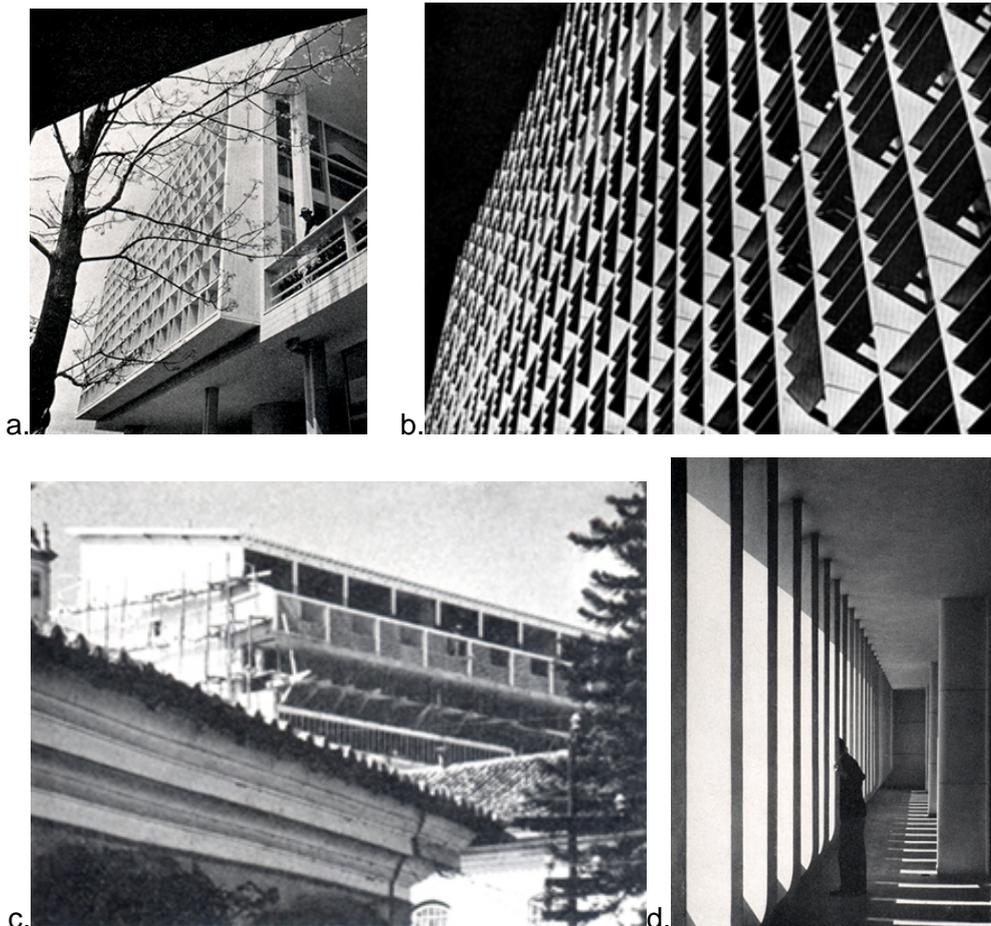


Figura 86: a. Pavilhão Brasileiro em Nova Iorque, Lúcio Costa e Oscar Niemeyer, 1937; b. Brise-soleil do Ministério da Educação e Saúde, Lúcio Costa e equipe, 1936-42; c. Grande Hotel de Ouro Preto, Oscar Niemeyer, 1940; d. Associação Brasileira de Imprensa, Irmãos Roberto, 1936. Fotos de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York - 1943. Fonte: Portal Vitruvius - Arqutextos 072, maio de 2006.

O terceiro momento, em que a carreira de Joaquim Cardozo se mistura com a história da Arquitetura Moderna Brasileira, é o período entre 1956 e 1964, época da construção de Brasília, quando Cardozo é integrado à equipe da Novacap por Niemeyer como diretor da Seção de Cálculo Estrutural e é o responsável pelos projetos estruturais dos principais edifícios da nova capital nacional.

Brasília foi construída em três anos e meio, de Novembro de 1956, quando foram iniciadas as fundações para o Brasília Palace Hotel e para o Palácio da Alvorada, a 21 de Abril de 1960, data de sua inauguração (CARDOZO, s.d.) Isso se deve graças ao talento, criatividade e ousadia de três grandes nomes da Arquitetura Brasileira: Lúcio Costa, Oscar Niemeyer e, apesar de não receber tantos méritos quanto seus colegas, Joaquim Cardozo (GALLINDO, 2004).



Figura 87: Foto da Construção do Congresso Nacional. Fonte: Arquivo Público do DF



Figura 88: Foto da Construção do Congresso Nacional e Esplanada dos Ministérios. Fonte: Arquivo Público do DF.



Figura 89: Foto da Construção da Cúpula do Senado. Fonte: Arquivo Público do DF



Figura 90: Três momentos na Construção de Brasília: a. Cúpula da Câmara dos Deputados, 1958; b. Catedral de Brasília, 1959; c. Museu Histórico e Brasília, 1960. Fonte: Arquivo Público do DF.

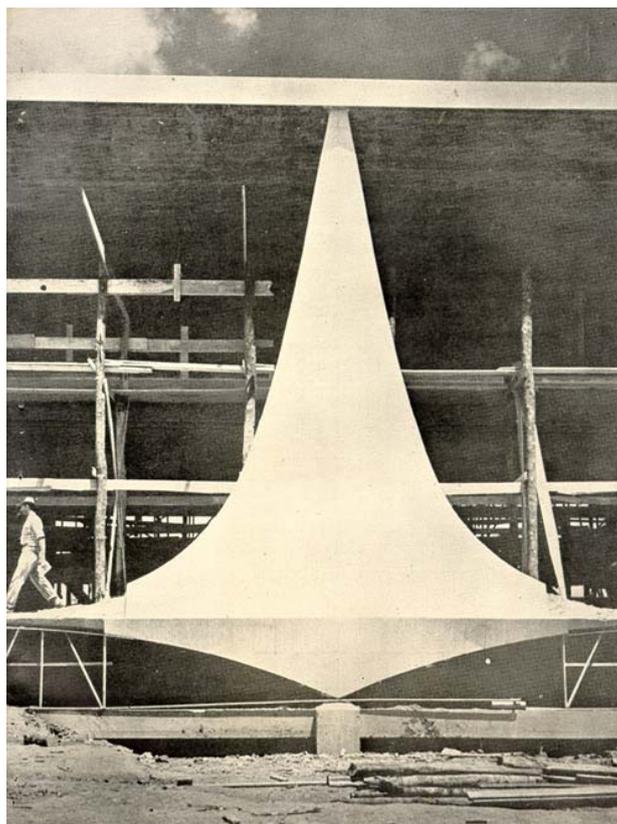


Figura 91: Detalhe da Construção de uma das colunas do Palácio da Alvorada. Foto reproduzido da Revista Brasília, janeiro de 1958. Fonte: CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.

Esse período na carreira do engenheiro é marcado pelos maiores desafios estruturais, como nos projetos da Catedral de Brasília e da Cúpula da Câmara dos Deputados, que além de cálculos extremamente complexos e sem referências na arquitetura vigente tinham prazos mínimos para serem resolvidos, sendo necessárias investigações imediatas e as vezes até antecipadas (SANTANA, 1998).

Os projetos de Brasília trouxeram desafios e exigiram que Joaquim Cardozo trabalhasse, quase que ao mesmo tempo, com problemas e soluções estruturais inovadoras. Como os “verdadeiros arcobotantes, não mais como abóbodas, mas escorando-se entre si” da Catedral, ou “uma casca limitada pela superfície de uma zona de elipsóide de revolução, abaixo do equador” da cúpula da Câmara dos Deputados” (CARDOZO, s.d.). Já nos outros palácios, os desafios eram os reduzidos pontos de apoio das colunas e a esbeltez dos perfis e das grandes e finas lajes desenhadas por Niemeyer.

Nesse período, Cardozo também contribuiu para a arquitetura e engenharia brasileiras no campo acadêmico, como crítico e teórico de arquitetura com a publicação de diversos artigos e por proferir várias palestras no meio universitário.

O fim da carreira do engenheiro é marcado por uma tragédia que abalaria seu estado físico e emocional, o desabamento do Pavilhão da Gameleira em Belo Horizonte, que causou a morte de 68 operários. O projeto de Oscar Niemeyer foi calculado em seu escritório em 1971.

Em um inquérito marcado por interesses econômicos e políticos e graves acusações, Cardozo chegou a ser condenado em 1974 a dois anos e dez meses de prisão, responsabilizado pela tragédia, mas foi absolvido posteriormente pelo Tribunal de Alçada de Minas Gerais (SANTANA, 1998).

Sem condições psicológicas para exercer sua profissão, Joaquim Cardozo encerrou suas atividades em 1972, aos 75 anos. Nos últimos anos de vida, vivendo em Recife, sua terra natal, ainda recebeu diversas homenagens, como a sua eleição como Sócio Benemérito do IAB e o Prêmio August Perret. Doou sua biblioteca particular à Universidade Federal de Pernambuco.

Passou ainda um período no Rio de Janeiro ao lado do amigo Oscar Niemeyer, que o levou para o Rio e o hospedou em um hotel, depois em uma clínica, para que pudesse freqüentar o escritório do arquiteto diariamente (NIEMEYER, 2002). Em quatro de Novembro de 1978, aos 81 veio a falecer em uma clínica em Olinda – PE.

Joaquim Cardozo é responsável por uma verdadeira revolução técnica na engenharia brasileira, estimulado e inspirado pelos projetos de grandes arquitetos com quem trabalhou durante toda sua carreira, como antecipa, muito antes de se consagrar como o engenheiro de Brasília, em 1939, durante uma aula de Teoria e Filosofia da Arquitetura na Escola de Belas Artes de Pernambuco:

(...) tive a oportunidade de colaborar com arquitetos que não somente mostraram nos seus projetos o mais perfeito conhecimento de adaptação dos materiais plásticos modernos ao caso brasileiro, como ainda chegaram a inculir nos mesmos um caráter bem pernambucano (...) conseguindo ao mesmo tempo os melhores efeitos plásticos do concreto armado (...) (Cardozo, citado em "Joaquim Cardozo 1897 – 1078 – O Engenheiro da Poesia". SANTANA, Geraldo - 1998)

4. ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso escolhidos para esse trabalho são: a Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, de 1957 e a Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados de 1958, ambos em Brasília. Nos dois casos foram levantadas as principais referências bibliográficas que permitissem expor as principais características dos edifícios e do período em que eles foram projetados e construídos.

Juntamente com essa bibliografia foram buscadas fontes primárias, projetos originais em acervos da própria instituição, no caso da Câmara dos Deputados e do IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, no caso da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.

Os dois estudos seguiram uma mesma organização de análise onde cada obra é explorada em quatro partes.

Na primeira parte – Histórico – é feita uma exposição que situa a obra no contexto histórico, levantando as condições e razões para que elas fossem desenvolvidas naquele período. Essa primeira parte também conta como se desenvolveram os projetos de cada obra e como se enquadra o projeto estrutural no contexto.

Na segunda parte – Arquitetura – é descrita a arquitetura do edifício em questão, baseando-se nos projetos originais, nos quais podemos observar as soluções plásticas e formais que Oscar Niemeyer criou para responder às necessidades do programa proposto.

Já na terceira parte – Sistema Estrutural – avaliam-se as soluções técnicas do sistema estrutural. Nessa parte são expostos os aspectos construtivos que tem influência direta no resultado arquitetônico da obra.

Na última fase – Análise Estrutural – os sistemas estruturais são descritos e pré-dimensionados tomando como referência dados coletados nos projetos originais de cada obra.

Em seguida esses dados são tabulados para que possam ser utilizados no programa SAP 2000, programa de cálculo estrutural. Uma vez de posse desses dados de maneira organizada é possível se fazer análises qualitativas no sistema estrutural em questão.

Assim inicia-se primeiramente uma análise simplificada dos principais elementos da estrutura, comparando com outras possíveis situações do sistema estrutural, para evidenciar a função de cada elemento no conjunto estrutural. Essa metodologia nos

permite analisar o método projetual e a racionalidade estrutural adotada pelo arquiteto e pelo calculista naquele projeto.

Posteriormente é modelado o sistema estrutural completo, em três dimensões, da obra analisada. Utilizando o mesmo programa, SAP 2000, são coletados dados de forças normais atuantes na estrutura, momentos fletores e deformações sofridas pela estrutura.

Para a obtenção dos esforços e deslocamentos das estruturas foram considerados como carregamento somente o peso próprio de cada estrutura de concreto, sendo essas informações suficientes para as análises qualitativas, já que a carga permanente para esse tipo de situação tem, em geral, predominância sobre os demais. Por exemplo, grandes vãos, grande massa de concreto.

A simplificação busca também entender como uma arquitetura tão criativa, como a de Niemeyer, prioriza a forma estrutural para compor e definir o desenho arquitetônico, como pode ser visto anteriormente nas figuras 87 a 91.

4.1. A “Igrejinha” Nossa Senhora de Fátima

4.1.1. Histórico:

Antes da inauguração de Brasília, ainda durante os anos de sua construção, muitas pessoas – operários, funcionários do governo, comerciantes pioneiros, familiares – migraram para o planalto central. Esta nova comunidade que se formava em meio aos canteiros de obra da futura capital nacional necessitava de espaços de convivência, lazer e religião.



Figura 92: Candangos (operários da construção de Brasília) em desfile no dia da inauguração da cidade.

Foto: Revista Manchete, 7 de maio de 1960.

A essa necessidade, de um templo religioso para os católicos que haviam ocupado a região, se juntou um desejo quase particular da família Kubitschek. E assim, de uma promessa feita pela então primeira dama Sarah Kubitschek, surgiu a “Igrejinha” Nossa Senhora de Fátima.

A promessa em questão foi feita pela primeira dama à Nossa Senhora de Fátima por sugestão da primeira dama de Portugal, Dona Berta Craveiro Lopes, devota da Santa, que acompanhando o Presidente de Portugal Craveiro Lopes visitava o Brasil na mesma época em que a filha do casal Kubitschek, Márcia Kubitschek sofria com uma doença rara que os médicos brasileiros não conseguiram controlar, enviando-a para Oxford, na Inglaterra, para ser tratada com o Dr. Trueta (TAMARIMI, 1997).



Figura 93: Família Kubitschek. Fonte: Projeto Memória.

Assim, ficou prometido que a primeira igreja erguida na nova capital do Brasil seria consagrada a Nossa Senhora de Fátima e em 26 de Outubro de 1957 o presidente Juscelino Kubitschek lançou a pedra fundamental para a construção da Igreja, que foi por ele inaugurada em 28 de Junho de 1958, data em que também aconteceu, ali mesmo, o casamento entre Maria Regina Uchôa Pinheiro (filha de Israel Pinheiro, presidente da Novacap) e Hindemburgo Chateaubriand Pereira Diniz. Esse casamento foi decisivo na concepção do projeto da Igrejinha, pois fez com que os planos para sua construção fossem mudados.

O plano inicial de Dona Sarah Kubitschek era construir um grande templo, com capacidade para 800 fiéis, porém, tal projeto demoraria muito a ser erguido e, como em todas as obras da nova capital, tempo não era algo que se pudesse gastar, até mesmo porque já se fazia necessário um local adequado para o casamento de Maria Regina e Hindemburgo.

O local escolhido para a construção da igreja foi a porção mais central da Asa Sul do plano piloto, na entre-quadras 307/308 que, composta com as Superquadras 107,108, 307 e 308 formam uma célula de vizinhança proposta pelo projeto de Lúcio Costa. Esta entre-quadra também abriga hoje uma Escola-classe, e a igreja fica voltada para a entre-quada comercial 107/108, conhecida hoje como “rua” da Igrejinha.



Figura 94: Imagem aérea da Igrejinha ainda em construção. Fonte: TAMARIMI, 1997.

O desafio havia sido lançado, as necessidades e anseios para o projeto eram claros e o compromisso das maiores autoridades era total com o cumprimento da promessa da primeira dama, assim cabia então aos construtores de Brasília realizarem esse sonho. Foram convocados então os profissionais que se responsabilizariam pelo feito, em tempo recorde, dessa obra.

A obra da Igrejinha ficou a cargo da construtora Ibira, sob a supervisão da Novacap (LEAL, 2008) e durou 100 dias, apesar da obra ter sido concluída em pouco tempo a inauguração da Igrejinha teve que ser adiada 2 vezes. A princípio deveria ser inaugurada em 3 de Maio de 1958, um ano após a celebração da primeira missa no Cruzeiro, porém foi remarçada para dia 13 do mesmo mês, sendo adiada novamente para o dia 28 de Junho de 1958, data em que foi finalmente inaugurada.

Estavam presentes a inauguração diversas autoridades, entre elas o Presidente Juscelino Kubitschek e a primeira-dama Sara Kubitschek e o presidente de Portugal Craveiro Lopes, vários convidados ilustres, presentes para o casamento de Maria Regina Uchôa Pinheiro e Hindemburgo Chateaubriand Pereira Diniz, além de inúmeros populares, presentes para o momento solene em que se encerrou a placa com os

dizeres: “Este Santuário, primeiro de Brasília, foi mandado erigir em honra de N.S. de Fátima, por iniciativa da Exma. Sra, Sarah Kubitschek, em cumprimento de uma promessa. Brasília, 28 de Junho de 1958.”

4.1.2. Arquitetura

Oscar Niemeyer foi o arquiteto, e desenhou a igreja inspirado no formato dos chapéus de abas largas das freiras da Congregação das Irmãs Vicenta Maria (LEAL, 2008); o projeto paisagístico da praça no entorno da Igreja ficou a cargo de Roberto Burle Marx, que criou ali uma verdadeira praça de bairro; os painéis das portas e o revestimento externo das paredes – elemento mais marcante de identificação na arquitetura da Igrejinha – foi obra do artista plástico Athos Bulcão; os painéis e afrescos internos foram encomendados a Alfredo Volpi, artista italiano radicado no Brasil e para o projeto estrutural, Oscar Niemeyer contou novamente com a ajuda do Engenheiro Joaquim Cardozo, que se ocupava com os projetos estruturais de todos os edifícios que estavam sendo construídos em Brasília.



Figura 95: Irmã Alvarenga, Freira Vicentina – década de 40. Fonte: SANTOS, 2005.

A Arquitetura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima é muito simples consiste em apenas três elementos básicos, mostrados na Figura 96 – duas paredes estruturais (azul), três pilares externos (vermelhos) e a cobertura (verde) – criando um ambiente simples e acolhedor para os poucos fiéis que a pequena capela comporta.

A parede 1, em curva, envolve toda a igreja, deixando uma abertura frontal para a porta de entrada principal. Nesta parede aparecem também 2 aberturas laterais, antes janelas, e que hoje em dia são usadas como pequenas portas.

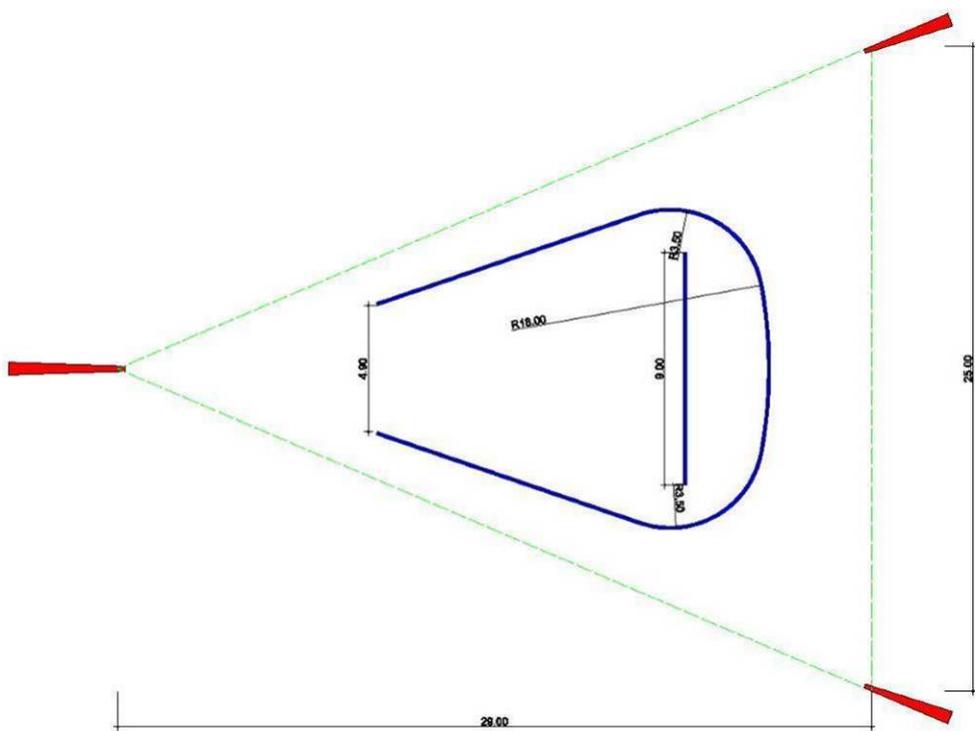


Figura 96: Planta da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Desenho do Autor – adaptado de planta original (IPHAN).



Figura 97: Abertura lateral na parede externa da Igreja. Foto do Autor

A parede 2 separa a pequena nave da sacristia, uma, também pequena, sala atrás do altar da igreja. Além dessas duas divisões estruturais existe uma terceira divisória interna, que cria o espaço para um pequeno altar em um dos cantos do salão principal da igreja.

Externamente, três grandes pilares sustentam a cobertura curva da igreja. Os dois pilares posteriores são iguais e um pouco menores que o pilar frontal. Os pilares têm formas que destacam a arquitetura da cobertura, pois tem a base muito larga e, em curva, vão diminuindo até encontrarem com as pontas da cobertura.

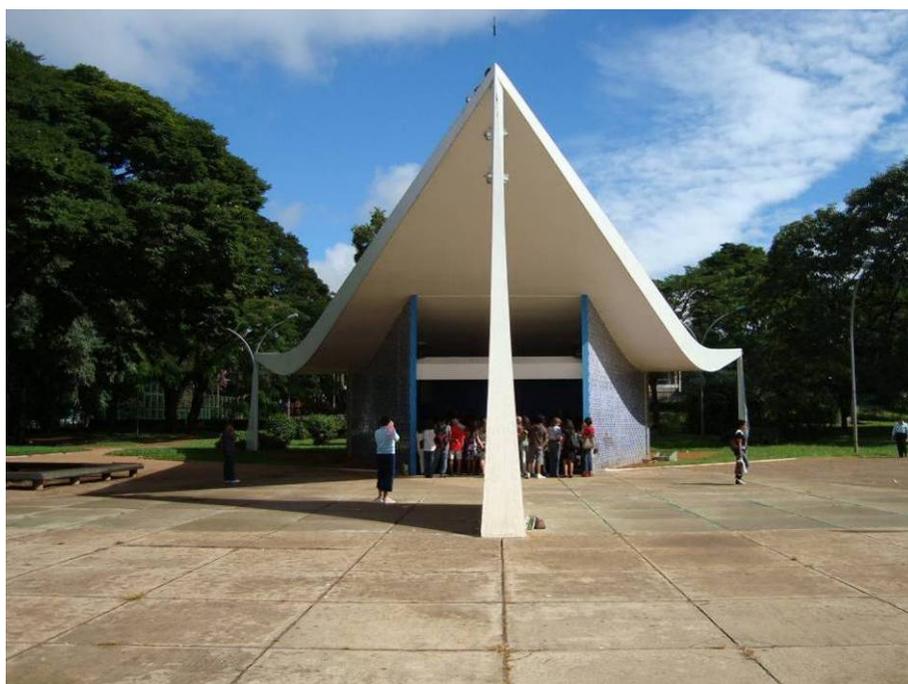


Figura 98: Fachada da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Foto do Autor.

A cobertura da Igrejinha é o elemento que dá a ela toda sua plástica. Trata-se de uma laje triangular em curva, que a primeira vista aparenta ser uma casca de concreto com espessura que varia entre 10 e 90 centímetros. Porém, ao observarmos a estrutura em uma foto aérea, nota-se a presença de 5 grandes vigas de sustentação, que devido a seu formato não aparecem ao observador no nível do chão.

A laje, na realidade tem espessura que varia entre 10 e 30 centímetro, sustentada pelas cinco vigas de concreto armado com altura também variada, entre 10 e 90 centímetros, partem de um mesmo ponto, no encontro com o pilar principal e se afastam até a parte posterior da cobertura. As vigas das laterais externas são responsáveis pelo desenho marcante da cobertura, que com a espessura de 90 centímetros na porção mais central da viga cria a sensação peculiar de leveza, à medida que diminui para as duas extremidades (Figura 99).



Figura 99: Vista da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Foto do autor.

Além da forma escultural do pequeno templo, outro elemento construtivo tem grande importância na arquitetura da Igrejinha, são os painéis de azulejos que revestem todo seu exterior. Criados pelo artista plástico Athos Bulcão, esses painéis, chamados de Natividade são um exemplo da interação da arte com a arquitetura, que permeou as parcerias de Oscar Niemeyer e Athos Bulcão.



Figura 100: O Artista Plástico Athos Bulcão e o Arquiteto Oscar Niemeyer em Agosto de 1985. Fonte: Fundação Athos Bulcão.

Os painéis são formados por dois elementos. São figuras geométricas em azul e branco, uma representando a Pomba da Paz e a segunda representando a Estrela de Belém, juntos se repetem de forma harmoniosa, adequando-se perfeitamente à simplicidade do templo religioso projetado pelo arquiteto (AGRIPINO, 2004). Em toda sua obra, Athos Bulcão busca essa relação de harmonia entre a arquitetura e seus painéis:

“Meu cuidado é sempre fazer com que minha obra não se destaque sozinha, que seja elemento integrado à arquitetura do espaço” (Athos Bulcão, em AGRIPINO, 2004).

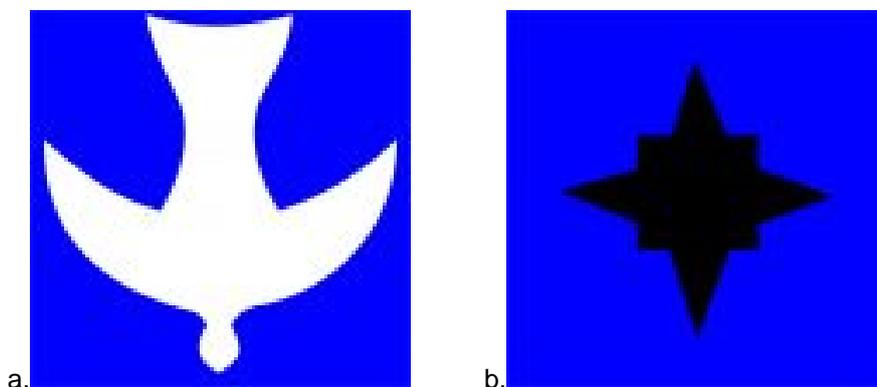


Figura 101: Desenhos dos azulejos do Painele de Athos Bulcão – a. “Espírito Santo”; b. “Estrela”. Fonte: Fundação Athos Bulcão.



Figura 102: a. Painele de Azulejo na lateral da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima; b. Detalhe da disposição dos dois elementos. Fotos do Autor.

Athos Bulcão foi um grande parceiro de Niemeyer em diversas obras em Brasília e também no resto do mundo. Nascido em 2 de julho de 1918, no Rio de Janeiro, Athos chegou a cursar medicina, porém abandonou o curso para se dedicar a sua arte. Aos 21 anos já era amigo de vários artistas brasileiros, que o influenciaram em toda sua carreira, frequentando o Bar Vermelho, no centro do Rio de Janeiro conheceu Carlos Scliar, Enrico Bianco, Roberto Burle Marx e Oscar Niemeyer. Nessa mesma época, foi apresentado a Candido Portinari, de quem foi assistente e aprendiz na obra do Mural de São Francisco de Assis na Pampulha em 1945.

Em 1955 Athos Bulcão estreita definitivamente seus laços com o arquiteto Oscar Niemeyer e também com a arquitetura, colaborando com os projetos dos azulejos externos do Hospital Sul América, atual Hospital da Lagoa, no Rio de Janeiro em 1955;

O pilar principal, que fica no centro da fachada da Igreja possui uma secção de 4,5 metros por 0,5 a 0,2 metros na base, como mostra a figura 104 e 8 metros de altura. No ponto mais alto, onde o pilar encontra a ponta da cobertura ele tem a secção de 0,3 metros por 0,2 metros (Figura 105).

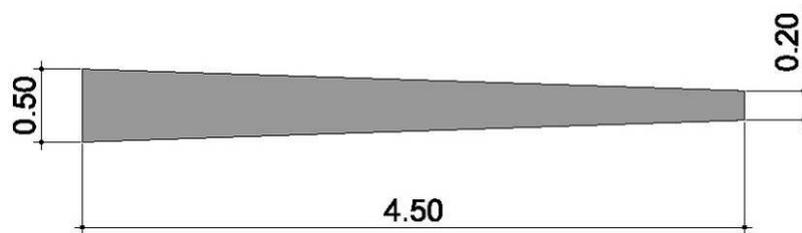


Figura 104: Planta do Pilar Principal. Desenho do autor – adaptado de planta original (IPHAN).



Figura 105: Detalhe do encontro do Pilar principal com a cobertura. Foto do autor.

Os dois pilares posteriores seguem o mesmo desenho do pilar principal, porém são menores. Eles possuem, na base uma secção de 3,5 metros por 0,5 a 0,15 metros e chegam a 5 metros de altura, no topo possuem a secção de 0,3 por 0,15 metros.

Além dos pilares, o sistema estrutural da Igrejinha ainda conta com 2 paredes de concreto como apoios da cobertura, ambas possuem apenas 12 centímetros de espessura, mas cumprem um papel muito importante no conjunto, na sustentação das vigas internas da cobertura.

A cobertura é formada por uma laje triangular curva e cinco grandes vigas. Podemos notar no corte apresentado na figura 103 que a laje de cobertura pode ser dividida em 3 partes distintas.

A primeira, apóia-se nos pilares posteriores, inclina-se em direção ao centro da Igreja e tem uma espessura que varia entre 25 centímetros na extremidade da igreja chegando a 30 centímetros, no ponto em que se apóia na parede estrutural interna.

Da mesma forma, a ponta da laje, que apóia-se no pilar principal possui espessura de 25 centímetros nesse ponto e inclina-se até chegar ao mesmos 30 centímetros, num trecho de aproximadamente 13,9 metros. A terceira parte da laje, central, tem espessura de 10 centímetros e, em uma curva de 20,8 metros de raio une as duas outras partes.

As vigas que compõe a cobertura seguem um desenho similar ao da laje. As cinco vigas são apoiadas do pilar principal e abrem-se em leque, na outra extremidade as duas vigas de borda se apóiam nos pilares posteriores e as 3 vigas internas ficam em balanço, apoiadas nas 2 paredes estruturais.

Assim como a laje, as vigas possuem uma altura que varia entre os mesmos 25 centímetros nas extremidades e chega a 90 centímetros na parte central, curva. Esse artifício é responsável pela incrível leveza da estrutura e pela impressão que se tem de que a cobertura é uma casca rígida de concreto, pois como tem a mesma espessura que a laje nas extremidades o observador no nível do chão jamais consegue visualizar as vigas internas.



Figura 106: Vista posterior da Igrejinha – não se nota a presença de vigas na cobertura. Foto do autor.

4.1.4. Análise do Sistema Estrutural

Para analisarmos o sistema estrutural da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima utilizaremos os dados da tabela 1, coletados a partir de cópias de desenhos originais da

construção (Figuras 107 e 108) cedidas pelo Iphan – DF – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional do Distrito Federal.

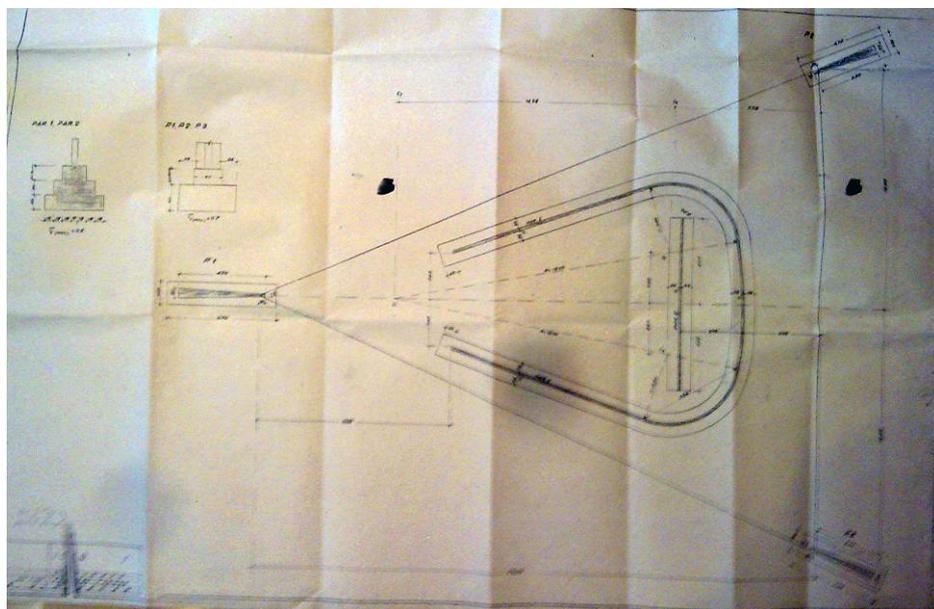


Figura 107: Cópia da Planta de Fundações da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Fonte: IPHAN - DF

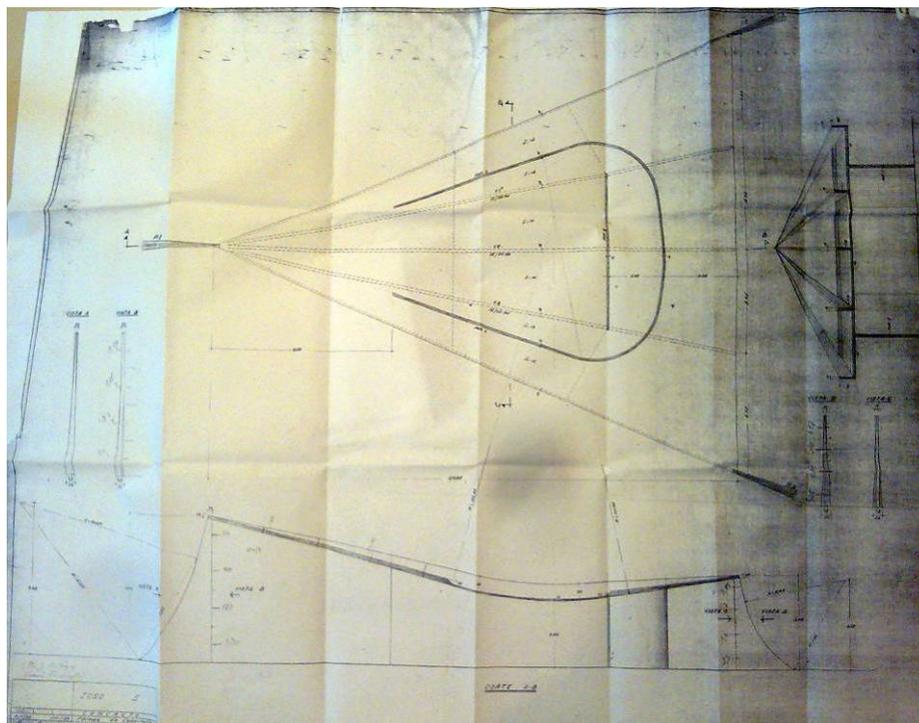


Figura 108: Cópia da Planta e Cortes da Estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Fonte: IPHAN - DF

Tabela 1: Dimensões da estrutura da Igrejinha, levantadas para análise estrutural.

Elemento	A (m)	B (m)	Cor
1.1. Pilar Frontal (trecho 1)	3,30	0,45	Amarelo
1.2. Pilar Frontal (trecho 2)	1,80	0,30	Laranja
1.3. Pilar Frontal (trecho 3)	1,00	0,25	Vermelho
1.4. Pilar Frontal (trecho 4)	0,50	0,20	Magenta
2.1. Pilares Posteriores (trecho 1)	2,30	0,45	Amarelo
2.2. Pilares Posteriores (trecho 2)	1,30	0,30	Laranja
2.3. Pilares Posteriores (trecho 3)	0,70	0,20	Vermelho
2.4. Pilares Posteriores (trecho 4)	0,45	0,17	Magenta
3. Parede 1	0,12	varia	Verde
4. Parede 2	0,12	varia	Verde
5.1. Vigas (trecho 1)	0,10	0,25	Azul
5.2. Vigas (trecho 2)	0,10	0,70	Roxo
5.3. Vigas (trecho 3)	0,10	0,90	Amarelo
6.1. Laje (trecho 1)	-	0,1	Ciano
6.2. Laje (trecho 2)	-	0,25	Cinza
6.3. Laje (trecho 3)	-	0,30	Ciano

A: Base (vigas) ou Lado A (pilares) ou Espessura (paredes) B: Altura (vigas e lajes) ou Lado B (pilares)

Ao colocarmos os dados da tabela 1 no programa SAP 2000 temos o sistema estrutural representado na perspectiva abaixo (Figura 109).

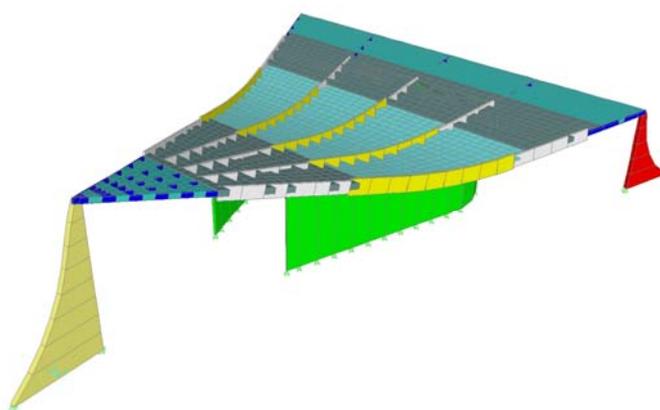


Figura 109: Perspectiva esquemática da estrutura da Igrejinha. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

A partir desses dados iniciaremos as análises partindo de uma observação qualitativa simplificada do conjunto formado pelos pilares – frontal e posterior e a viga de borda (Figura 110).

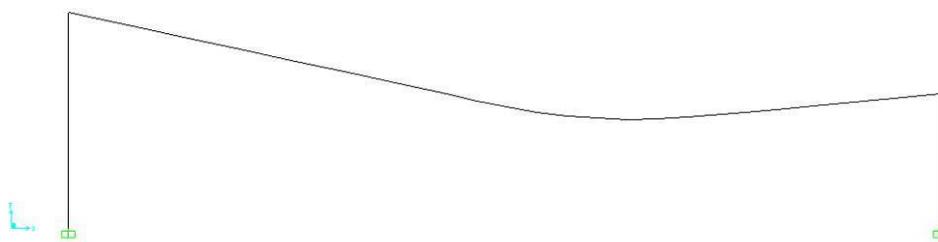


Figura 110: Corte do sistema – viga-pilar – simplificado. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Na Figura 111 vemos o diagrama de forças normais gerado pelo programa SAP 2000 para esse sistema de Viga-pilares. Podemos observar uma força de tração praticamente constante ao longo da Viga de Borda – aproximadamente 30tf. Já nos pilares ocorre uma força que é cerca de 4 vezes maior na base do que no ponto de encontro entre pilar e viga – 44,8tf para 10,7tf no pilar frontal e 20,9tf para 5,2tf no pilar posterior.

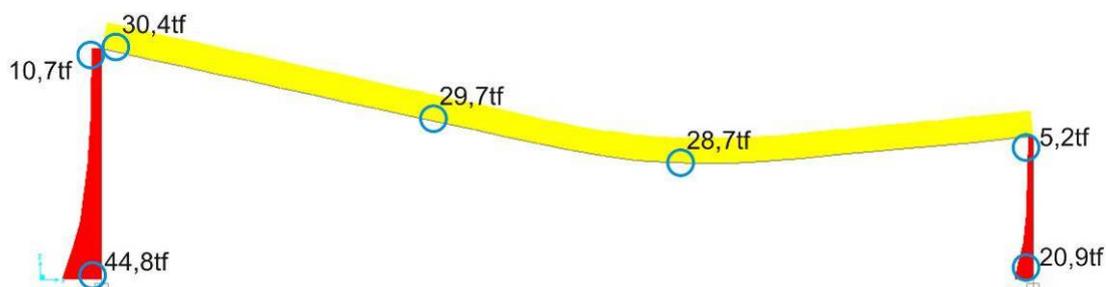


Figura 111: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Observando o diagrama de momentos fletores (Figura 112) podemos observar um grande momento na base dos pilares, o que justifica a escolha de seu formato, maior na base e mais esbelto ao se aproximar do topo. Também na viga de borda, observamos que o momento é maior no centro do vão, parte onde a viga apresenta maior altura (90cm).

Já o Diagrama de Deformações (Figura 113) mostra que o maior deslocamento está no centro do vão, onde o deslocamento aponta 31,3mm na direção “y”.

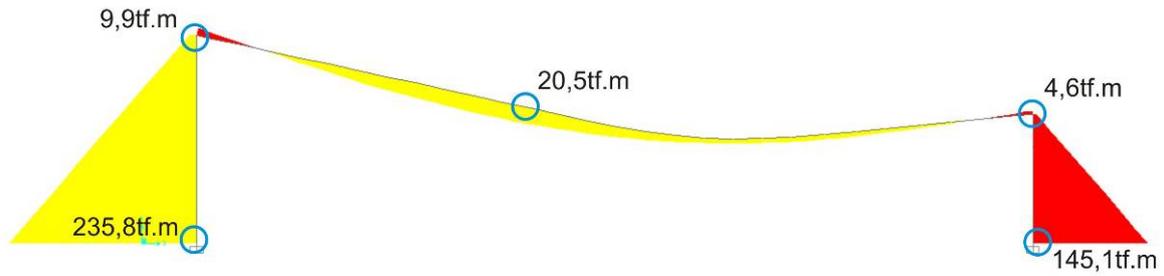


Figura 112: Diagrama de Momentos Fletores. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

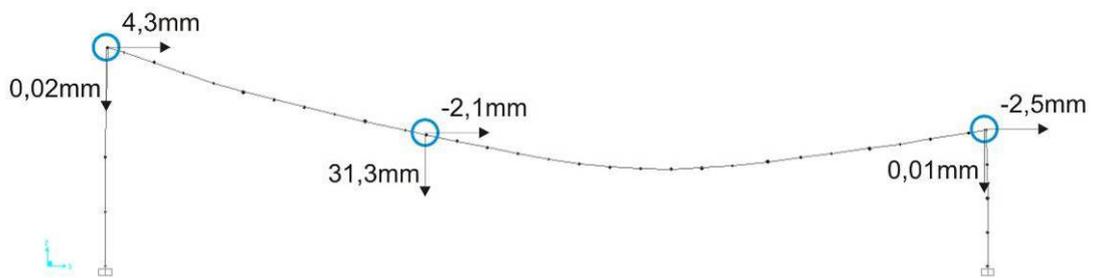


Figura 113: Diagrama de Deformações. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Outro conjunto interessante para ser analisado separadamente nesse sistema é o conjunto formado pelo pilar frontal, a viga central e as paredes estruturais 1 e 2 (Figura 114). Nessa parte da estrutura a viga central fica em balanço na parte posterior da cobertura.

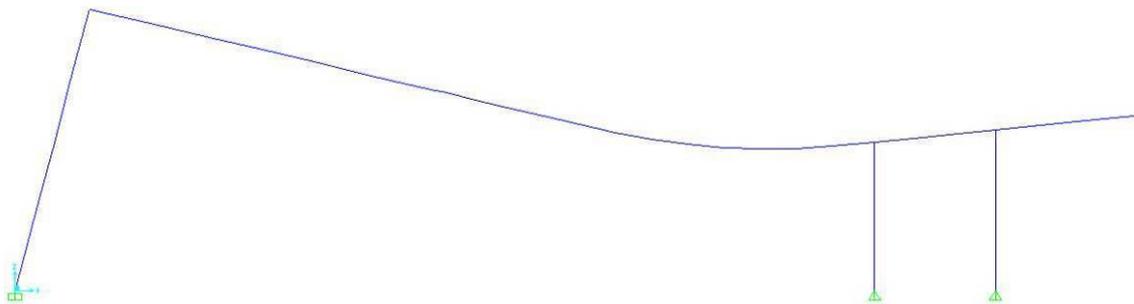


Figura 114: Corte do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Podemos observar que, assim como no caso anterior, existe uma maior concentração de forças de compressão na base dos apoios – pilar e paredes, porem na viga central existe uma força constante muito menor, mas ainda praticamente constante (Figura 115). Já o Diagrama de Momento Fletor (Figura 116) nos mostra valores maiores nos encontros da viga central com as paredes estruturais – principalmente na parede 2 (53,6tf.m).

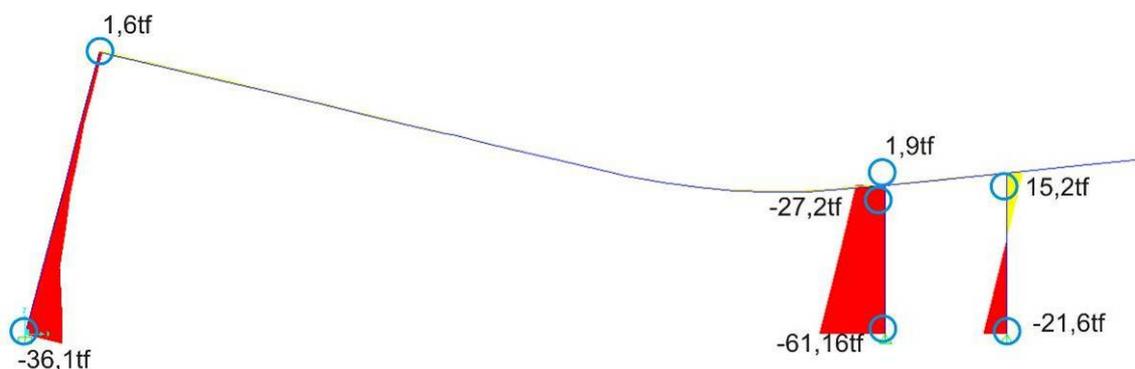


Figura 115: Diagrama de Forças Normais do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

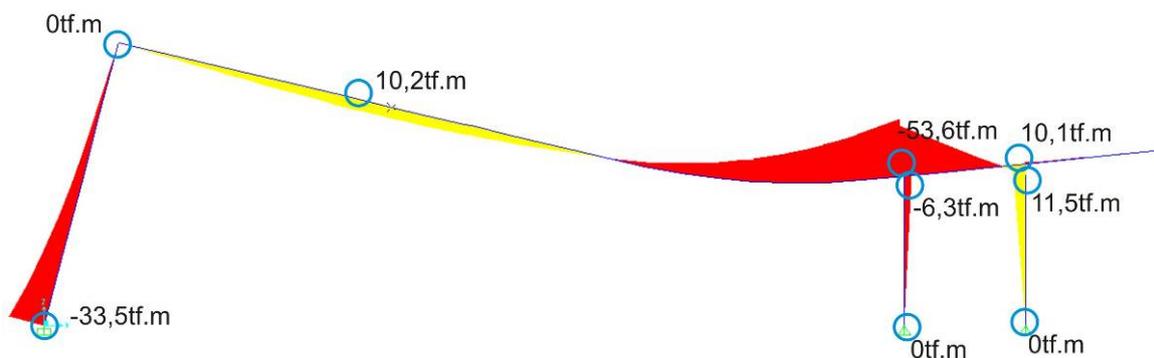


Figura 116: Diagrama de Momentos Fletores do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

O Diagrama de deformações abaixo (Figura 117) nos mostra que o maior deslocamento continua sendo na parte central do maior vão, entre o pilar e a parede estrutural 2. Notamos também, que apesar do balanço, a extremidade da viga central apresenta um deslocamento muito pequeno (2,88mm).

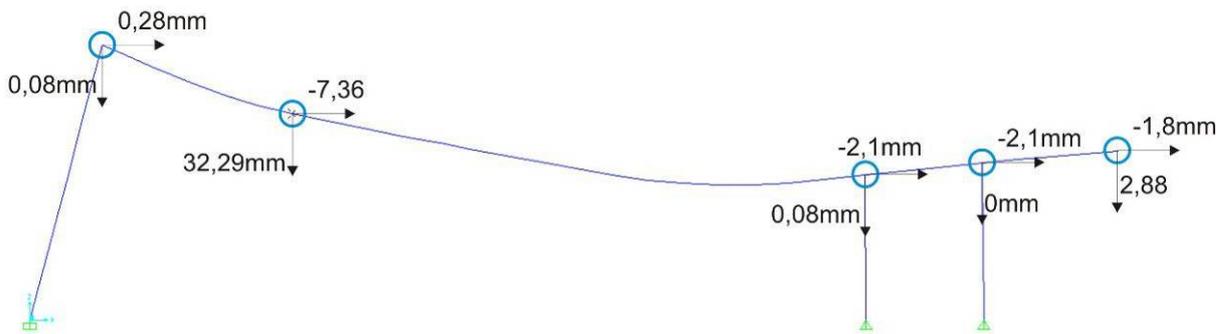


Figura 117: Diagrama de Deformações do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Utilizando o programa SAP 2000 para analisarmos o sistema estrutural completo da Igrejinha (Figura 118), podemos observar claramente as relações do sistema estrutural com a forma adotada para a arquitetura da Igreja Nossa Senhora de Fátima.

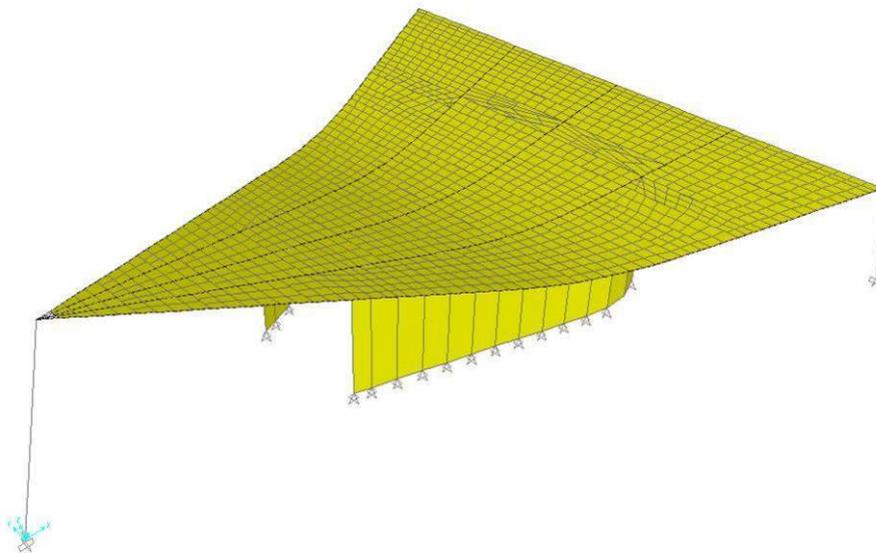


Figura 118: Sistema Estrutural da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Na figura abaixo (Figura 119) temos o Diagrama de Forças Normais, notamos que as forças de tração (amarelo) se concentram no centro dos vãos em todas as 5 vigas do sistema estrutural. Apesar das vigas terem as mesmas dimensões as Forças são maiores nos maiores vãos – vigas de borda, entre pilar frontal e pilar posterior (29,1tf) e menores no menor vão – viga central, entre o pilar frontal e a parede estrutural. Notamos também nesse diagrama que nos trechos onde as vigas centrais estão em balanço ocorre uma força de compressão próximo ao apoio na parede estrutural.

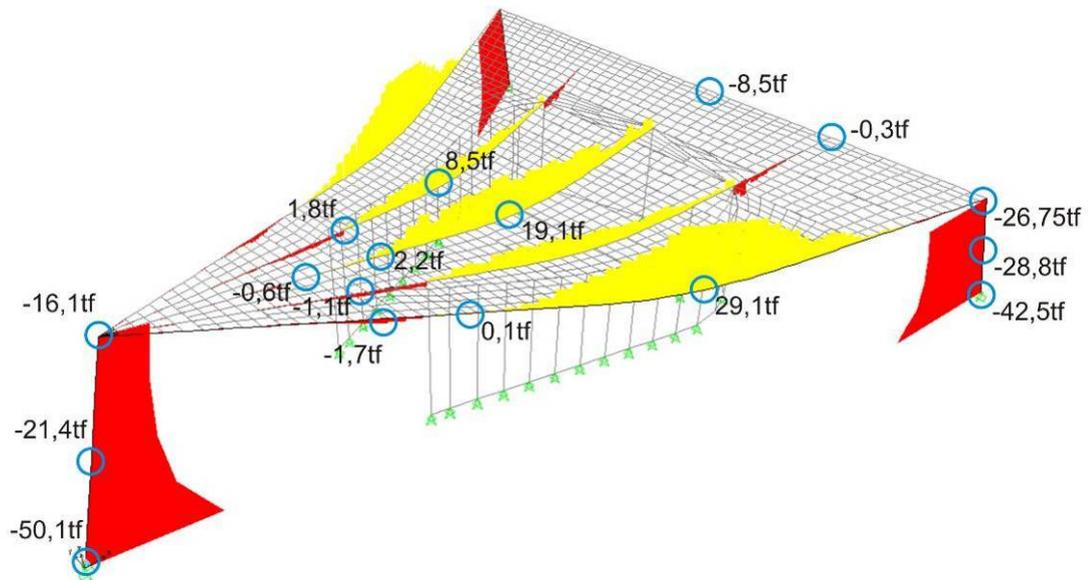


Figura 119: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

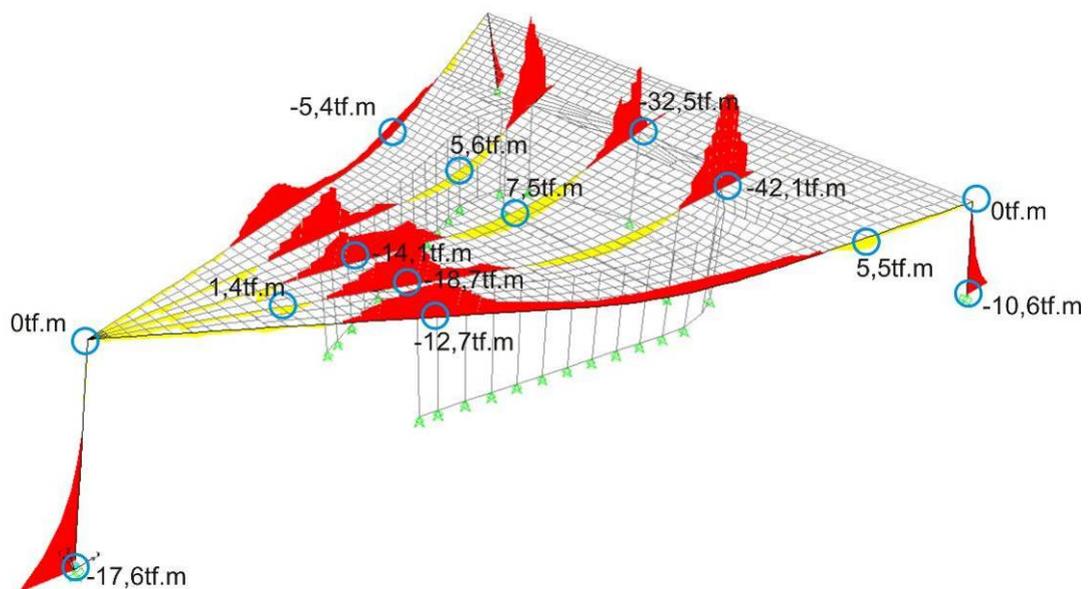


Figura 120: Diagrama de Momentos Fletores. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Observando os Diagramas de Momento Fletores desse sistema estrutural (Figura 120) podemos constatar que a forma da Igrejinha está relacionada diretamente com seu sistema estrutural. Basta notarmos como o desenho do diagrama de Momentos Fletores no pilar se assemelha com a forma que o arquiteto e o engenheiro utilizaram nesse elemento (Figuras 121 e 122).

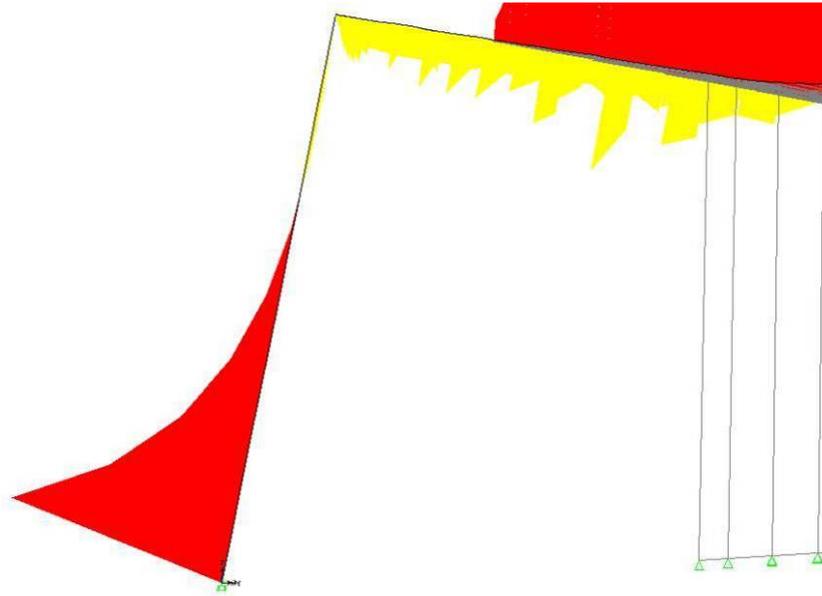


Figura 121: Diagrama de Momentos Fletores – detalhe do Pilar Frontal. Desenho do autor. Programa SAP 2000.



Figura 122: Pilar Frontal da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Foto do autor.

Já os diagramas abaixo (Figura 123 e 124) mostram os valores do momento na laje da Igrejinha obtidos pelo programa SAP 2000. Esses valores justificam a espessura variável da laje, que pode ser mais fina nas extremidades e precisa ser “engrossada” nos trechos onde apresentam valores maiores de Momento.

Analysis Model

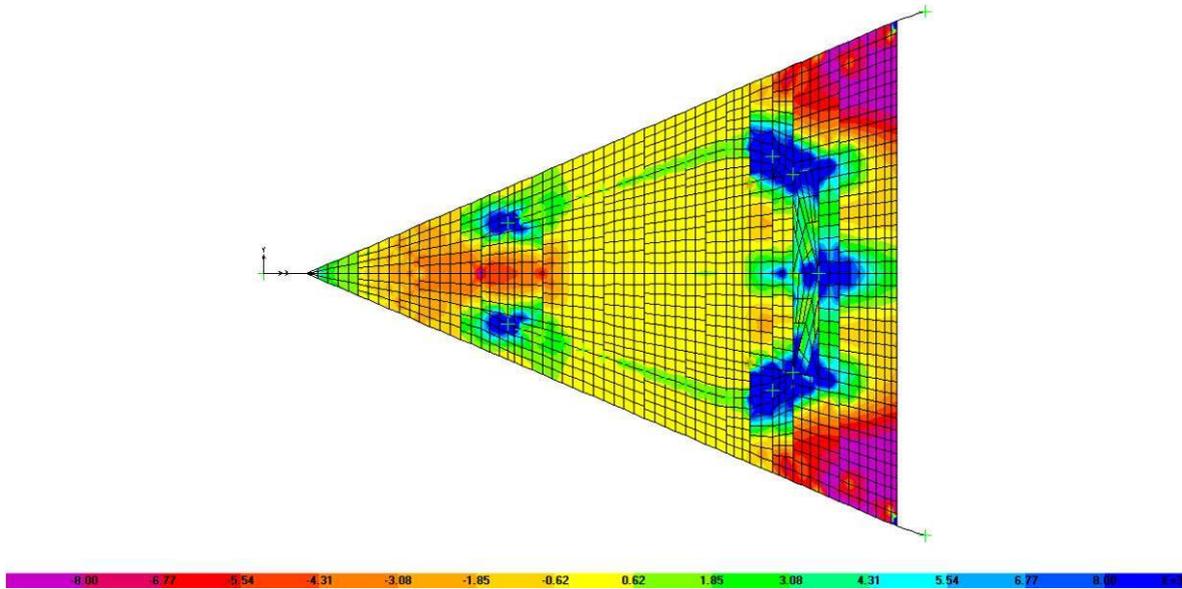


Figura 123: Diagrama de Momentos Fletores na direção “x” na laje da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.
Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Analysis Model

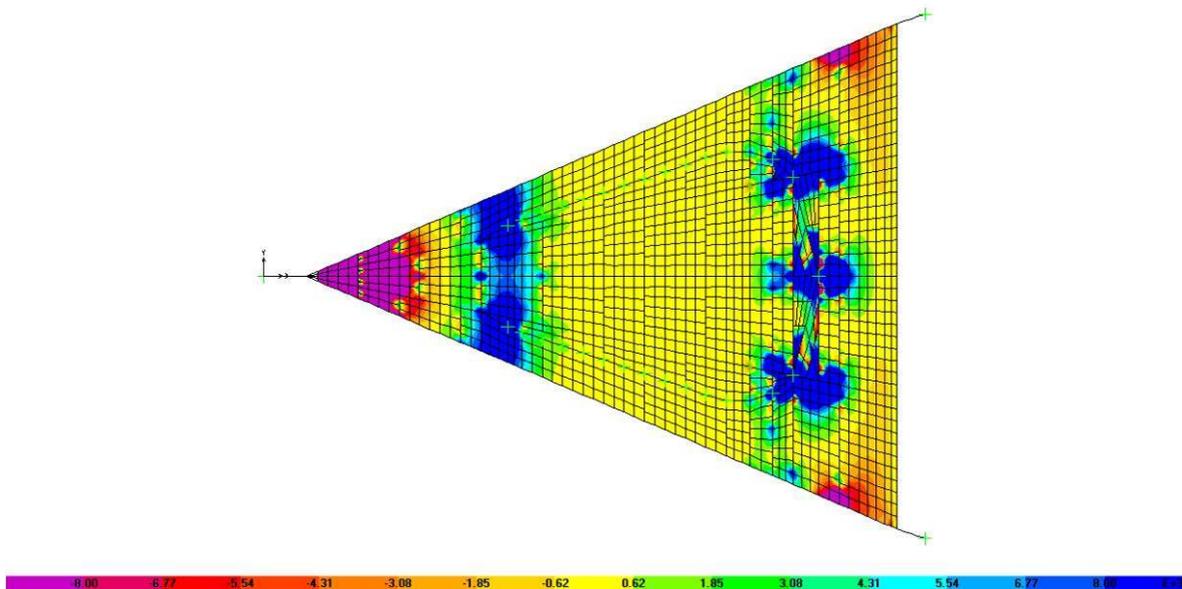


Figura 124: Diagrama de Momentos Fletores na direção “y” na laje da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.
Desenho do autor. Programa SAP 2000.

O Diagrama de Deformações abaixo (Figura 125) mostra que os deslocamentos nesse sistemas são mínimos, o que pode nos indicar que a estrutura da Igrejinha esteja super-dimensionada.

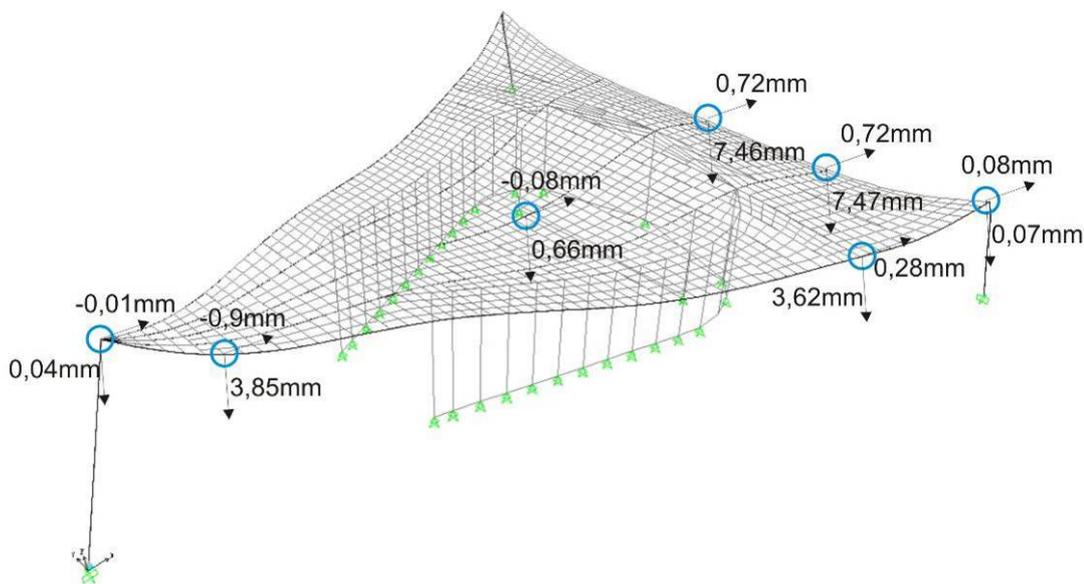


Figura 125: Diagrama de Deformações. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Podemos notar com essas análises que o projeto da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, apresenta uma simplicidade formal característica, que a torna única, reconhecida mundialmente. Essa simplicidade foi conseguida por meio de uma total sintonia entre o sistema estrutural adotado e o desenho arquitetônico pretendido, desde o início do processo projetual.

4.2. Congresso Nacional – Cúpula invertida da Câmara dos Deputados

4.2.1. Histórico

O arrojado “Plano de Metas”, do Presidente Juscelino Kubitschek, concebido para ser cumprido em quatro anos, continha como “meta síntese” a construção da nova capital brasileira, Brasília. Para escolher o projeto da nova cidade foi feito um concurso nacional que contou com a participação dos principais nomes da arquitetura e do urbanismo brasileiro, consagrando como vencedor o projeto do arquiteto e urbanista Lúcio Costa (MEYER, 2007).

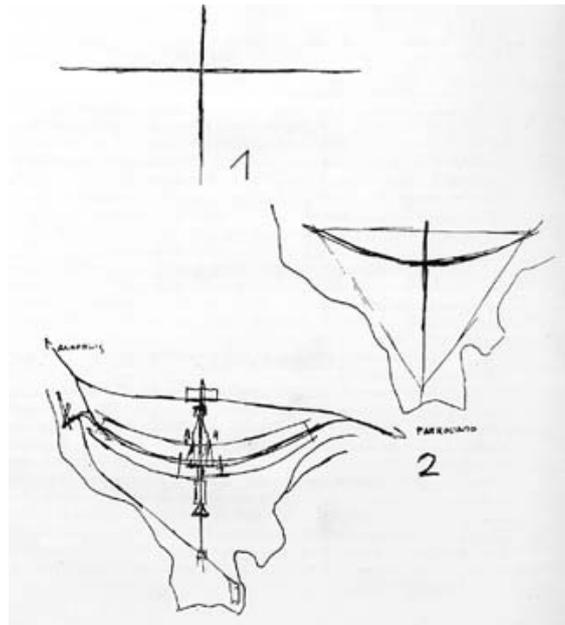


Figura 126: Croquis do plano piloto. Projeto de Lúcio Costa para a nova capital do Brasil. Fonte: Brasil em Foco.

Dentro desse plano de Lúcio Costa já existia a previsão da localização da Praça dos três poderes, e nela a posição do Congresso Nacional, inclusive com uma proposta volumétrica para tal edifício (figura 128). Essa volumetria sugerida por Lúcio Costa possuía apenas uma torre ou bloco vertical e uma cúpula.

Como todos os edifícios da nova sede do governo federal, o Congresso Nacional foi projetado por Oscar Niemeyer, que contou com a valiosa colaboração do engenheiro Joaquim Cardozo, responsável pelo cálculo estrutural.

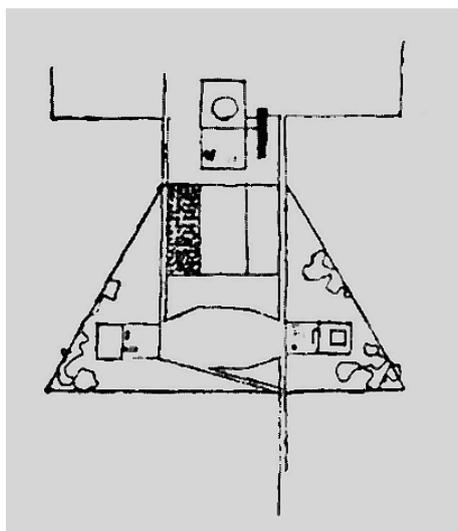


Figura 127: Praça dos Três Poderes. Projeto de Lúcio Costa. Fonte: IPHAN

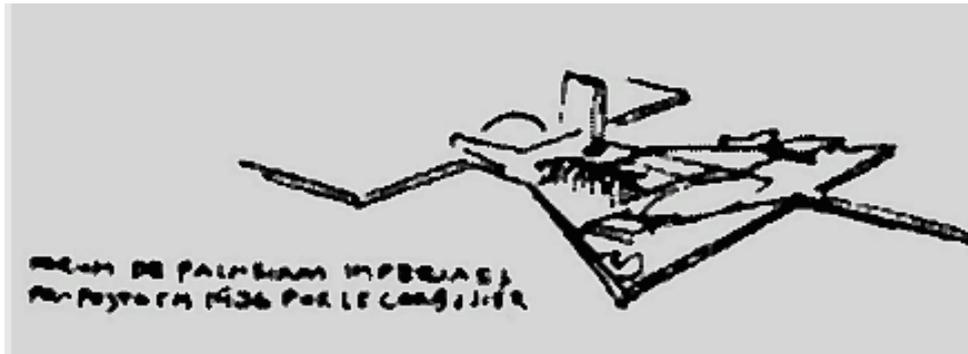


Figura 128: Volumetria proposta por Lúcio Costa. Fonte: IPHAN

4.2.2. Arquitetura

Oscar Niemeyer descreve assim a concepção arquitetônica do Congresso nacional:

Arquitetura não constitui uma simples questão de engenharia, mas uma manifestação do espírito, da imaginação e da poesia.

No Palácio do Congresso, por exemplo, a composição se formulou em função desse critério, das conveniências da arquitetura e do urbanismo, dos volumes, dos espaços livres, da oportunidade visual e das perspectivas e, especialmente, da intenção de lhe dar o caráter de monumentalidade, com a simplificação de seus elementos e a adoção de formas puras e geométricas. Daí decorreu todo o projeto do Palácio e o aproveitamento da conformação local, de maneira a criar no nível das avenidas que o ladeiam uma monumental esplanada e sobre ela fixar as cúpulas que deviam hierarquicamente caracterizá-lo.

Tivesse estudado o Palácio com espírito acadêmico, ou preocupado com as críticas, e ao invés dessa esplanada, que a muitos surpreende pela sua imponência, teríamos uma construção em altura.

... que hoje se estende em profundidade, além do edifício, acima da esplanada, entre as cúpulas, abrangendo a Praça dos Três Poderes e os demais elementos arquitetônicos que a compõem, somando-se plasticamente e tornando, assim, a perspectiva do conjunto muito mais rica e variada.

A cúpula da Câmara dos Deputados demandava um estudo cuidadoso que a deixasse com que apenas pousada sobre a esplanada, isto é, a cobertura do prédio; o mesmo acontecia com esta última, cujo topo é tão fino que ninguém imagina constituir, internamente a galeria do público que liga os dois plenários.

Internamente, o projeto procura criar os grandes espaços livres que devem caracterizar um palácio, para isso utilizando elementos transparentes que evitam transformá-los em pequenas áreas.

A forma arquitetônica - mesmo contrariando princípios estruturais - é funcional quando cria beleza e se faz diferente e inovadora (Niemeyer, citado em "Sede do Congresso Nacional")



Figura 129: Congresso Nacional. Foto do Autor

É possível observar semelhanças na volumetria inicial de Lúcio Costa e no projeto elaborado por Oscar Niemeyer para o Congresso Nacional, porém existem elementos arquitetônicos e conceitos que diferenciam completamente as idéias dos dois arquitetos.

Oscar Niemeyer optou por separar as duas casas, Senado e Câmara dos Deputados, criando cinco volumes.

Dois volumes verticais e estrutura metálica, interligados por passarelas, os anexos principais do congresso, conhecidos como “H”, que foram construídos para serem os mais altos edifícios do Plano Piloto, com 28 andares.

Um volume horizontal, que fica abaixo do nível das vias do Eixo Monumental. Esse nivelamento da cobertura do palácio com as avenidas se deve a intenção do arquiteto de integrar o Congresso Nacional na Praça dos Três Poderes, fazendo isso visualmente, já que ao se aproximar do Congresso, é possível enxergar, por entre as cúpulas, a praça. Além disso, essa solução permitiu liberar a vista do horizonte e destacar os dois principais elementos do projeto: as cúpulas – demonstrando a hierarquia que Niemeyer queria imprimir ao conjunto (NIEMEYER, 2000).

A cúpula do Senado, virada para baixo, como um prato emborcado, típica cúpula de cobertura que cobre um vão de 39 metros, retrata um local de reflexão, serenidade, ponderação e equilíbrio (MOREIRA, 2007).

A Cúpula da Câmara, virada para cima, aberta, representando um plenário aberto ao povo (MOREIRA, 2007). Ela tem 62 metros na cobertura e 30,70 metros na base que se apóia sobre a laje do volume horizontal, com uma leveza impressionante, que exigiu soluções estruturais jamais vistas nos mais completos manuais de estrutura da

época (OTHAKE, 2007). Devido às suas singularidades, a “cúpula invertida” é um dos objetos de análise deste trabalho.

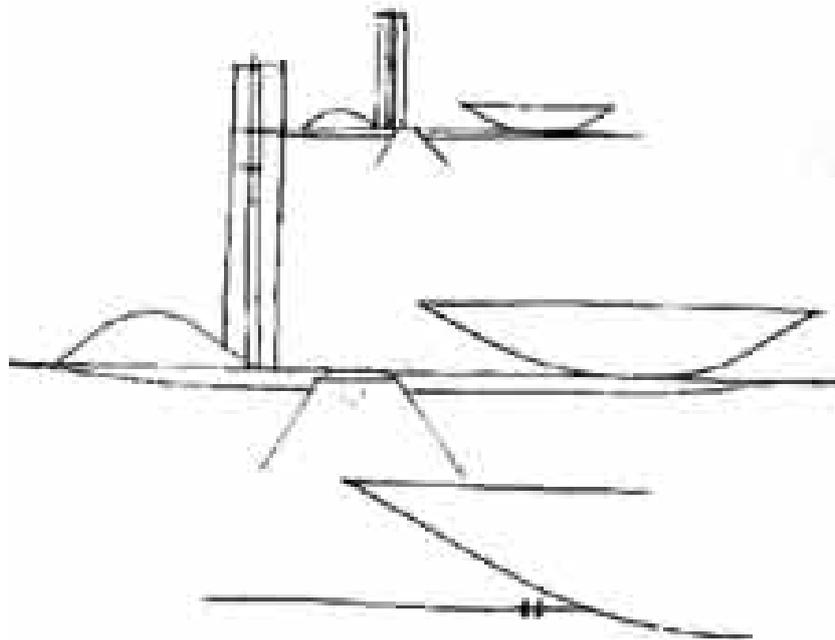


Figura 130: Croqui de Niemeyer para o Congresso Nacional. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer

O Congresso Nacional é o monumento de maior destaque dentre os edifícios de Brasília, pelo porte das torres, as mais altas do Plano Piloto; pela localização, no centro visual do Eixo Monumental e pelo arrojado estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados. Niemeyer parece concordar com esse destaque ao falar do monumento: “Quando alguém vai à Brasília eu pergunto se viu o congresso nacional e pergunto depois se gostou, se achou que o projeto era bom. Certo de que ela podia ter gostado ou não, mas nunca podia dizer, que tinha visto antes coisa parecida” (NIEMEYER, 2000).

A inventividade nas formas das grandes cúpulas do Congresso Nacional também impressiona grandes nomes da arquitetura mundial, como Le Corbusier, que ao subir a rampa do Congresso disse a Ítalo Campofiorito – arquiteto e urbanista, que na década de 60 trabalhou na Novacap e mais tarde, no IPHAN, assinou o tombamento de Brasília: “Aqui há invenção!” (CORBUSIER *appud* NIEMEYER, 2000).

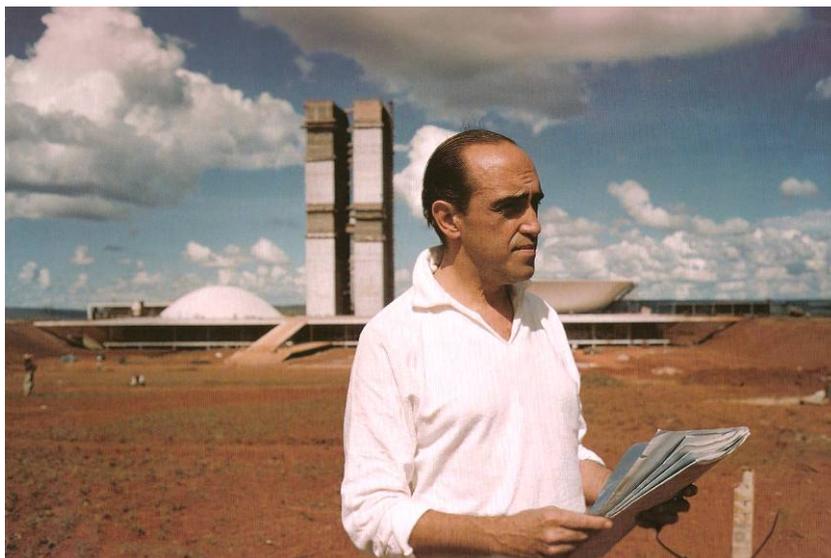


Figura 131: Oscar Niemeyer em frente ao Congresso Nacional ainda em construção em Brasília, 1960. Foto de Rene Burri, fonte: FARIA, 2007, pag. 59.

4.2.3. O Sistema Estrutural

A Cúpula invertida da Câmara foi mais um desafio proposto por Niemeyer ao calculista Joaquim Cardozo. Conhecido como o “Engenheiro da Poesia”, Cardozo é considerado um pioneiro do Movimento Moderno e se destaca como calculista das principais obras de Oscar Niemeyer, como o Conjunto da Pampulha e os edifícios de Brasília (NIEMEYER, 2000).

Ao vencer mais esse desafio e encontrar a forma de fazer a cúpula do congresso funcionar, Cardozo, como conta o próprio Niemeyer, chegou a telefonar para o arquiteto para dar a notícia: “Oscar, consegui a tangente que vai fazer a cúpula da Câmara, solta como você queria!” (CARDOZO appud GALLINDO, 2004).

O Engenheiro descreve assim o Sistema Estrutural do edifício:

A parte correspondente às estruturas de concreto armado, utilizadas para manter o equilíbrio desses edifícios de Brasília oferece aspectos novos; a cúpula correspondente ao Senado, no Parlamento, é um parabolóide de revolução apoiado sobre as vigas da grande plataforma da cobertura; a que corresponde, no mesmo edifício, à Câmara dos Deputados, é um conjunto constituído – enumerando-se de baixo para cima – de uma casca limitada pela superfície de uma zona de elipsóide de revolução, abaixo do equador; tangente a esta primeira está uma segunda, limitada pela superfície de um tronco de cone invertido; no ponto de tangência das duas, para sustentar o forro do plenário da Câmara, insere-se uma terceira casca limitada por uma calota esférica. Não só a que tem a forma de uma zona de elipsóide, como a de calota esférica, ofereceram várias dificuldades, sendo que esta última extremamente rebaixada (relação flexa/corda de 1/14) foi calculada pela fórmula de Gravina para este tipo de casca. (Cardozo, em manuscrito “A Construção de Brasília”. CARDOZO, Joaquim, sem data. Fonte: Site oficial de Joaquim Cardozo, Rede de Idéias.)

Foram utilizados anéis de aço, com o uso de vergalhões embutidos no concreto, 48 barras por metro de bitola , 48 barras por metro de bitola $\varnothing 1.1/4"$ (32mm) dispostas em duas camadas (TEATINI,2009), que podem ser observados na figura abaixo, da época de sua construção. Esse sistema forma a primeira casca da cúpula, limitada pela superfície de uma “zona de elipsóide de revolução, abaixo do equador” onde está apoiada a arquibancada da galeria do plenário.

Essa casca tem espessura variável, possuindo cerca de 86cm no ponto onde encontra o anel inferior e 60cm no ponto onde encontra o anel superior. Esse anel superior absorve grande empuxo da casca e também está ligado às vigas da laje forro que ajudam na resistência das forças horizontais de tração, atuando como tirantes (TEATINI, 2009)

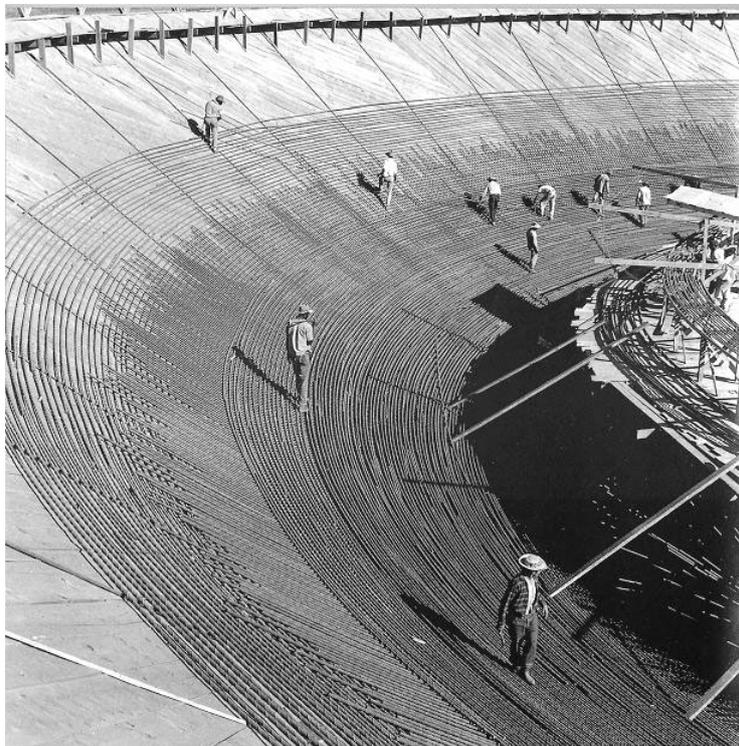


Figura 132: Foto da Construção da Cúpula da Câmara. Fonte: Arquivo Público do DF

Sobre essa primeira casca apóia-se uma segunda, uma superfície de um tronco de cone invertido, que por apoiar-se no ponto de tangência do elipsóide de revolução da primeira casca cria uma continuidade visual perfeita aparentando ser um só elemento estrutural. Aparentemente é essa a “tangente” a qual se referia Joaquim Cardozo ao telefonar para Oscar Niemeyer.



Figura 133: “Cúpula Invertida”, Câmara dos Deputados, Brasília-DF. Foto do Autor.



Figura 134: O ponto de tangência entre a primeira e a segunda casca, internamente. Foto do autor

Exatamente na junção desses dois elementos, em um anel de concreto intermediário, apóia-se a terceira casca, uma calota esférica côncava extremamente rebaixada – “relação flecha / corda = 1/14” – esta terceira casca ainda suporta 2 lajes, um forro horizontal (laje de forro) e a laje superior, plana e com um vazio circular no centro.



Figura 135: Vão entre a laje forro e a terceira casca. Foto do autor.



Figura 136: Furo na laje forro para instalação de luminárias, no detalhe a espessura. Fotos do autor.

Esse sistema – terceira casca, laje forro e laje superior – está interligado através de uma série de pilares de concreto armado de seção quadrada 10x10cm, que apóiam a laje superior na terceira casca e sustentam nesta, como tirantes, a laje de forro. (Figuras 137 a 139). Essa estrutura de fechamento superior da Cúpula vence um vão de 62 metros de diâmetro, deixando todo o plenário livre, sem nenhum obstáculo visual para os congressistas ou para o público e imprensa (Figura 140).



a.

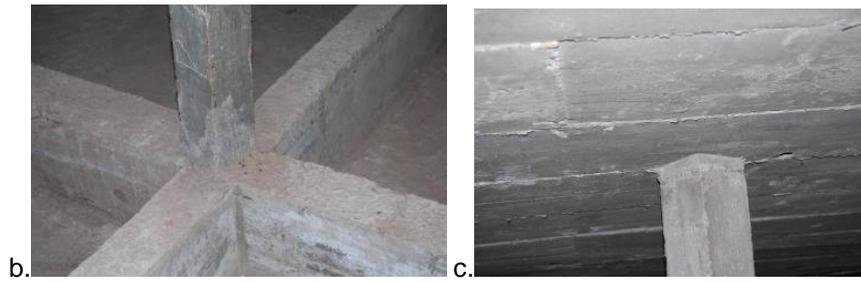


Figura 137: a. Pilares entre a laje forro e a terceira casca. b. Detalhe da junção do pilar na laje forro e c. Detalhe da junção do pilar na terceira casca. Fotos do autor.



Figura 138: Detalhes dos pilares. O desgaste do concreto evidencia a grande quantidade de ferro utilizado. Fotos do autor.



Figura 139: a. Pilares entre terceira casca e a laje superior. b. Aberturas na terceira casca que permitem uma excelente ventilação. Fotos do autor.



Figura 140: Plenário da Câmara dos Deputados. Foto: Roosevelt Pinheiro



Figura 141: Cobertura da Câmara dos Deputados e Torres dos Anexos, é possível notar o vão entre a Laje Superior e a Terceira Casca que aparece pela abertura no centro da laje. Foto do autor.

Toda essa estrutura da cúpula invertida está apoiada em um grande anel de concreto (anel de compressão) e este está engastado a uma grande malha de vigas de sustentação, que também formam a ampla laje horizontal, chamada de esplanada por Niemeyer e que corresponde ao teto do edifício horizontal do palácio onde se apóiam as cúpulas do Senado e da Câmara. Esta laje é sustentada por um conjunto de pilares visíveis nos salões do nível do plenário (Figura 142) e, logo abaixo da cúpula da Câmara dos Deputados, por paredes de concreto que fazem o fechamento do plenário – cortinas de concreto.

As vigas de sustentação da grande laje de cobertura do volume horizontal possuem altura variável, de 0,4 nas extremidades até 2 metros de altura na base onde se apóia o anel de compressão. Nesse ponto é interessante observar que a altura da viga é aproveitada para formar as galerias de imprensa do plenário e os corredores que interligam as duas casas, Senado e Câmara.

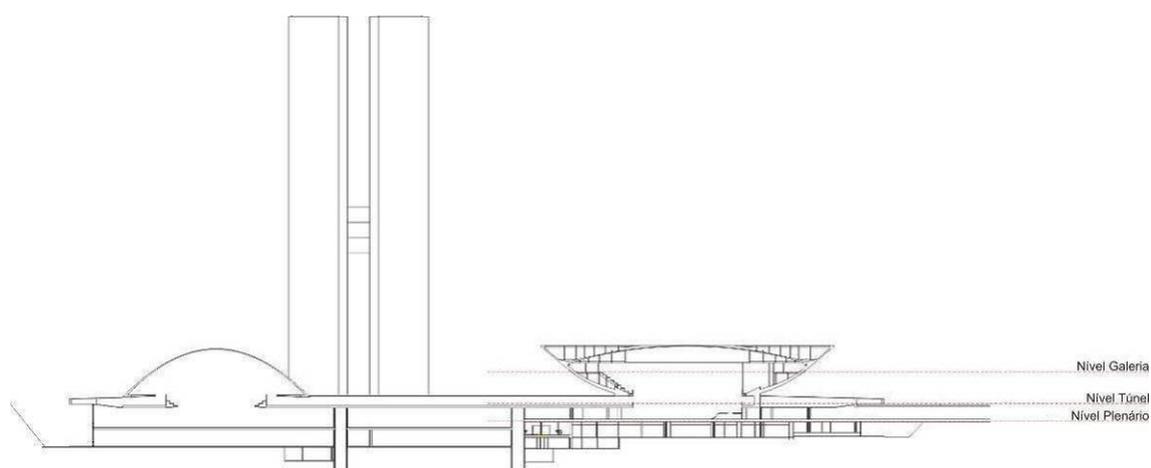


Figura 142: Corte Longitudinal do Congresso Nacional. Fonte: Desenho do Autor em Corel Draw (Baseado em Arquivo de AutoCad cedido por Ricardo André)

O corte a seguir (Figura 143) – desenhado a partir dos dados coletados das cópias heliográficas dos projetos originais do acervo da Câmara dos Deputados – mostra o sistema estrutural criado pelo engenheiro Joaquim Cardozo para dar vida à inventividade de Oscar Niemeyer. Enumerando os elementos – de baixo para cima, como fez o próprio Joaquim Cardozo – temos:

1. Pilares Inferiores que sustentam a grande laje de cobertura do volume horizontal que une as duas casas – Senado e Câmara dos Deputados;
2. Cortinas de Concreto, que formam as paredes do salão do Plenário, no mesmo nível dos pilares inferiores;
3. Vigas de Sustentação da grande laje;

4. Anel Inferior de compressão, onde apóia-se a estrutura da cúpula e abre-se o vão na grande laje para o plenário;

5. Primeira Casca, limitada pela superfície de uma “zona de elipsóide de revolução, abaixo do equador” onde está apoiada a arquibancada da galeria do plenário;

6. Anel Intermediário, no ponto de tangência entre a primeira e segunda casca, onde apóia-se a estrutura de cobertura;

7. Segunda Casca, uma superfície de um tronco de cone invertido;

8. Laje Forro;

9. Pilares do Forro, que funcionam como tirantes de sustentação da laje forro;

10. Terceira Casca, uma cúpula côncava formada por uma calota esférica;

11. Pilares Superiores, que apóiam a laje superior na terceira casca;

12. Anel Superior, um reforço na extremidade da segunda casca, onde esta se liga à laje superior;

13. Laje Superior, uma laje circular plana com um vazio também circular em seu centro, por onde aparece a terceira cúpula.

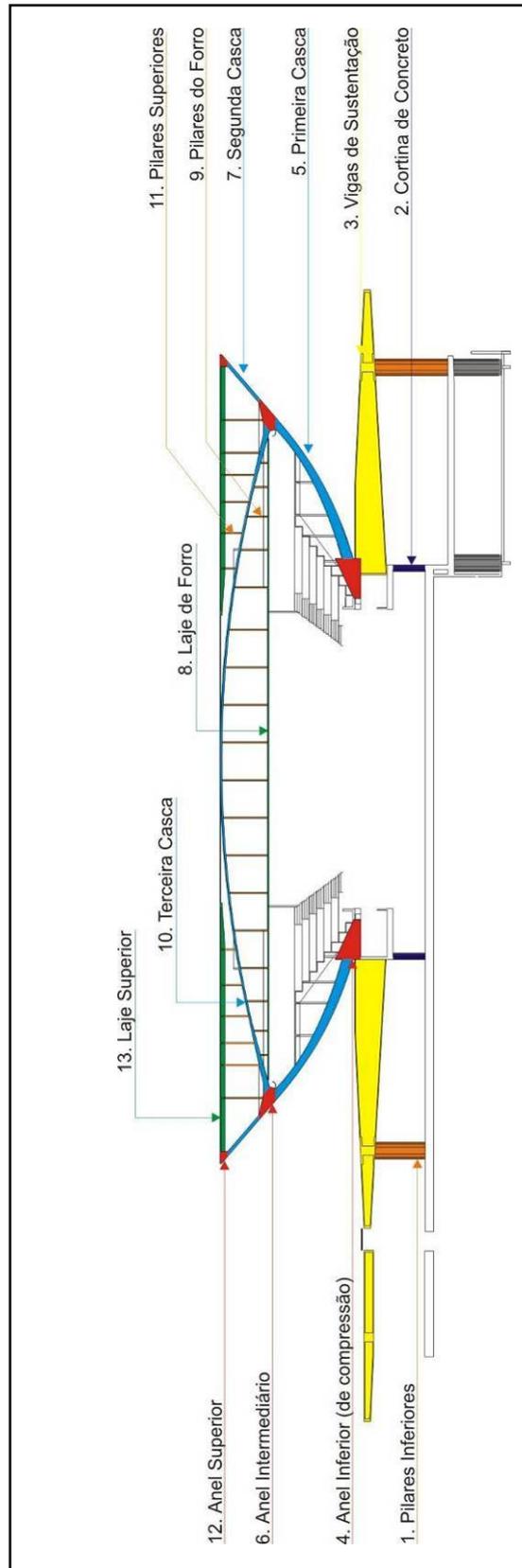
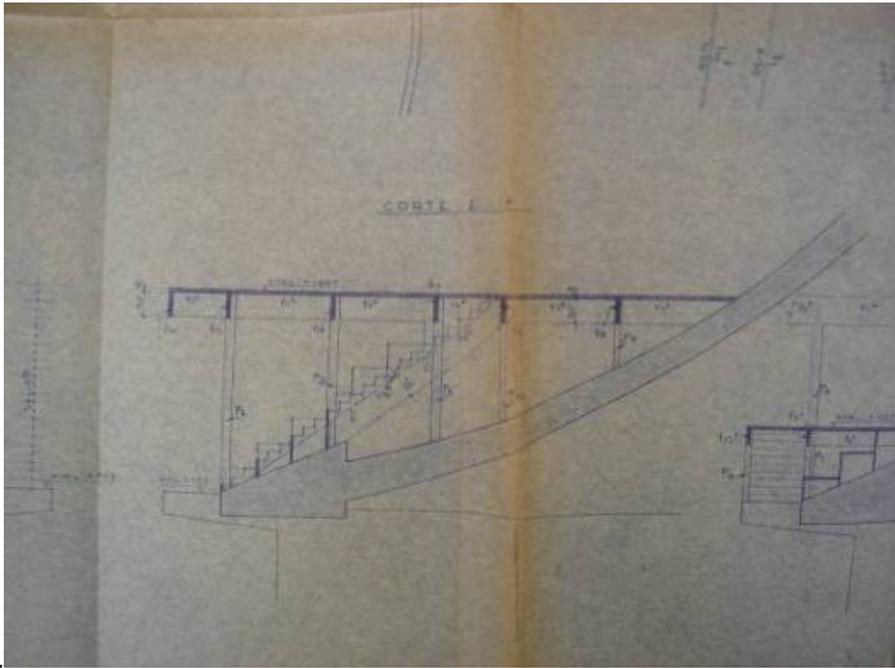


Figura 143: Corte Transversal da Câmara dos Deputados. Desenho do autor em Corel Draw, baseado em cópias dos desenhos estruturais originais do acervo da Câmara dos Deputados.



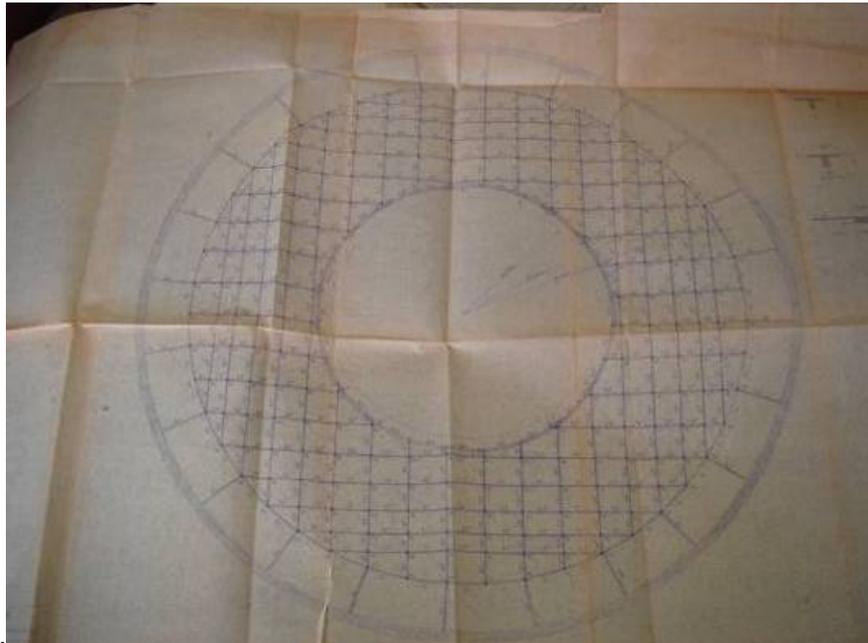
a.

CONCRETO

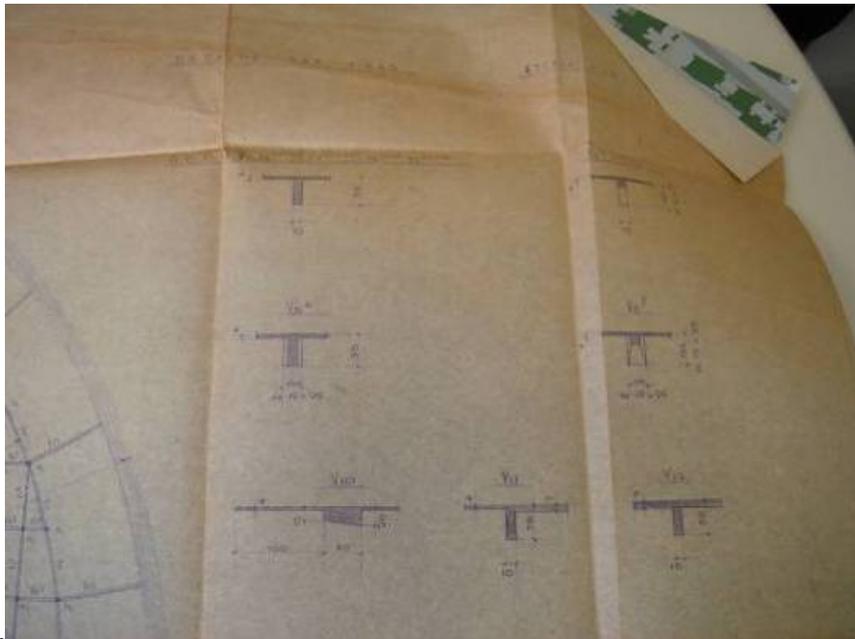
g. Dato
foa pulso d. g.

21. 11. 1955

b.



c.



d.

Figura 144: Imagens do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida. Fonte: Acervo da Câmara dos Deputados. Fotos do autor.

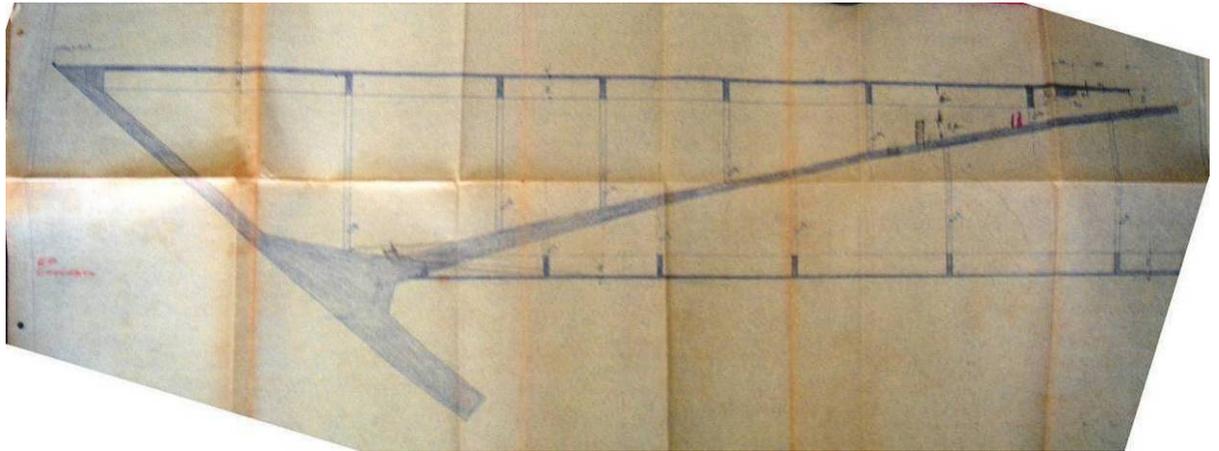


Figura 145: Detalhe do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida. Fonte: Acervo da Câmara dos Deputados.
Foto do autor

4.2.4. Análise do Sistema Estrutural

Para uma análise qualitativa do sistema estrutural da “cúpula invertida” da Câmara dos Deputados no Palácio do Congresso Nacional, tomaremos como ponto de partida o corte longitudinal (Figura 143), considerando o sistema engastado na base das cortinas de concreto e nos pilares no nível do Plenário, conforme desenho da figura 146.

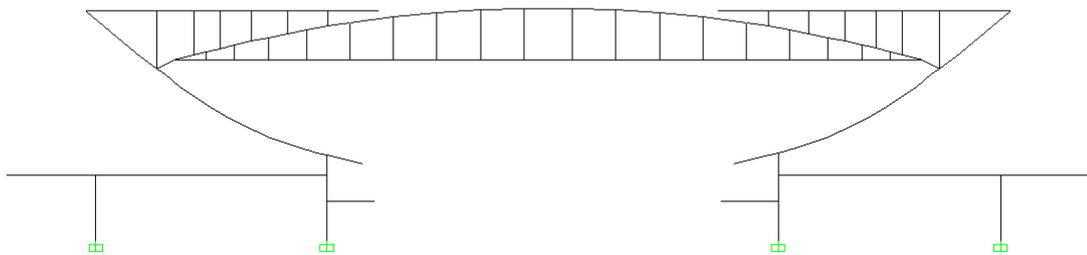


Figura 146: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

As dimensões adotadas (tabela 2) foram extraídas dos desenhos originais do acervo da Câmara dos Deputados e de medidas tomadas no local. Para a simplificação da análise em corte foi considerado um metro de largura para os elementos contínuos, que completam os 360 graus da Cúpula – as Cascas (primeira, segunda e terceira), os Anéis (inferior, intermediário e superior), o balanço da galeria e a cortina de concreto. Nos casos das duas lajes (forro e superior), que são estruturadas com um sistema de vigas em duas direções – como pode ser observado na figura 144 c e d. – foi considerada a altura das vigas (38cm).

Tabela 2: Dimensões da estrutura da Câmara dos Deputados levantadas para análise estrutural.

Elemento	A (m)	B (m)	Cor
1. Pilares Inferiores	1,10	0,40	Preto
2. Cortinas de Concreto	0,35	1,00	Azul
3.1. Vigas de Sustentação (trecho 1)	0,15	2,20	Cinza
3.2. Vigas de Sustentação (trecho 2)	0,15	1,50	Cinza
3.3. Vigas de Sustentação (trecho 3)	0,15	0,79	Cinza
4.1. Anel Inferior (trecho 1)	1,00	1,10	Verde Claro
4.2. Anel Inferior (trecho 2)	1,00	1,68	Verde
5. Primeira Casca	1,00	0,66	Verde Escuro
6.1. Anel Intermediário (trecho 1)	1,00	1,00	Amarelo
6.2. Anel Intermediário (trecho 2)	1,00	0,58	Vermelho
7. Segunda Casca	1,00	0,25	Marrom
8. Laje de Forro	0,12	0,38	Púrpura
9. Pilares da Laje de Forro	0,10	0,10	Rosa
10.1. Terceira Casca (trecho 1)	1,00	0,32	Azul Claro
10.2. Terceira Casca (trecho 2)	1,00	0,15	Ciano
11. Pilares Superiores	0,10	0,10	Rosa
12. Anel Superior	1,00	0,58	Amarelo
13. Laje Superior	0,12	0,38	Amarelo
14. Balanço da Galeria	1,00	0,40	Púrpura

A: Base (vigas e lajes) ou Lado A (pilares) B: Altura (vigas e lajes) ou Lado B (pilares)

Inserindo os dados da tabela 2 no programa SAP 2000 (versão 9), temos o desenho mostrado em perspectiva na figura 147:

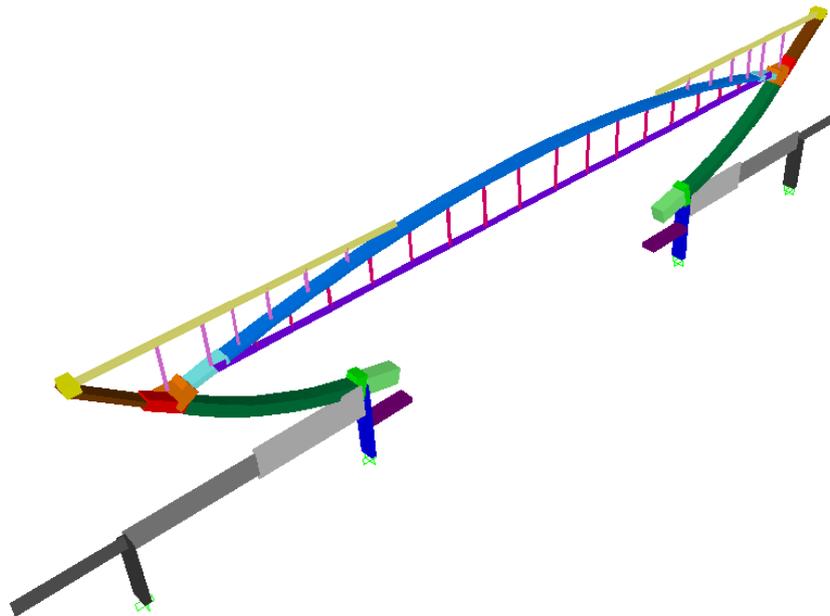


Figura 147: Perspectiva do sistema estrutural simplificado para análise no programa SAP 2000. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Utilizando o programa SAP 2000 para analisar o sistema estrutural montado, temos o seguinte diagrama de forças normais (Figura 148), que mostra que a Primeira Casca (base da Cúpula invertida) sofre grande compressão (vermelho) – 57tf no ponto indicado, assim como as Cortinas de concreto – 56tf no encontro da primeira casca com a cortina e 72tf na base, logo abaixo delas, onde está apoiado todo o sistema. Notamos também como essa compressão é bem menor na Segunda Casca (continuação da Cúpula) que tangencia essa primeira – 5,4tf no ponto indicado.

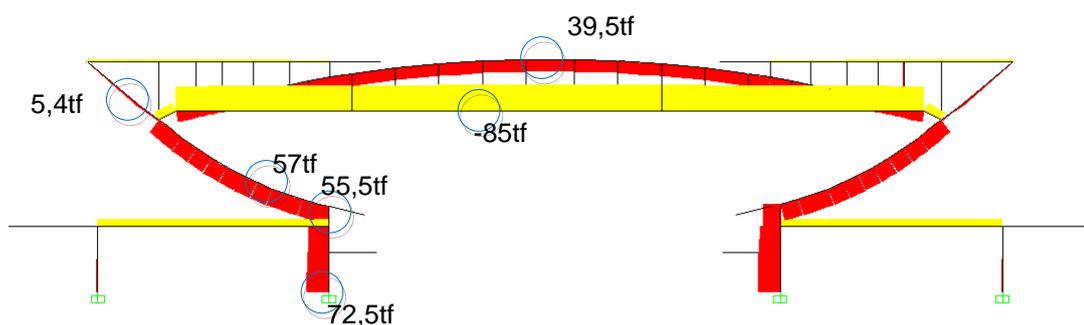


Figura 148: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Além disso, observamos que no sistema que compõe a cobertura (Laje de Forro, Terceira Casca, pilares e laje superior) existe compressão na cúpula formada pela Terceira Casca – 39,5tf no ponto central, que por sua vez sustenta a laje de forro que

apresenta uma tração praticamente constante em todo seu comprimento – -85tf . É interessante notar como os pilares de concreto entre a laje de forro e a terceira casca funcionam sob tração, como tirantes suportando o forro, já os pilares superiores, que tem as mesmas dimensões funcionam como pilares, sob compressão, apoiando a laje superior.

Na figura a seguir (Figura 149) temos o diagrama de momento fletor:

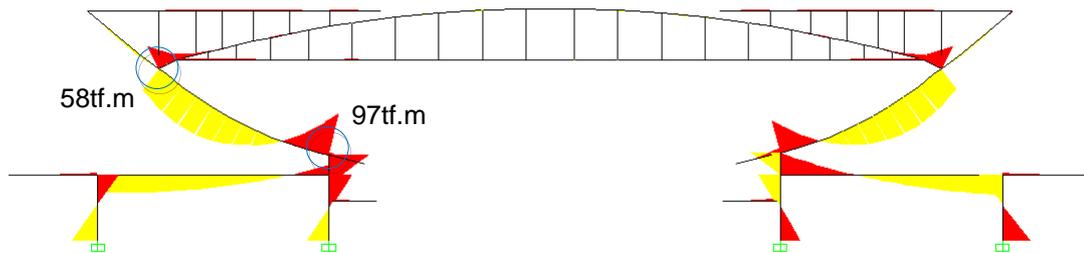


Figura 149: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Nesse diagrama notamos que a Primeira Casca apresenta um grande momento principalmente próximo ao engaste na base (Anel Inferior) – 97tf.m , já a segunda parte da Cúpula (Segunda Casca) não apresenta grande momento, pois esta faz parte do conjunto da cobertura, formado pela laje forro, terceira casca e pilares. Nesse sistema o momento é maior nos apoios (Anel Intermediário) – 58tf.m .

Analisando os deslocamentos apresentados pelo modelo observamos dois pontos críticos: na extremidade superior da estrutura, o ponto mais alto da cúpula invertida e o ponto central da laje forro, que recobre o salão do plenário.

Observando os resultados apresentados no programa SAP 2000 (Figura 150) temos que, no primeiro ponto os deslocamentos são 3cm na direção horizontal (X) e $9,5\text{cm}$ na direção vertical (Z). Já no segundo ponto o deslocamento na direção horizontal (X) é de $1,5\text{cm}$ e na direção vertical (Z) é de $21,8\text{cm}$.

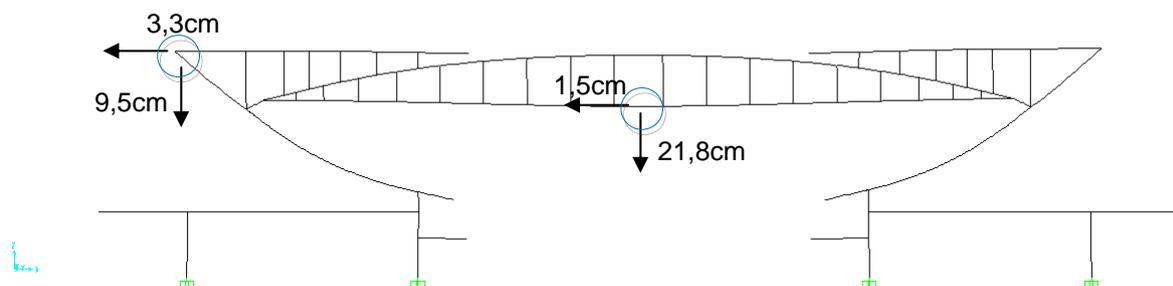


Figura 150: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Esses valores seriam bem menores se tomássemos o sistema estrutural completo em três dimensões, considerando que as cascas completas, com 360°, também ajudam a equilibrar o sistema, porém tomaremos esses valores como uma referência qualitativa para analisarmos a estrutura de forma comparativa. Como podemos observar nas Figuras 151 a 154, que mostram o sistema estrutural sem a cobertura, apenas com a primeira casca e a segunda casca soltas.



Figura 151: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados sem a estrutura da cobertura. Desenho do autor. Programa SAP 2000.



Figura 152: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

No Diagrama de Forças Normais (Figura 152) notamos que, as forças de compressão sobre a primeira casca e sobre a cortina de concreto na base do sistema estrutural são bem mais baixas que na análise do sistema inteiro, isso se deve a grande diminuição de peso próprio na estrutura.

Já o Diagrama de Momentos Fletores abaixo (Figura 153) mostra um aumento significativo no ponto de encontro da base da primeira casca com a laje inferior e a cortina de concreto, o momento nesse ponto é o dobro se comparado com o mesmo ponto no sistema inteiro – 185 tf.m, contra os 97tf.m.

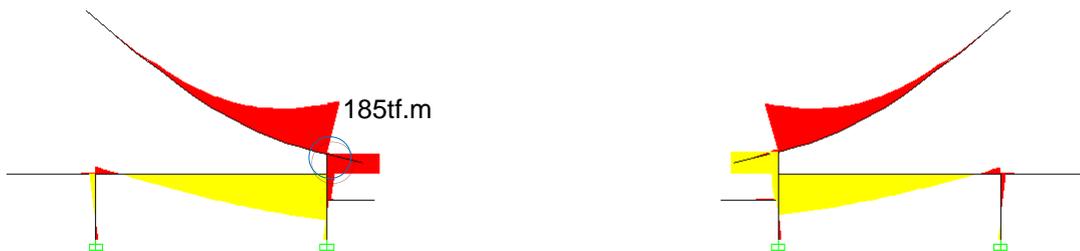


Figura 153: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Na Figura 154, podemos observar que o deslocamento da estrutura da primeira e segunda cascas sem a estrutura da cobertura é também significativamente maior que na primeira análise – 42 cm na direção horizontal (X) e 64cm na direção vertical (Z). O que evidencia que a cobertura da cúpula, principalmente a laje forro, de apenas 6cm de espessura tem uma importante função estrutural, como veremos a seguir.



Figura 154: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.

A cobertura da cúpula é responsável por diminuir o momento na base da cúpula invertida e diminuir o deslocamento em seu ponto mais extremo, evitando assim que a casca se abra. No corte que estamos analisando podemos observar que a Laje Forro, com apenas 6cm de espessura funciona com um tirante, já que no caso simplificado em questão estamos utilizando o desenho em apenas duas dimensões. Podemos chegar a essa conclusão ao observarmos os diagramas abaixo (Figuras 155 a 158) que mostram como reage a estrutura sem a Laje Forro:

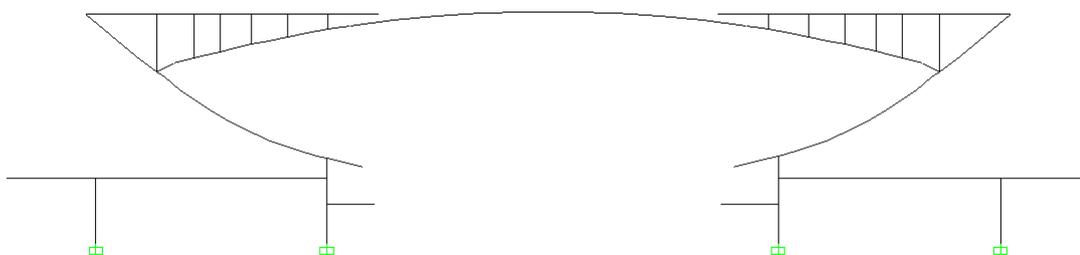


Figura 155: Corte esquemático transversal da Câmara dos Deputados sem a Laje Forro. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

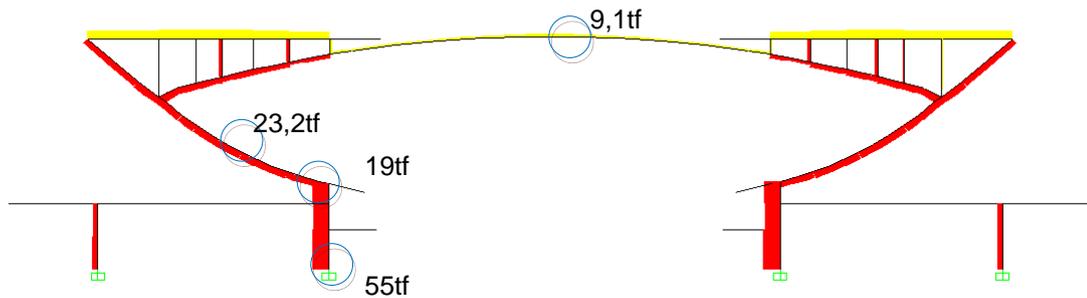


Figura 156: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

No Diagrama de Forças Normais acima (Figura 156) notamos uma pequena diminuição nas forças de compressão da primeira casca e na cortina de concreto que a suporta. Já na terceira casca (cúpula de cobertura) temos uma inversão, onde antes havia uma compressão podemos notar uma pequena tração – 9,1tf, o que indica que essa casca está tendendo a “segurar” a cúpula invertida, função que no diagrama completo era da laje forro.

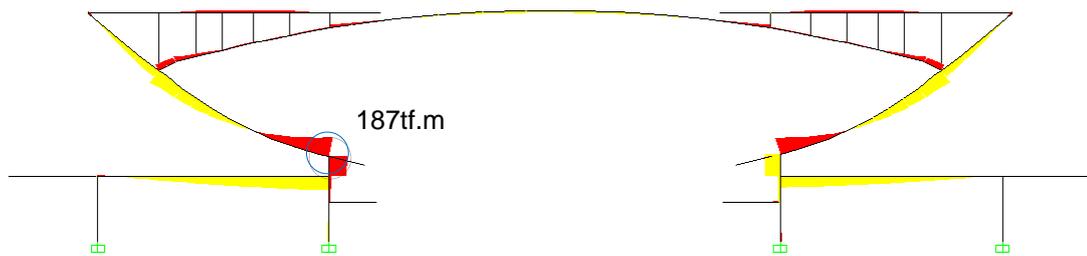


Figura 157: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

A Figura 157 mostra que o momento fletor na base da cúpula invertida não sofre grandes mudanças apenas com a estrutura de cobertura sem a laje forro em relação ao mesmo diagrama para o sistema completo (Figura 149), o que evidencia que esta é essencial para diminuição desse valor. Abaixo (Figura 158), no diagrama de deslocamentos, vemos que nos mesmos pontos medidos anteriormente os valores deslocamentos são bem altos. Na extremidade da cúpula invertida temos 21cm na direção X, horizontal e 38 na direção vertical (Z).

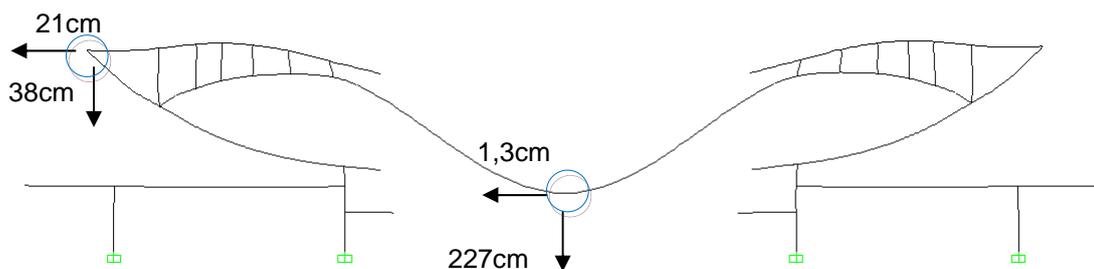


Figura 158: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Esse diagrama mostra também um enorme deslocamento da terceira casca (cúpula de cobertura) – 1,3cm na direção horizontal (X) e 227cm na direção vertical (Z). Esse deslocamento evidencia a importância do sistema estrutural que compõe a cobertura, com a Laje Forro, os Pilares da Laje Forro, a Terceira Casca (Cúpula de Cobertura) os pilares superiores e a Laje Superior.

Isolamos então essa parte da estrutura, fixando (engastados) os pontos de apoio do Anel Intermediário (Figuras 159 a 162):

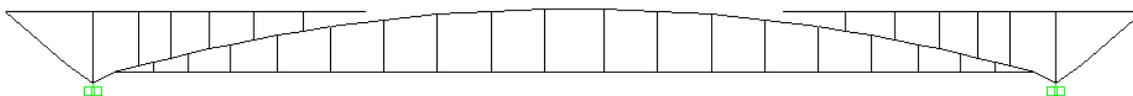


Figura 159: Corte esquemático transversal da Cobertura da Câmara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

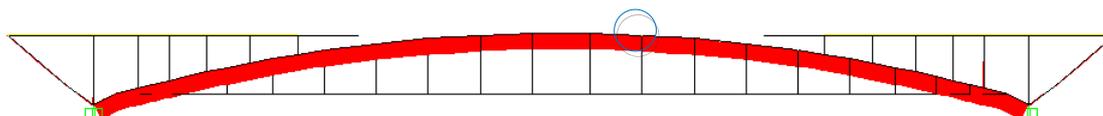


Figura 160: Diagrama de Forças Normais. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

O Diagrama de Forças Normais (Figura 160) mostra que o arco que representa a terceira casca apresenta compressão de 45tf, similar ao observado no sistema completo. Já o diagrama de Momento Fletor (Figura 161) mostra que, isolando a cobertura os valores de momento apresentados são bem menores que os observados nos diagramas anteriores, com a estrutura completa, e se concentram na base de apoio do “arco” (terceira casca) e do “tirante” (Laje Forro).

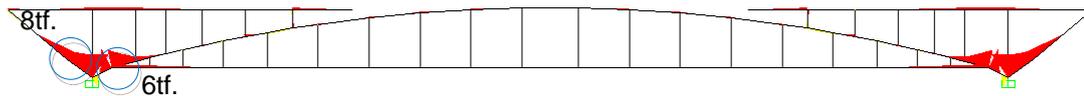


Figura 161: Diagrama de Momento Fletor. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

O Diagrama de Deformações abaixo (Figura 162) mostra que os deslocamentos nessa parte isolada da estrutura são quase desprezíveis.

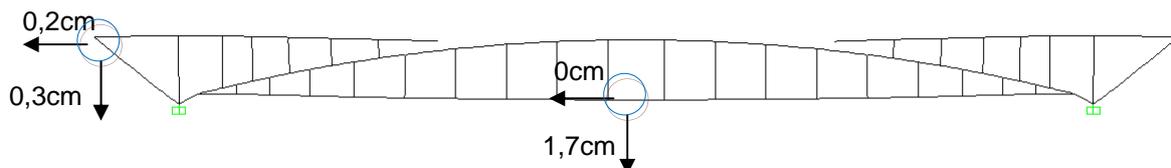


Figura 162: Diagrama de Deslocamento Elástico (esc. 5x). Desenho do autor. Programa SAP 2000.

É impossível não notar a semelhança do sistema estrutural da cobertura da Cúpula Invertida com o sistema estrutural de uma ponte. Na montagem feita na Figura 163, vemos esta semelhança nas proporções – arco, vão e apoios – ilustrada na foto da Ponte Salginatobel, situada em Schiers na Suíça, projetada em 1930 por Robert Maillart, engenheiro conhecido pela construção de mais de 47 pontes relevantes, das quais apenas 3 não estão em funcionamento (SANCHEZ, notas de aula, 2007).

Nesse caso, comparamos o corte da Cúpula com uma ponte classificada como de Sistema de Arco Sob Tabuleiro (LOPEZ, 2006), pois imaginamos a Laje Superior como sendo o tabuleiro da ponte, que se apóia sobre o arco, transferindo os esforços de compressão até o ponto de apoio, nesse caso o Anel de Apoio.



Figura 163: Foto-montagem. Corte da Cúpula da Câmara do Congresso Nacional sobre imagem da Ponte Salginatobel de Robert Maillart. Foto-montagem do autor.

Se tomarmos a Laje Forro como sendo o tabuleiro da ponte, a estrutura se assemelha a uma ponte pendurada (segundo definição de LOPEZ, 2006), como a Ponte Lusitânia, do engenheiro-arquiteto Santiago Calatrava de 1991 em Mérida, na Espanha. Nesse modelo os esforços nos apoios do tabuleiro se invertem, a compressão passa a ser tração, a mesma diferença observada entre os pilares superiores que sustentam a laje superior e os pilares-tirantes que sustentam a laje forro na cobertura da Cúpula Invertida.



Figura 164: Ponte Lusitânia, Mérida, Espanha (1991) de Santiago Calatrava. Fonte: Panorâmico

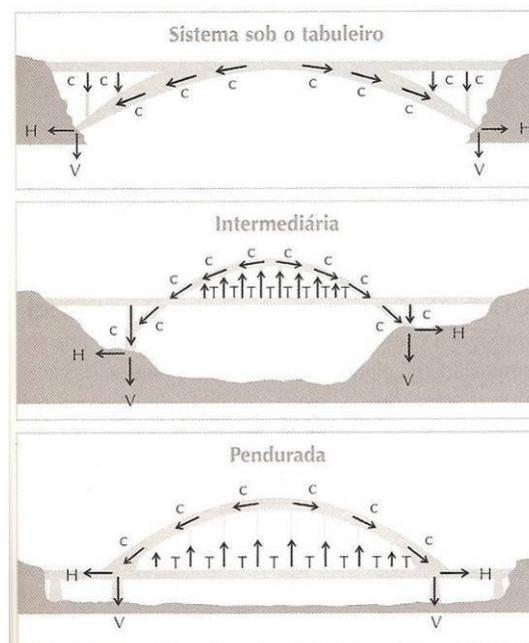


Figura 165: Classificação dos Sistemas Estruturais de Pontes em Arcos. Fonte: “Arquiteturas da Engenharia ou Engenharia das Arquiteturas”, João Marcos Lopes, Maria Bogéa e Yopana Rebello, Pág. 111 – 2006.

Ainda com base nos dados coletados na tabela 2, podemos analisar a estrutura da Cúpula Invertida do Congresso Nacional de forma mais completa, considerando assim a tridimensionalidade das cascas de concreto e sua influência no sistema estrutural e no resultado final da forma arquitetônica.

A figura 166 abaixo mostra o sistema estrutural completo da cúpula invertida, na sequência temos passo a passo a construção do modelo estrutural no programa SAP 2000 (Figura 167).

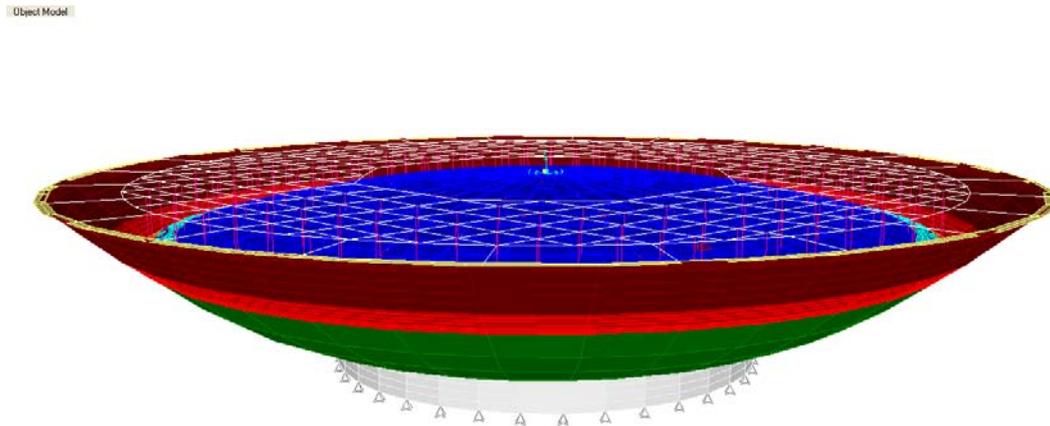


Figura 166: Sistema Estrutural completo da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados. Desenho do autor.
Programa SAP 2000.

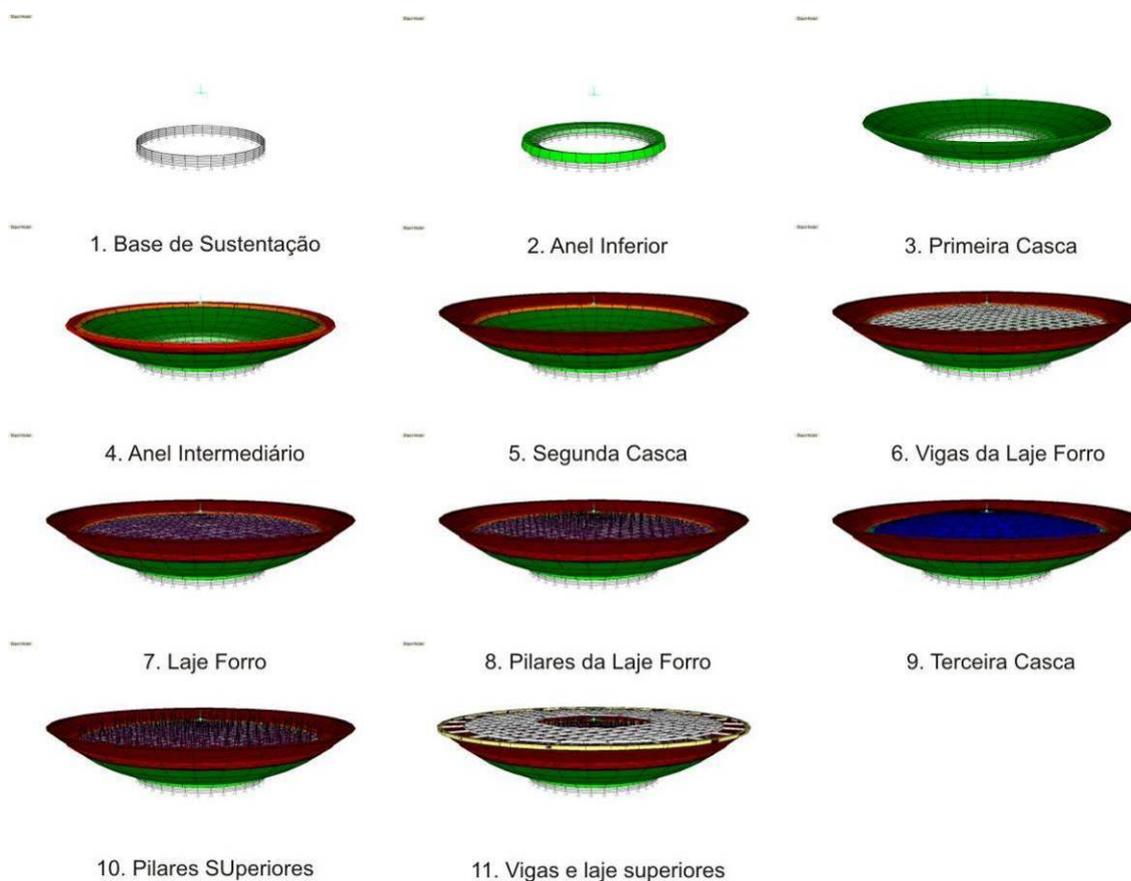


Figura 167: Montagem passo a passo do sistema estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados.
Desenhos do autor. Programa SAP 2000.

Podemos observar no diagrama de Forças Normais do sistema completo (Figura 168) a mesma concentração de forças (região mais azulada) na primeira casca, base da cúpula invertida, da mesma forma que no sistema simplificado esses esforços são bem menores na região da segunda casca (verde), que tangencia a primeira no ponto onde se encontra o anel intermediário. Podemos notar também que os valores observados no sistema completo são menores que os obtidos no corte simplificado, pois a tridimensionalidade do sistema estrutural contribuiu para o resultado final.

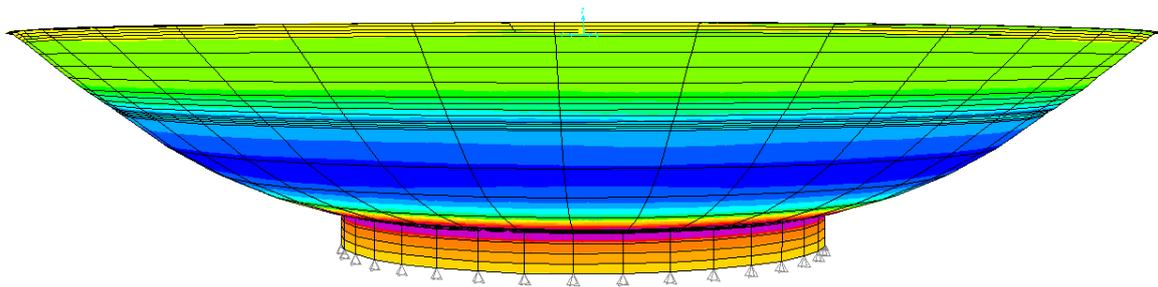


Figura 168: Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida da Camara dos Deputados – Vista externa das cascas de concreto. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

A figura abaixo (Figura 169) também mostra o diagrama de forças normais, porém de uma vista diferente, mostrando os esforços na Laje Forro. Podemos assim observar as forças atuantes nessa laje e a concentração de esforços no anel intermediário.

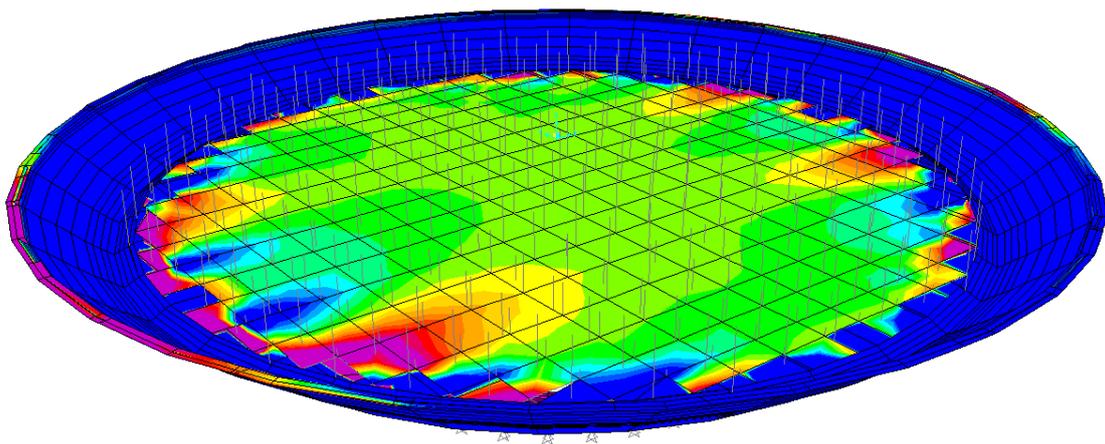


Figura 169: Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida da Camara dos Deputados – Vista interna, laje forro. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Na seqüência (Figura 170) temos em destaque o diagrama de Forças Normais dos tirantes da laje forro e pilares superiores, onde notamos que os primeiros, tirantes da laje forro sob a cúpula de cobertura, estão sob tração (amarelo), para suportar a laje forro. Já os pilares superiores, apoiados na cúpula, estão sob tração, suportando a laje superior.

Analysis Model

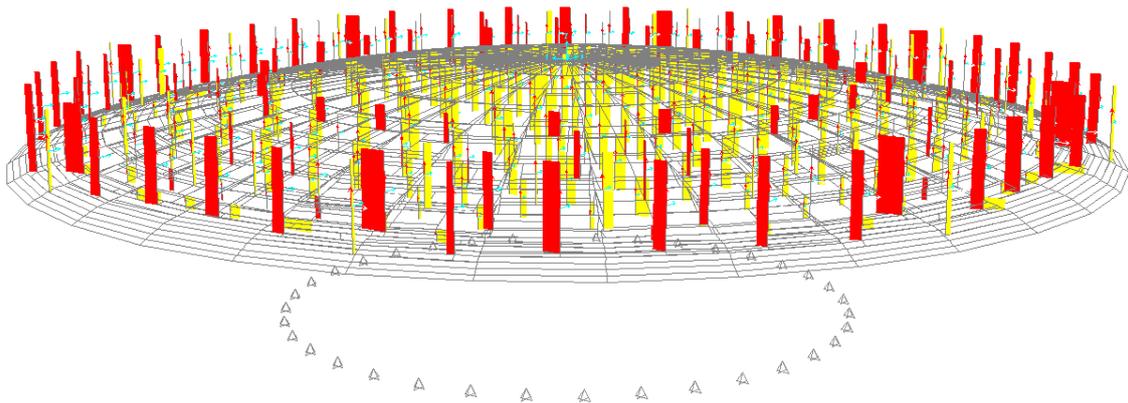


Figura 170: Diagrama de Forças Normais dos pilares da laje forro (tirantes) e os pilares superiores. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

As figuras seguintes (Figuras 171 e 172) mostram os diagramas de Momento Fletor nas direções X e Y, respectivamente. Nesses diagramas podemos observar que o momento é maior na primeira casca (de lilás para vermelho) e que diminui consideravelmente na segunda casca (amarelo).

Notamos também que o momento aumenta consideravelmente próximo ao encontro das duas cascas (azul), onde está o anel intermediário e também na base na primeira casca (lilás), onde essa encontra-se com o anel inferior. Na figura 173, temos uma vista interna do diagrama de momento fletor, onde podemos verificar melhor o momento nos aneis inferior e intermediário.

Analysis Model

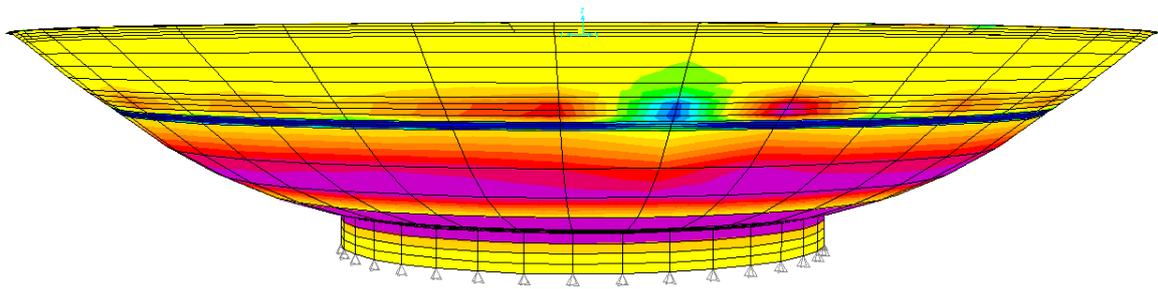


Figura 171: Diagrama de Momento Fletor na direção X. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados.
Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Analysis Model

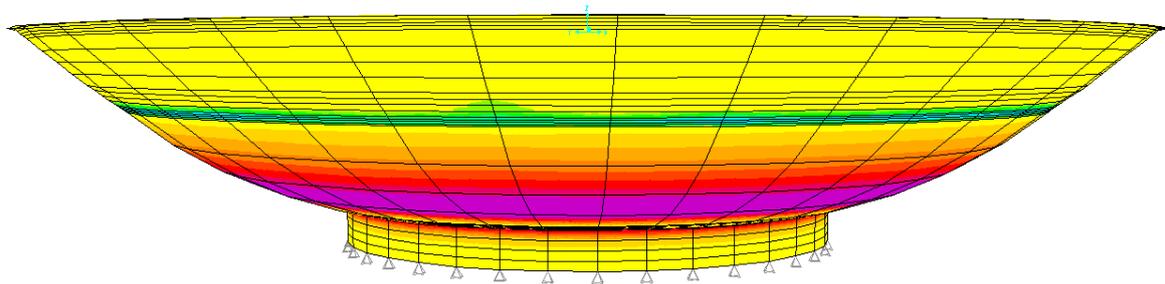


Figura 172: Diagrama de Momento Fletor na direção Y. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados.
Desenho do autor. Programa SAP 2000.

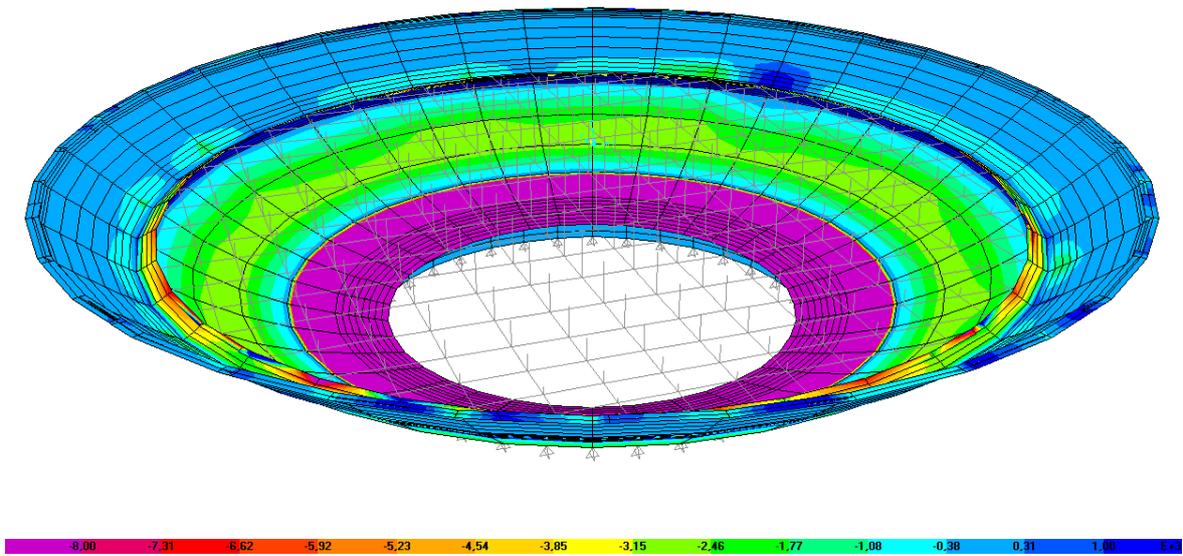


Figura 173: Diagrama de Momento Fletor vista interna. Anéis inferior e intermediário. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Nas figuras 174 e 175 temos os diagramas de Momento Fletor para as vigas da laje forro e para as vigas da laje superior (de cobertura). Nesses diagramas notamos que os resultados obtidos com o sistema estrutural completo, em três dimensões são condizentes com os resultados obtidos no corte simplificado vistos anteriormente.

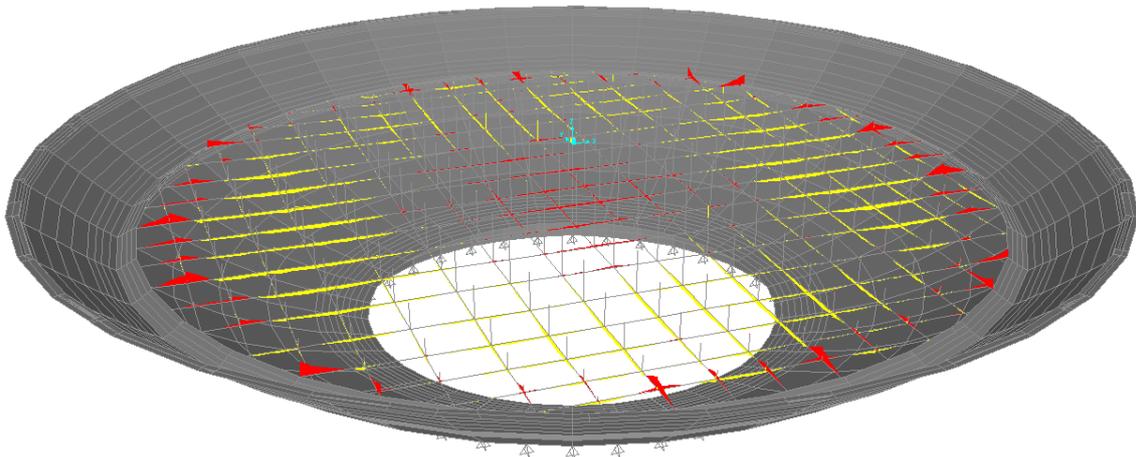


Figura 174: Diagrama de Momento Fletor nas vigas da laje forro. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

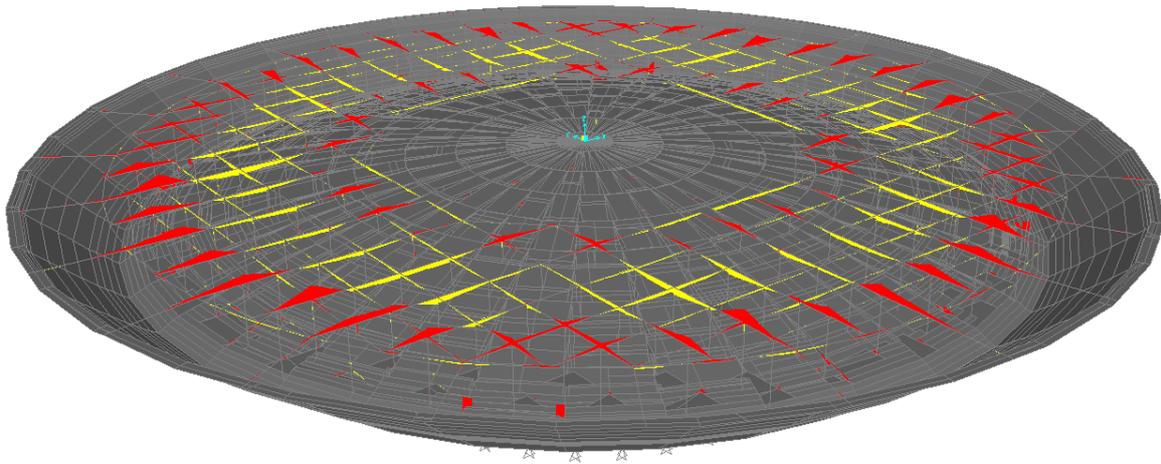


Figura 175: Diagrama de Momento Fletor nas vigas da laje superior. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

Por último, podemos observar no diagrama de deslocamentos na figura 176, que os deslocamentos no sistema estrutural completo são ainda menores que os observados no corte simplificado. No ponto extremo do anel superior (indicado na figura) o deslocamento é de 1,5cm enquanto que no sistema simplificado era de 9,5cm. Já na laje forro o deslocamento na direção y era de 21,8cm no sistema simplificado e com o sistema completo é de apenas 4,9cm, praticamente desprezível para um vão de mais de 60m de diâmetro. Isso ocorre, conforme visto, pois a forma e a tridimensionalidade do sistema estrutural influenciam diretamente no resultado obtido.

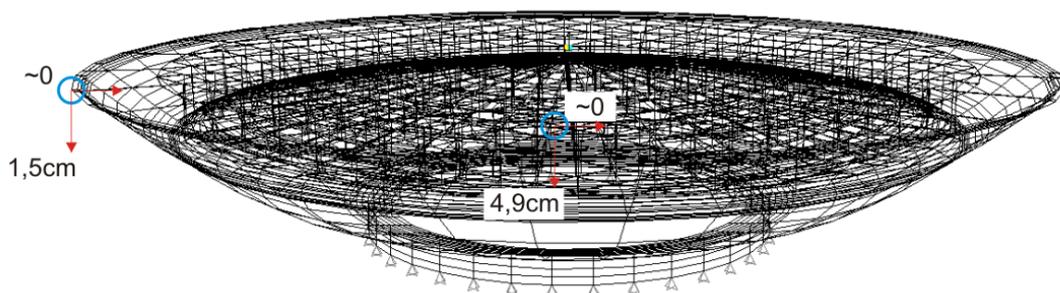


Figura 176: Diagrama de Deslocamento Elástico. Cúpula Invertida da Camara dos Deputados. Desenho do autor. Programa SAP 2000.

CONCLUSÃO

Oscar Niemeyer sempre mostrou em suas obras, inclusive no seu processo criativo, que a arquitetura e a estrutura nascem juntas, não são elementos distintos da construção. Apesar dessa estreita relação entre arquitetura e estrutura nos projetos de Niemeyer, o que se vê na maioria dos casos entre arquitetos e engenheiros é uma distância muito grande. Arquitetos que projetam sem entender a estrutura que suportará a forma sugerida e engenheiros que não demonstram atrativo estético em seus trabalhos.

É nesse contexto que esse trabalho procurou mostrar a importância do sistema estrutural na monumentalidade e no arrojo da arquitetura de Niemeyer. Além disso, podemos notar por meio da análise de importantes obras arquitetônicas nacionais e internacionais que a estrutura muitas vezes é o elemento definidor da forma arquitetônica.

A carreira do arquiteto Oscar Niemeyer é marcada pela influência de importantes nomes da arquitetura nacional e internacional, como Lúcio Costa, a primeira pessoa a lhe oferecer uma oportunidade de fazer arquitetura, e que, além disso, oportunizou o encontro de Niemeyer com Le Corbusier, o grande mestre do modernismo, com quem aprendeu os principais conceitos da arquitetura moderna que ele mais tarde ajudou a revolucionar.

Outra figura de grande importância na vida e na carreira de Oscar Niemeyer foi Juscelino Kubitschek, que possibilitou ao arquiteto desenvolver grandes projetos com uma liberdade de criação que permitiu o surgimento dos monumentos arquitetônicos que tronaram a arquitetura de Niemeyer e a arquitetura moderna brasileira conhecidas no mundo todo.

Os trabalhos de Niemeyer sempre foram marcados pelo arrojo estrutural e pelo desafio tecnológico que esse arrojo proporcionava a seus calculistas. Sempre levando o concreto armado ao limite técnico permitido em cada época, Niemeyer teve uma relação muito especial com os engenheiros calculistas que acompanharam sua carreira.

Os engenheiros que trabalharam com Niemeyer também exerceram um importante papel na formação do arquiteto, conseguindo soluções estruturais inéditas em diversas épocas para possibilitar a realização da inventividade formal da arquitetura de Niemeyer. E, como o próprio arquiteto diz, Niemeyer teve a sorte de trabalhar com grandes nomes da engenharia nacional, como Emílio Baumgart, Bruno Contarini, Joaquim Cardozo e José Carlos Sussekind. Com eles o arquiteto pode levar ao mundo os avanços tecnológicos que a construção civil nacional fazia, e ainda faz, por intermédio de sua arquitetura.

Por meio do estudo de obras marcantes na arquitetura nacional e internacional foi possível observar a importância do conhecimento técnico e do sistema estrutural para a realização de uma arquitetura de boa qualidade.

Desde a arquitetura gótica da catedral de Notre Dame, na França, com seus arcos funiculares, transferindo os esforços para os apoios pelo caminho mais natural, e passando pela construção das mais importantes pontes pelo mundo, pode-se observar a aproximação da estrutura ao resultado formal e do espaço arquitetônico.

A arquitetura moderna brasileira também é marcada por grandes obras arquitetônicas nas quais é notável a busca da aplicação do conhecimento técnico na construção e a exploração da estrutura como elemento plástico. Surgem nesse período da arquitetura brasileira, arquitetos que valorizam a estrutura como elemento gerador do espaço.

Entre esses arquitetos destacamos, além de Oscar Niemeyer, Vilanova Artigas que soube como poucos explorar as possibilidades do concreto armado em grandes empenas e lajes nervuradas; Paulo Mendes da Rocha, também consagrado com o Prêmio Pritzker, que exhibe grande conhecimento técnico em suas obras e João Filgueiras Lima, o Lelé, que propõe uma arquitetura racional, baseada na lógica estrutural e construtiva.

Além desses, vale destacar também o trabalho de Affonso Reidy, arquiteto de grande importância na arquitetura moderna brasileira. Suas obras, como o Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, também exploram o sistema estrutural de forma que a estrutura seja o elemento de maior destaque no resultado estético. No caso do Museu, o elemento definidor da arquitetura é a estrutura dos pórticos e os pilares em “V” que apóiam o corpo principal do conjunto.

Na arquitetura de Oscar Niemeyer a relação com a técnica é ainda mais evidente. Para que o arquiteto pudesse criar as formas livres, simples e puras, presentes em sua obra, Niemeyer sempre procurou um apuro tecnológico e uma solução estrutural inovadora, mas que, obedecendo sempre a lógica natural, consegue atingir os limites máximos dos materiais utilizados. Em Brasília, onde o próprio Niemeyer diz ter valorizado o trabalho dos engenheiros, essa relação é ainda mais evidente.

Em diversas ocasiões Niemeyer utiliza seu vasto conhecimento técnico para garantir uma leveza arquitetônica marcante em sua obra. Isso é notado nas colunas dos palácios de Brasília. Através de soluções estruturais e utilizando o sistema estrutural a favor do resultado estético, Niemeyer conseguiu pontos de apoio mínimos nas colunas externas, que fazem com que os palácios aparentem não ter quase nenhum peso e apenas tocarem levemente o solo.

Na Catedral de Brasília, a estrutura complexa e inovadora, bastou para definir uma forma arquitetônica inédita que destacou a arquitetura e a engenharia brasileira no cenário internacional. Segundo Niemeyer, a função dessa obra extrapola a função social de uma catedral, ela também expressa o potencial tecnológico de uma época, função comum das grandes catedrais do mundo.

Em várias de suas obras é possível ver, de forma explícita, a presença do sistema estrutural na forma arquitetônica. É o caso das coberturas do Touring Clube em Brasília e no anexo do late Clube da Pampulha, em Belo Horizonte, em que o desenho das vigas é praticamente igual ao desenho do gráfico de momento fletor para aquela estrutura. Essa relação também pode ser vista na Ponte Costa e Silva em Brasília, única ponte construída projetada pelo arquiteto.

A presença definidora do sistema estrutural continua acompanhando os trabalhos mais recentes de Oscar Niemeyer, que explora com muito mais simplicidade e experiência os limites e as possibilidades do concreto armado. O Museu Nacional, em Brasília, construído em 2006 é um exemplo disso. Sua forma plástica é definida diretamente por uma cúpula.

Além da cúpula, Niemeyer utilizou outros elementos estruturais para valorizar a arquitetura interna e externa do Museu Nacional. Externamente, chama a atenção, a grande rampa em balanço que une os dois pavimentos internos através de um “passeio” pela exuberante paisagem da explanada dos Ministérios. Internamente, tem-se um grande vão livre com 80 metros de diâmetro conseguidos através da sustentação do mezanino por tirantes fixados na própria cúpula de cobertura.

Dentre as obras de Oscar Niemeyer em Brasília foram destacados para este trabalho dois estudos de caso. O primeiro, a Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, apresenta uma estrutura simples, que define por completo a arquitetura da pequena capela e por isso torna-se um exemplo interessante para o estudo da influência do sistema estrutural da obra de Oscar Niemeyer.

O segundo, a Cúpula invertida da Câmara dos Deputados é um a forma inusitada, a inversão de uma forma reconhecida naturalmente, a cúpula, que causa no observador a surpresa, tão importante para Niemeyer em uma arquitetura de boa qualidade. Essa forma foi um grande desafio estrutural para Joaquim Cardozo, que utilizou várias soluções estruturais para viabilizar mais essa inovação.

Com a revisão bibliográfica do contexto histórico da construção da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima podemos reconhecer como o arquiteto se valeu de uma solução estrutural precisa para dar forma a uma arquitetura marcante e bela com a rapidez construtiva que a situação solicitava. Analisando os projetos originais podemos

reconhecer como Niemeyer consegue, através de poucos elementos estruturais, um resultado plástico e arquitetônico expressivo e marcante.

Com base nos dados coletados temos como descrever com precisão a estrutura da Igrejinha e assim pudemos analisar essa estrutura em vários aspectos com o auxílio de ferramentas computacionais, como o programa SAP 2000, utilizado nesse estudo de caso.

Por meio das análises feitas no programa computacional, podemos destacar a função estrutural de cada elemento que visualmente tem grande função estética. Também é possível concluir que, como no caso dos pilares e na espessura variável da cobertura, o sistema estrutural é o elemento que define a forma final da Igrejinha.

No caso da cúpula invertida do Congresso Nacional, o levantamento histórico da construção nos levou a entender a importância do edifício no cenário da época. Essa importância é espelhada na monumentalidade arquitetônica conseguida por Niemeyer através de uma estrutura complexa, que dá à cúpula invertida uma leveza impressionante, como se estivesse apenas pousada sobre a laje do Congresso, conforme queria o arquiteto.

Mais uma vez, pela análise de dados primários levantados a partir das plantas originais da obra, no acervo da própria Câmara dos Deputados, conseguimos descrever com precisão o complexo sistema estrutural da cúpula invertida.

Essa cúpula é formada pela sobreposição de três cascas de concreto fortemente armado. A primeira, um elipsóide de revolução limitado abaixo do equador onde é apoiada, exatamente no ponto de tangência, a segunda, uma superfície de tronco invertido. Nesse ponto de tangência, reforçado por um anel de concreto apóia-se uma terceira casca, essa uma calota esférica côncava que serve de cobertura e também para sustentar o forro de concreto e a laje superior, que dá o acabamento final na forma inédita na arquitetura mundial da época.

Com a definição de cada elemento estrutural e suas dimensões reais, conseguidas através da análise dos projetos e de medições no local, foi possível desenvolver um modelo computacional com o auxílio do programa SAP 2000 com o qual pudemos extrair diversos dados para análise estrutural da cúpula invertida.

Através da comparação do sistema estrutural da cúpula em diversas situações diferentes, foi possível identificar a função estrutural de cada elemento, conseguindo assim analisar o método utilizado pelo engenheiro nesse projeto.

Em seguida, com um modelo completo do sistema estrutural da cúpula invertida, foi possível observar como o conjunto de soluções idealizadas por Joaquim Cardozo tornaram viável uma estrutura inédita. Além disso, com esse modelo foi possível coletar dados que nos permitiram analisar como as escolhas corretas dessas soluções ajudaram

tanto o engenheiro e o arquiteto a produzirem um resultado estético monumental e inovador.

Essas análises, tanto históricas quanto técnicas de grandes obras de Oscar Niemeyer, e também da arquitetura nacional, contribuem para um entendimento da importância do conhecimento técnico e tecnológico para a produção de uma arquitetura de boa qualidade.

Fica aqui a sugestão para outros trabalhos, que com o mesmo enfoque técnico, possam consagrar a grande contribuição tecnológica que os profissionais, grandes arquitetos e engenheiros brasileiros, tiveram para o desenvolvimento da construção civil no Brasil e no mundo.

BIBLIOGRAFIA

AGRIPINO, Maria Amélia; FRONER, Yacy Ara – **Athos de Brasília: Uma Experiência Singular**. DEART-UFU – Departamento de Artes da Universidade Federal de Uberlândia. 2004.

ANDRÉ, Ricardo Marcel Mansano - **Cúpula da Câmara dos Deputados, Harmonia – Estrutura**. UnB - FAU– PPG, Tecnologia das Estruturas Aplicada à Arquitetura. 2007

CAMPOS, João – **Da Idéia ao Traço do Professor Niemeyer**. Revista Darcy, nº 3, Novembro e Dezembro de 2009, UnB. Brasília, p. 56- 66.

CARDOZO, Joaquim – **Dois episódios na história da arquitetura moderna brasileira**. Revista Módulo, nº 4, PP. 32-36. Março de 1965. Reeditado em www.joaquimcardozo.com -Rede de Idéias – 2004.

CARDOZO, Joaquim – **A construção de Brasília**. www.joaquimcardozo.com - Rede de Idéias – s.d.

CASTELLOTTI, Flavio. **Arquitetura Moderna no Rio de Janeiro a dimensão brutalista**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: Gustavo Rocha-Peixoto. Rio de Janeiro, 2006.

CASTRO, Bruna. **Ministério da Educação e Cultura – MEC (1936-1942)**, em Monólito – ensaios arquiteturais. Unifev. Outubro de 2009.

DANTAS, Maria da Paz Ribeiro – **Joaquim Cardozo contemporâneo do futuro**. Ensol Editora – 2004.

FARIA, Francisco. **Oscar Niemeyer: O Espetáculo Arquitetural: Caderno dos Instrutores**. MON – O Olhar do Aprendiz. Curitiba – PR. Museu Oscar Niemeyer, 2007.

FONSECA, Régis Pamponet da. **A Estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos Históricos, Científicos e Tecnológicos de Projeto, Execução, Intervenções e Proposta de Estratégias para Manutenção**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2007.

FONSECA, Roger Pamponet da. **A Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: Construção, Forma e Função Estrutural**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2007.

GALLINDO, Cyl. **Joaquim Cardozo**. www.joaquimcardozo.com - Rede de Idéias – 2004.

KISS, Paulo. **De um Mestre para Outro**. Revista Thechne - www.revistatechne.com.br, nº 154, Janeiro de 2010.

LEAL, Edite Antão de M. – **Igrejinha Cinquenta Anos**. Igrejinha e Santuário de Fátima *em* (www.igrejinhadefatima.org). 2008

LOPES, João Marcos; BOGÉA, Marta; REBELLO, Yopanan. **Arquitetura da Engenharia, ou, Engenharia da Arquitetura**. Editora Mandarim. São Paulo, SP, 2006.

LOTURCO, Bruno. **Carreira - Bruno Contarini**. Revista Thechne - www.revistatechne.com.br, nº 106, Janeiro de 2006.

LOTURCO, Bruno. **Carreira – José Carlos Sussekind**. Revista Thechne - www.revistatechne.com.br, nº 120, Março de 2007.

MEYER, Regina Maria Prosperi. **Urbanismo – A construção de Brasília**. *em* Brasil em Foco – CD-ROM e Internet, acessado em 20 de Janeiro de 2008 (www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/index.htm). 2007

MACIEL, Carlos Alberto. **Técnica moderna: entre o monumento e a construção cotidiana**. In: Revista Mínimo Denominador Comum – Revista de Arquitetura e Urbanismo, Ano 1 N. 3, Março de 2006. pp. 22- 24.

MOREIRA, André Luis Andrade. **A Estrutura do Palácio da Justiça em Brasília: Aspectos Históricos, Científicos e Tecnológicos de Projeto, Execução, Intervenções e Proposta de Estratégias para Manutenção.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2007.

MÜLLER, Fábio. **Catedral de Brasília, 1958-70: Redução e Redenção;** in: *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 10, n. 11, p. 9-33, Belo Horizonte, MG, 2003.

NIEMEYER, Oscar. **As Curvas do Tempo - Memórias.** Editora Revan, 2000, 7ª edição, Rio de Janeiro, Outubro de 2000.

NIEMEYER, Oscar. **Minha Arquitetura.** Editora Revan, 2000, 3ª edição, Rio de Janeiro, Dezembro de 2000.

NIEMEYER, Oscar. **Oscar Niemeyer - Minha Arquitetura 1937-2004.** Editora Revan. Rio de Janeiro, RJ. 2004

OHTAKE, Ricardo. **No Dia a Dia.** Revista AU, Editora PINI, ano 3, n. 15, p. 25-27, São Paulo, SP, 1987.

OHTAKE, Ricardo. Oscar Niemeyer. Folha Explica. Publifolha, 2007.

PESSOA, Diogo Fagundes. **A Estrutura da Catedral de Brasília: Aspectos Históricos, Científicos e Tecnológicos de Projeto, Execução, Intervenções e Proposta de Estratégias para Manutenção.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2002.

PESSOA, Diogo Fagundes; TEATINI, João Carlos. **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. **As Formas Estruturais na Arquitetura de Brasília: Uma Saga Tecnológica.** Paranoá eletrônico ISSN 1679-0944, http://www.unb.br/fau/pos_graduacao/paranoa/paranoa.htm , Volume 9, 23 de Abril de 2007.

REBELLO, Y. C. P. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura**. Ziguarte, 2000, São Paulo.

SABBAG, Haifa Y. ... e **Fez-se a Obra. De Concreto e Emoção**. Revista AU, Editora PINI, ano 3, n. 15, p. 43-55, São Paulo, SP, 1987.

SÁNCHEZ, José Manoel Morales. **Notas de aula** - curso de Mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília PPG-FAU – 2007.

SANTA CECÍLIA, Bruno. **Tectônica moderna e construção nacional**. In: Revista Mínimo Denominador Comum – Revista de Arquitetura e Urbanismo, Ano 1 N. 1, Janeiro de 2006. pp. 6- 9.

SANTANA, Geraldo. **Joaquim Cardozo 1897-1978 – O Engenheiro da Poesia**. Revista AU, Editora PINI, São Paulo, SP, 1998.

SANTOS, Ana Maria Ribeiro dos; NUNES, Benevina Maria Vilar Teixeira; NOGUEIRA, Lídy Tolstenko; MOURA, Maria Eliete Batista; VASCONCELOS, Meire Raquel P. **A atuação da irmã de caridade Abrahíde Alvarenga no Piauí: uma história a ser contada**. Texto contexto - Enfermagem vol.14 no.4. Florianópolis. Out./Dez. 2005

SANTOS, Evaristo C. Rezende; TEATINI, João Carlos; NEPOMUCENO, Antônio Alberto. **A Estrutura do Palácio do Itamaraty em Brasília: Aspectos Históricos e Tecnológicos de Projeto, Execução, Intervenções e Manutenção**. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Volume 7, No. 2, 2007. p. 229-238.

SEGRE, Roberto; SERAPIÃO, Fernando; SANTOS, Daniela Ortiz dos; SOUZA, Thiago Leitão de. **O resgate da unidade perdida: o Teatro do Museu de Arte Moderna de Affonso Eduardo Reidy**. Anais do 7º. Seminário *Do_Co, Mo. Mo_brasil*. Porto Alegre, 22 a 24 de Julho de 2007.

SERAPIÃO, Fernando. **Jogo dos Sete Erros**. In: Revista Piauí, Ano 2 N. 8, Setembro de 2007. pp. 60- 64.

SERAPIÃO, Fernando. **Museu Nacional Honestino Guimarães, Brasília**. Revista Projeto Design, edição 326 Abril de 2007.

SILVA, D. M., SOUTO, A. K. **Estruturas Uma Abordagem Arquitetônica**. Ed. Sagra Luzzatto, Porto Alegre, 2000.

SUSSEKIND, José Carlos; NIEMEYER, Oscar. **Conversa de Amigos: correspondências entre Oscar Niemeyer e José Carlos Sussekind**. Ed. Revan, 2002, Rio de Janeiro.

TAMARIMI, Fernando Lourenço. **História da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima**. Instituto Histórico e Geográfico do DF. 1997.

TEATINI, João Carlos; MOREIRA, André; Mello, Eldon Londe. **A estrutura da cúpula da Câmara dos Deputados em Brasília**. In: Forma Estática – Forma Estética, Ensaios de Joaquim Cardozo sobre arquitetura e engenharia. Câmara dos Deputados, Edições Câmara, Brasília DF, 2009.

THOMAZ, Eduardo C.S. **Ponte em Balanços Sucessivos – Eng. Emílio Baumgart**. Notas de Aula, Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção. Rio de Janeiro – sem data.

UNDERWOOD, David. **Oscar Niemeyer e o Modernismo de Formas Livres no Brasil**. Cosac & Naify, São Paulo, SP, 2003.

VASCONCELLOS, Juliano Caldas. **Concreto Armado Arquitetura Moderna Escola Carioca**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação e pesquisa em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade Rio Grande do Sul. Orientador: Carlos Eduardo Dias Comas. Rio Grande do Sul, 2004.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O Concreto no Brasil – Recordes, Realizações, História**, Volume 1. Editora Pini, 2ª edição, 1992.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O Concreto no Brasil – Professores, Cientistas, Técnicos**, Volume 2. Editora Pini, 1ª edição, 1992.

WOLF, José. **Vãos e Vãos**. Revista AU, Editora PINI, ano 3, n. 15, p. 15-23, São Paulo, SP, 1987.

XAVIER, Alberto. **Arquitetura Moderna Brasileira: Depoimentos de uma Geração**. Editora PINI, São Paulo, 1987.

_____. **Arquiteto e engenheiro contam histórias dos tempos de estágio**. O Globo Online. 30 de agosto de 2006.

Filmes:

Oscar Niemeyer, A Vida é um Sopro, direção: Fabiano Maciel e Sacha. Europa Filmes, 2007.

Oscar Niemeyer, O Arquiteto da Invenção, direção Thomas Miguez e Marcelo Machado, Arquitetura e Construção – Editora Abril, 2007.

Sites Pesquisados:

Fundação Oscar Niemeyer - www.niemeyer.org.br

Fundação Athos Bulcão - www.fundathos.org.br

Infobrasília - www.infobrasília.com.br

Memorial JK - www.memorialjk.com.br

Ministério das Relações Exteriores - www.mre.gov.br

Portal da Câmara dos Deputados - www.camara.gov.br

Portal IPHAN - www.portal.iphan.gov.br

Portal Museu Oscar Niemeyer - www.pr.gov.br/mon

Projeto Memória - www.projeto memoria.art.br

Site Oficial de Joaquim Cardozo - www.joaquimcardozo.com

Skyscrapercity - www.skyscrapercity.com

Programas Utilizados:

SAP 2000 – Versão 14 (Computer & Structures, Inc.)

Ftool – versão 2.11 (Tecgraf – PUC-RJ)