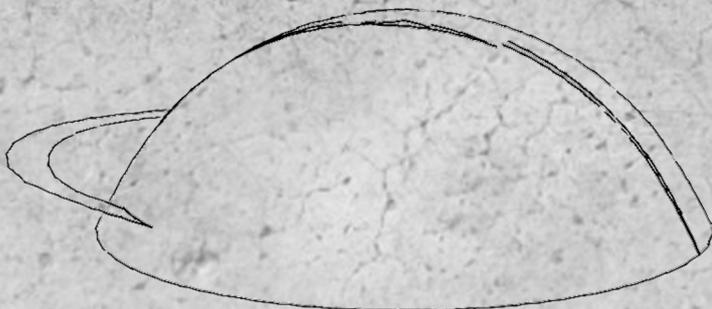
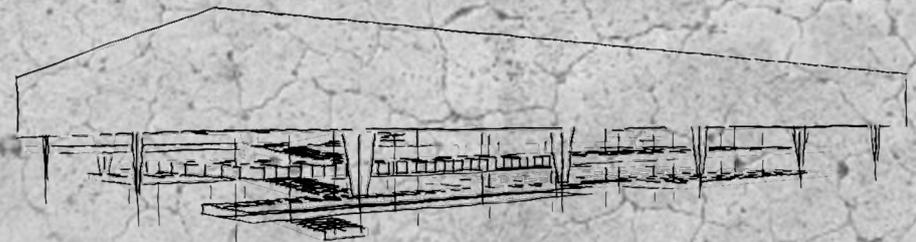
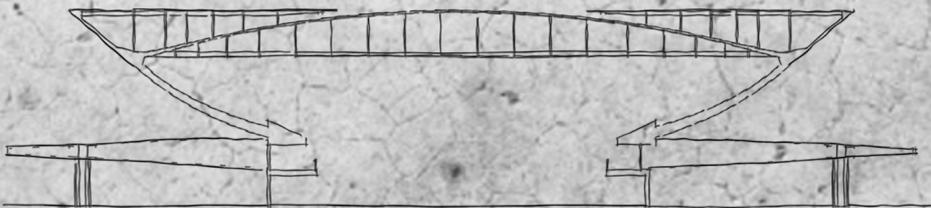


O PROTAGONISMO DA ESTRUTURA NA CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

Leonardo da Silveria Pirillo Inojosa

Orientador: Prof. Márcio Augusto Roma Buzar, Dsc.

Brasília, 2019



Tese de Doutorado
Programa de Pós Graduação
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade de Brasília



faunb



UnB

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

O PROTAGONISMO DA ESTRUTURA NA CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de Brasília para a obtenção do Grau
de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.
Linha de Pesquisa: Estruturas e Arquitetura
Orientador: Prof. Dr. Márcio Augusto Roma Buzar

Brasília
2019

Inojosa, Leonardo da Silveira Pirillo

O Protagonismo da Estrutura na Concepção da Arquitetura Moderna Brasileira /Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

Brasília, 2019

252 p. :il.

Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade de Brasília, Brasília.

1. Estrutura.

2. Arquitetura Moderna. 3. Sistema Estrutural.

I. Universidade de Brasília. FAU

II. Título.

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

Assinatura

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

O PROTAGONISMO DA ESTRUTURA NA CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

Banca Examinadora:

Prof. Márcio Augusto Roma Buzar, Dr.
Orientador
Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
PPG-FAU-UnB
Universidade de Brasília

Prof. João da Costa Pantoja, Dr.
Avaliador interno
Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
PPG-FAU-UnB
Universidade de Brasília

Prof. Evangelos Christakou, Dr.
Avaliador externo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia
ENC-FT-UnB
Universidade de Brasília

Prof. Paulo Roberto do Lago Helene, Dr.
Avaliador externo
Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica
POLI-USP
Universidade de São Paulo

Este trabalho é dedicado à minha esposa
Fernanda, aos meus filhos Theo e Thaís e
aos meus pais Oswaldo e Hercilia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais que sempre me apoiaram em todas os meus desafios e são responsáveis pela importante base de conhecimento necessária para vencê-los. À minha esposa, Fernanda, companheira, incentivadora e sempre disposta a ajudar. A meu filho Theo agradeço o despercebido incentivo, na inocente ansiedade em saber se o pai já é “doutor” e à pequena Thaís, que sem saber ajudou na conclusão desse trabalho ao abrir mão em alguns momentos da presença do pai. Agradeço também meu professor Márcio Buzar, pelas orientações, desde a apresentação de um tema que se tornou quase uma paixão e principalmente pelo incentivo a iniciar os caminhos que culminaram na conclusão desse trabalho.

“Não visualizo qualquer incompatibilidade entre poesia e a arquitetura. As estruturas planejadas pelos arquitetos modernos são verdadeiras poesias. Trabalhar para que se realizem esses projetos é concretizar uma poesia”
(Joaquim Cardozo)

RESUMO

O PROTAGONISMO DA ESTRUTURA NA CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

leinojosa@unb.br

Professor do ENC-FT-UNB - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília.

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, 2002). Nos quatro momentos da arquitetura moderna brasileira destacados nessa tese podemos identificar a importância da estrutura para a composição formal da arquitetura. Nas principais obras da Arquitetura Moderna os elementos estruturais são muitas vezes usados de forma aparente, clara e pura, diretamente relacionados com a estética e com a concepção do espaço arquitetônico. 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 dessas 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, onde o elemento estrutural se destaca também como elemento arquitetônico. Nos momentos identificados da Arquitetura Moderna podemos destacar exemplos em que os elementos estruturais possuem essas características. Como os arcos experimentados por Joaquim Cardozo e Luiz Nunes na Escola Rural Alberto Torres, em Recife, ainda em 1935; as grandes vigas parede proporcionando grandes vãos como recentemente, em 1992; ou ainda os pilares dos palácios de Brasília, as rampas do Museu Nacional, as grandes empenas sustentadas por pilares esculturais do edifício da FAU-USP, de Vilanova Artigas em 1969, dentre tantos outros exemplos. Esse trabalho faz uma leitura do desenvolvimento da arquitetura moderna, focando o aspecto técnico e tecnológico de seus projetos e dos sistemas estruturais aplicados na estética arquitetônica. Através de análises numéricas dos sistemas estruturais aplicados em grandes obras, utilizando o software SAP2000, destacamos as relações dos sistemas estruturais com o resultado final na plástica arquitetônica, identificando o protagonismo da estrutura na concepção da arquitetura moderna brasileira.

Palavras-chave: Forma Estrutural, Arquitetura Moderna, Sistema Estrutural

ABSTRACT

THE PROTAGONISM OF THE STRUCTURE IN THE CONCEPTION OF BRAZILIAN MODERN ARCHITECTURE

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

leinojosa@unb.br

Professor in ENC-FT-UNB - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília.

Established works of various eras and nationalities use the structural component as a guiding design parameter. In these cases, the architecture is born along with the structure – "after the structure is built the architecture is already present, simple and beautiful" (NIEMEYER, 2002). In the four moments of modern architecture that are identified in this thesis we can highlight the importance of structure for the formal composition of architecture. In the major works of modern architecture structural elements are often used so apparent, clear and pure, directly related to the aesthetics and design of the architectural space. This shows that technical knowledge of project structures is essential for the design of a good project, the material to be used and the structural system that will be adopted. In many of these buildings the own function sets the structural system and that is responsible for the shape. Even though later this main body receive other elements, the framework will define your shape and architectural space. Large roofs, bridges and towers are buildings of this kind, have simple and well defined functions and its dimensions require structural solutions often specific to each case, where the structural element also stands out as an architecture. At the moments of modern architecture identified we can highlight examples where the structural elements have these characteristics. As the arches experienced by Joaquim Cardozo and Luiz Nunes on Rural school Alberto Torres, in Recife, in 1935; the great wall beams providing large spans as recently in 1992; or still the pillars of the palaces of Brasilia, the ramps of the Museum of the Republic, the great sculptural pillared facades of the building of FAU-USP, Vilanova Artigas in 1969, among many other examples. This work makes a reading of the development of modern architecture, focusing on the technical and technological aspect of their projects and structural systems applied in architectural aesthetics. Through numerical analysis of structural systems applied in great works, using SAP2000 software, we highlight the relations of structural systems with the end result in architectural plastic, identifying the role of the structure in design of Modern Brazilian Architecture.

Keywords: Structural form, modern architecture, structural system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho da secção da Catedral de Notre-Dame, Reims.....	33
Figura 2 – Vista interna da Catedral de Notre-Dame, Reims, França.....	34
Figura 3 – Esquema estrutural do Arco Funicular.....	34
Figura 4 – Forth Bridge, Escócia, 1890.....	35
Figura 5 – “Maquete Humana”, demonstração do sistema estrutural pelos executores.....	35
Figura 6 – Iron Bridge (Ponte de Ferro) – Ponte sobre o rio Severn, Coalbrookdale, Inglaterra, 1779 – Abraham Darby III e seu arquiteto Thomas F. Pritchard.....	39
Figura 7 – Fachada do Panteão de Paris.....	40
Figura 8 – Detalhe de um feixe de teto de ferro fundido da estrutura do depósito de barcos do estaleiro de Sheerness, de Godfrey T. Greene, em 1859.....	40
Figura 9 – Ilustração de peças utilizadas na estrutura de ferro na cúpula do Halle au Blé, Paris, 1808-1813, de François-Joseph Bélanger.....	42
Figura 10 – Cartão Postal da Galeire d’ Orléans, no Palais Royal, de Pierre-Louis Fontaine, de 1828.....	43
Figura 11 – Edifício Haughwout, de Pierre-Louis Fontaine, de 1828.....	44
Figura 12 – Imagem interna da estrutura da cobertura em ferro da rampa 4 do Chatham Historic Dockyard, construída entre 1847 e 1848, Kent, Inglaterra, de George Baker.....	44
Figura 13 – Imagem externa da fachada da rampa 4 do Chatham Historic Dockyard, construída entre 1847 e 1848, Kent, Inglaterra, de George Baker.....	45
Figura 14 – Módulo da estrutura independente do piso da galeria do Palácio de Cristal, Hyde Park, Londres, construída entre 1850 e 1851, de Joseph Paxton.....	45
Figura 15 – Guaranty Building em Buffalo, Nova Iorque, de Louis Sullivan, 1895.....	48
Figura 16 – Robie House, Universidade de Chicago – IL, EUA, de Frank Lloyd Wright, 1909.....	49
Figura 17 – Um dos barcos em argamassa armada de Lambot, 1855.....	50
Figura 18 – Patente do Concreto Armado de Hennebique, 1892.....	52
Figura 19 – Edifício Hennebique, inaugurado em 1901, Paris, França.....	53
Figura 20 – Fachada da garagem da rue Ponthieu, em Paris, de Auguste Perret 1906.....	53
Figura 21 – Fachada do <i>Théâtre des Champs-Élysées</i> , em Paris, de Auguste Perret 1913.....	54
Figura 22 – Estrutura Dom-ino House (Casa Dom-ino) de Le Corbusier, 1914.....	55
Figura 23 – Modelagem e gráficos de análise estrutural para Casa Dom-ino, no software SAP 2000 v20.....	56
Figura 24 – “Casa do guarda e jardineiro”, da Villa Savoye, de Le Corbusier, 1931.....	57
Figura 25 – O pavilhão suíço da Universidade de Paris de Le Corbusier, década de 1930.....	58
Figura 26 – Villa Savoye de Le Corbusier, 1931.....	58
Figura 27 – Vistas dos pilotis do térreo da Unidade de Habitação de Marselha (Le Corbusier, 1947).....	59
Figura 28 – Corte, mostrando o pórtico rígido e vista do Edifício Daily Express, Londres, de Owen Willians e Elis and Clarke, 1930-32.....	59
Figura 29 – Apartamentos Elizabeth Noble, em Los Angeles, de Frank Lloyd Wright, 1929.....	60
Figura 30 – Fallingwater House, de Frank Lloyd Wright, 1935-1937.....	61
Figura 31 – Museu Guggenheim em Nova Iorque, de Frank Lloyd Wright, 1943.....	61
Figura 32 – Edifício da Bauhaus em Dessau, Alemanha, de Walter Gropius, 1926.....	62
Figura 33 – Fábrica Fagus, em Leine, Alemanha, de Walter Gropius de 1913.....	62
Figura 34 – Residência Rietveld Schröder de Gerrit Rietveld, 1925.....	63
Figura 35 – Pavilhão da Exposição de Barcelona de Mies Van der Rohe, 1929.....	64
Figura 36 – Crown Hall, Instituto de Tecnologia de Illinois de Mies Van der Rohe, 1956.....	64
Figura 37 – Edifício “A Noite”, projeto de Otto Baumgart, 1929, Rio de Janeiro.....	68
Figura 38 – Edifício Martinelli, 1930, São Paulo.....	69
Figura 39 – Ponte Emilio Baumgart sobre o Rio do Peixe, 1930.....	70
Figura 40 – Estádio do Maracanã em 1970, construído em 1950.....	70
Figura 41 – MASP – Museu de Arte de São Paulo, de Lina Bo Bardi e José Carlos de Figueiredo Ferraz, 1953.....	71
Figura 42 – Universidade de Constantine, de Oscar Niemeyer, 1969.....	71
Figura 43 – Palácio Tiradentes, em Belo Horizonte, de Oscar Niemeyer e José Carlos Sussekind.....	72
Figura 44 – Casa Modernista da Rua Santa Cruz, de Gregori Warchavchik, 1929 em São Paulo.....	74
Figura 45 – Edifício do Ministério da Educação e Saúde, atual Palácio Gustavo Capanema, Rio de Janeiro.....	75
Figura 46 – Linha do Tempo – Obras da Arquitetura Moderna.....	77
Figura 47 – Os Quatro Momentos na Arquitetura Moderna Brasileira.....	81
Figura 48 – Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arq. Luiz Nunes, construído em 1935-36.....	84

Figura 49 – Laboratório de Anatomia Patológica (Pavilhão de Óbitos) em Recife, projeto do Arq. Luiz Nunes, 1936 foto de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York – 1943.....	85
Figura 50 – Croqui do Pavilhão Luiz Nunes (Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE).....	85
Figura 51 – Comparação entre os edifícios da Usina Higienizadora de Leite em Recife (de Luiz Nunes, 1934) e a Fábrica Fagus em Leine na Alemanha (de Walter Gropius, 1913).....	87
Figura 52 – Comparação entre o projeto para a Escola de Débeis Mentaes em Recife de Luiz Nunes, 1934 (esquerda) e a Karl-Marx Middle School, em Villejuif de André Lurçat, 1931 (direita).....	87
Figura 53 – Perspectiva e Vista Frontal do projeto original do pavilhão de salas para uma Escola Experimental em Recife (de Luiz Nunes e equipe, 1937).....	88
Figura 54 – Comparação entre os arcos do Palácio dos Sovietes, de Le Corbusier (esquerda) e da Escola Rural Alberto Torres, e Luiz Nunes (direita).....	88
Figura 55 – Caixa d’Água e Igreja da Sé em Olinda - PE, em foto de G. E. Kidder Smith para “The Architectural Review”, março de 1944.....	89
Figura 56 – Comparação entre Vila Savoye, de Le Corbusier em 1929 (esquerda) e o Pavilhão Luiz Nunes de 1936 (direita).....	90
Figura 57 – Palácio da Fazenda de Pernambuco, em Recife, de Fernando Saturnino de Britto e Joaquim Cardozo.....	91
Figura 58 – Igreja São Francisco de Assis na Pampulha, Belo Horizonte MG.....	92
Figura 59 – Fundos da Igreja São Francisco de Assis - Painel de Portinari 1945-55 (Conjunto da Pampulha), Belo Horizonte MG.....	93
Figura 60 – Antigo cassino, 1950, atual Museu de Arte da Pampulha (Conjunto da Pampulha).....	95
Figura 61 – Casa do Baile. 1943-48 (Conjunto da Pampulha).....	95
Figura 62 – 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.....	96
Figura 63 – 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.....	97
Figura 64 – Conjunto Habitacional Pedregulho, Rio de Janeiro, 1950 de Affonso Eduardo Reidy. Vista do bloco de apartamentos.....	99
Figura 65 – Comparação entre o projeto de Le Corbusier para o Rio de Janeiro em 1929 (esquerda) e o Conjunto Residencial Pedregulho, de Affonso Reidy, de 1950 (direita).....	100
Figura 66 – Projeto/Maquete – Escola do Conjunto Residencial Prefeito Mendes de Moraes - Pedregulho, Benfica, Rio de Janeiro, 1946.....	100
Figura 67 – Colégio Brasil-Paraguai, Assunção, Paraguai. Affonso Reidy, 1952.....	101
Figura 68 – Conjunto Residencial Marquês de São Vicente. Affonso Reidy, 1952.....	102
Figura 69 – Vista do corpo principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, bloco de exposições. Rio de Janeiro.....	103
Figura 70 – Vista do conjunto de edifícios residenciais do Parque Guinle, de Lúcio Costa de 1940-1949, no Rio de Janeiro.....	104
Figura 71 – Residência Lota Macedo Soares, de Sérgio Bernardes, em Petrópolis, RJ, de 1953.....	104
Figura 72 – Palácio do Planalto em Brasília. Foto de Bernie DeChant.....	105
Figura 73 – Supremo tribunal Federal em Brasília.....	106
Figura 74 – Palácio da Alvorada, Brasília 1957.....	107
Figura 75 – Corte transversal do Palácio da Alvorada.....	107
Figura 76 – Foto da construção em que aparecem os apoios dos pilares do Palácio da Alvorada antes de serem aterrados.....	108
Figura 77 – Vista da Igreja Nossa Senhora de Fátima.....	109
Figura 78 – Antigo Touring Club do Brasil, Brasília.....	110
Figura 79 – Diagrama de Momento Fletor da viga de cobertura do Touring Club do Brasil, Brasília.....	110
Figura 80 – Diagrama de Momento Fletor de uma viga bi apoiada com balanços não simétricos.....	110
Figura 81 – Anexo do late Clube Pampulha.....	110
Figura 82 – 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.....	111
Figura 83 – Imagem de satélite do ICC.....	112
Figura 84 – Montagem das vigas pré-moldadas da cobertura do ICC.....	113
Figura 85 – Fachada do Palácio da Justiça em Brasília.....	113
Figura 86 – Fachada do Palácio do Itamaraty, Brasília.....	115

Figura 87 – Jardim interno do Palácio do Itamaraty, Brasília.....	116
Figura 88 – Diagrama de momentos fletores nas vigas no sentido Leste-Oeste do Palácio do Itamaraty.	116
Figura 89 – Vista aérea da Ponte Honestino Guimarães em Brasília.	117
Figura 90 – Ilustrações com base no Gráfico de Momento Fletor para a Ponte Honestino Guimarães.....	117
Figura 91 – Catedral de Brasília.....	118
Figura 92 – Croqui de Oscar Niemeyer para o Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia.....	119
Figura 93 – Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia, 1969.	120
Figura 94 – Sede do Partido Comunista Francês, Paris, 1971 a 1980.	120
Figura 95 – Sede da Editora Mondadori em Milão, Itália, 1968.....	121
Figura 96 – Edifício Vilanova Artigas – FAU-USP, 1969.	122
Figura 97 – Balneário de Águas da Prata, de Walter Toscano e Massayoshi Kamimura em 1971.	123
Figura 98 – Estádio Serra Dourada em Goiânia, de Paulo Mendes da Rocha em 1973.	123
Figura 99 – Cobertura do Ginásio do Clube Atlético Paulistano, de Paulo Mendes da Rocha, em 1971.....	124
Figura 100 – Museu Brasileiro da Escultura - MUBE, de Paulo Mendes da Rocha, em 1988.	124
Figura 101 – Centro Administrativo da Bahia, em Salvador, de 1973, de João Filgueira Lima.	124
Figura 102 – Croqui de Oscar Niemeyer para o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói, no texto, uma alusão à contribuição de Bruno Contarini.....	125
Figura 103 – Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arq. Luiz Nunes, construído em 1935-36.....	128
Figura 104 – Projetos originais da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.....	129
Figura 105 – Projetos originais da estrutura rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.....	130
Figura 106 – Modelo da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.	132
Figura 107 – Diagrama de deslocamentos do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.	133
Figura 108 – Diagrama de esforços normais do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.....	134
Figura 109 – Diagrama de momento fletor do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.....	134
Figura 110 – Diagramas de esforços cortantes, momento fletor e deslocamento da viga entre salas 1 e 2 da Escola Rural Alberto Torres.....	135
Figura 111 – Modelo estrutural da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.	136
Figura 112 – Diagrama de deslocamentos da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.....	137
Figura 113 – Diagrama de momento fletor das lajes da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.....	137
Figura 114 – Diagrama de momento fletor dos arcos da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.	138
Figura 115 – Diagrama de esforços normais nos arcos e tirantes da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.	139
Figura 116 – Diagrama de deslocamentos da rampa de acesso, sem os tirantes.....	139
Figura 117 – Diagrama de momento fletor das lajes da rampa de acesso, sem os tirantes.....	140
Figura 118 – Diagrama de momento fletor dos arcos da rampa de acesso, sem os tirantes.	141
Figura 119 – Diagrama de esforços normais nos arcos e tirantes da rampa de acesso, sem os tirantes.	141
Figura 120 – Igreja São Francisco de Assis, Pampulha, Belo Horizonte - MG, projeto do Arq. Oscar Niemeyer, construído em 1943.	143
Figura 121 – Planta baixa da Igreja São Francisco de Assis, Pampulha.....	144
Figura 122 – Vista Frontal da Igreja São Francisco de Assis, Pampulha.	145
Figura 123 – Cópias de parte do material levantado junto ao IPHAN-MG.	146
Figura 124 – Modelo da estrutura da Igreja São Francisco de Assis.	148
Figura 125 – Diagrama de Forças Normais para combinação de carga 1 da Igreja São Francisco de Assis.	149
Figura 126 – Diagrama de Deformação para combinação de carga 1, com a escala de cores em metros. da Igreja São Francisco de Assis.	150
Figura 127 – Tipos de engaste nas extremidades das hastes.....	150
Figura 128 – Diagrama de Deformação para combinação de carga 1 na torre do campanário da Igreja São Francisco de Assis.....	151
Figura 129 – Deformação para a combinação de serviço, com pilares e vigas conforme construído.	152
Figura 130 – Deformação para a combinação de serviço, sem pilares e vigas.	152
Figura 131 – Forças Normais para combinação 1, com pilares e vigas conforme construído.	153
Figura 132 – Forças Normais para combinação 1, sem pilares e vigas.	153
Figura 133 – Croquis da Igreja da Pampulha encontrados no relatório de gestão 1941-1942 do prefeito de Belo Horizonte, Juscelino Kubtischek.	154
Figura 134 – Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro - MAM, 1958 de Affonso Eduardo Reidy.....	155
Figura 135 – Aterro do Flamengo, Rio de Janeiro. Projeto de Affonso Eduardo Reidy.	156
Figura 136 – Bloco Escola do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, 1958, pergolado do terraço.	157

Figura 137 – Panorama do Museu com a construção do teatro.....	158
Figura 138 – Elevação Sul, a esquerda o bloco-escola, ao centro o corpo principal e a direita o teatro.	158
Figura 139 – Projetos e imagens da construção do MAM.	159
Figura 140 – Museu de Arte Moderna. Detalhe do Pilar em “V”	160
Figura 141 – Corte do pórtico, armaduras.	161
Figura 142 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do MAM.	163
Figura 143 – Diagrama de deslocamentos para o MAM.....	163
Figura 144 – Diagrama de esforços normais para o MAM.....	164
Figura 145 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico da estrutura do MAM.....	165
Figura 146 – Diagramas de momentos fletores e deslocamentos para modelo computacional de simulação dos pórticos do MAM sem os tirantes de travamento da base.	165
Figura 147 – Modelo computacional do sistema estrutural de pórticos simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM.	166
Figura 148 – Diagrama de momento fletor para Modelo computacionais do sistema estrutural de pórtico simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM.....	167
Figura 149 – Imagem aérea da Igrejinha ainda em construção.	168
Figura 150 – Planta da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.....	170
Figura 151 – Vista frontal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.	170
Figura 152 – Pannel de azulejo na lateral da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima e detalhes dos azulejos.	171
Figura 153 – Corte Longitudinal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.	172
Figura 154 – Fôrma da cobertura. Projeto de Estruturas. DAU/NOVACAP.	172
Figura 155 – Planta do Pilar Principal.	173
Figura 156 – Detalhe do encontro do Pilar principal com a cobertura.....	173
Figura 157 – Vista posterior da Igrejinha – não se nota a presença de vigas na cobertura.	174
Figura 158 – Cópia da Planta e Cortes da Estrutura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.....	175
Figura 159 – Modelo da estrutura da Igrejinha.	176
Figura 160 – Corte do sistema – viga-pilar – simplificado.	176
Figura 161 – Diagrama de Forças Normais.	177
Figura 162 – Diagrama de Momentos Fletores.....	177
Figura 163 – Diagrama de Deformações.....	177
Figura 164 – Corte do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.....	178
Figura 165 – Diagrama de Forças Normais do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.....	178
Figura 166 – Diagrama de Momentos Fletores do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.....	178
Figura 167 – Diagrama de Deformações do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.	179
Figura 168 – Sistema Estrutural da Igrejinha Nossa Senhora de Fatima.	179
Figura 169 – Diagrama de Forças Normais.	180
Figura 170 – Diagrama de Momentos Fletores.....	180
Figura 171 – Diagrama de Momentos Fletores – detalhe do Pilar Frontal.....	181
Figura 172 – Pilar Frontal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.	181
Figura 173 – Diagrama de Momentos Fletores na direção “y” na laje da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.	182
Figura 174 – Diagrama de Deformações.....	183
Figura 175 – Congresso Nacional, em Brasília, 1960, de Oscar Niemeyer.....	184
Figura 176 – Foto da Construção da Cúpula da Câmara.	186
Figura 177 – O ponto de tangencia entre a primeira e a segunda casca visto externa e internamente.	186
Figura 179 – Corte Transversal da Câmara dos Deputados.	187
Figura 180 – Imagens do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida.....	188
Figura 181 – Montagem passo a passo do sistema estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados... 189	189
Figura 182 – Diagrama de Forças Normais do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.	190
Figura 183 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – Vista externa das cascas de concreto.	190
Figura 184 – Diagrama de Momento Fletor do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.....	191
Figura 185 – Diagrama de Momento Fletor na direção X. Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados.	191
Figura 186 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.....	192
Figura 187 – Diagrama de momento fletor do sistema estrutural sem a cobertura.	192
Figura 188 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural sem a cobertura.	192

Figura 189 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural sem a laje forro.....	193
Figura 190 – Diagrama de Momento Fletor do sistema simplificado da cobertura da Câmara dos Deputados. ...	193
Figura 191 – Diagrama de Deformação do sistema simplificado da cobertura da Câmara dos Deputados.....	193
Figura 192 – Foto-montagem: Corte da Cúpula da Câmara do Congresso Nacional sobre imagem da Ponte Salginatobel de Robert Maillart.	194
Figura 193 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – Vista interna, laje forro.	195
Figura 194 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – tirantes da laje forro e pilares superiores.....	195
Figura 195 – Diagrama de deslocamentos da Cúpula Invertida.....	196
Figura 196 – Vista externa da empena lateral do edifício Vilanova Artigas.....	198
Figura 197 – Fachada do edifício Vilanova Artigas.....	199
Figura 198 – Corte Transversal do edifício Vilanova Artigas.....	199
Figura 199 – Vista interna do vão central (Salão Caramelo) do edifício Vilanova Artigas.	199
Figura 200 –Planta esquemática da Modulação estrutural e posição dos pilares.....	200
Figura 201 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do Edifício Vilanova Artigas.	202
Figura 202 – Modelo do Edifício Vilanova Artigas.....	203
Figura 203 – Vista frontal do pilar da fachada frontal do Edifício Vilanova Artigas.	204
Figura 204 – Modelagem do Pilar externo do edifício Vilanova Artigas.	205
Figura 205 – Diagrama de Esforços Normais do Pilar externo do edifício Vilanova Artigas.	205
Figura 206 – Diagrama de Deslocamentos – vista interna do edifício Vilanova Artigas.	206
Figura 207 – Diagrama de Deslocamentos – vista externa do edifício Vilanova Artigas.	206
Figura 208 – Diagramas Momento e de Deslocamentos – Viga Longitudinal do nível dos Departamentos. Comparação sem e com apoios nas extremidades.....	207
Figura 209 – Associações viga x viga: laje nervurada e grelha.	208
Figura 210 – Perfil da Viga Principal (invertida, sem junta) da cobertura do edifício Vilanova Artigas.....	209
Figura 211 – Perfil da Viga Calha da cobertura do edifício Vilanova Artigas.	209
Figura 212 – Diagrama de deslocamento da cobertura do edifício Vilanova Artigas.	210
Figura 213 – Diagramas de esforços normais e momento fletor da cobertura do edifício Vilanova Artigas.	210
Figura 214 – Diagrama de momento fletor na fachada frontal do edifício Vilanova Artigas.....	211
Figura 215 – Vista do Conjunto de edifícios do Superior Tribunal de Justiça – STJ, em Brasília.....	212
Figura 216 – Croquis de Oscar Niemeyer para projeto do STJ.....	213
Figura 217 – Implantação das edificações do STJ.	214
Figura 218 – Bloco da administração do STJ.	215
Figura 219 – Içamento das lajes Bloco da administração do STJ durante a construção.....	215
Figura 220 – Reforço dos tirantes de sustentação das lajes Bloco da administração do STJ.....	216
Figura 221 – Fachada do Conjunto de edifícios do STJ.	216
Figura 222 – Bloco do tribunal do Pleno do STJ.....	217
Figura 223 – Bloco do Auditório do STJ.....	217
Figura 224 – Fachada do Bloco dos Plenários do STJ, com o painel de Mariane Perret.	218
Figura 225 – Vista interna da parede 5 do STJ, com o painel de Mariane Perret.	219
Figura 226 – Projetos originais do Conjunto arquitetônico do STJ.	220
Figura 227 – Sistema estrutural da viga-parede 05, modelado no programa SAP 2000.	220
Figura 228 – Simulação da viga-parede 05 com a alma cheia, modelada no programa SAP 2000.....	221
Figura 229 – Simulação do deslocamento da viga-parede 05 nas duas situações.....	221
Figura 230 – Diagrama de esforços internos na direção "X" da viga-parede 05 nas duas situações.....	222
Figura 231 – Projeto da armação das cordoalhas de protensão da viga-parede 05.....	222
Figura 232 – Desenhos do Plano Piloto de Lúcio Costa – 1957.....	224
Figura 233 – Implantação do Conjunto Cultural.....	225
Figura 234 – Vista externa do Museu nacional.	226
Figura 235 – Vista Interna do Museu Nacional.	227
Figura 236 – Cúpula formada pela sucessão radial de arcos.	228
Figura 237 – Formas Funiculares – Cabos e Arcos.	228
Figura 238 – Corte Esquemático do arco gerador da cúpula do Museu Nacional.	229
Figura 239 – Reações horizontais na base do arco.	229
Figura 240 – Paralelos e Meridianos de uma cúpula.	230
Figura 241 – Planta de formas da cobertura do Museu Nacional.....	231
Figura 242 – Perturbação de Borda.....	231
Figura 243 – Execução das Fundações e do Anel de Compressão na base da cúpula.	232

Figura 244 – Execução da base da cúpula – parede dupla.	232
Figura 245 – Execução das formas das vigas radiais do pavimento de exposições.	233
Figura 246 – Planta de Formas do Mezanino.....	234
Figura 247 – Corte Longitudinal e detalhe de fixação dos tirantes na cobertura.....	234
Figura 248 – Planta de Formas da Rampa 3.....	235
Figura 249 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do Museu Nacional.	237
Figura 250 – Diagrama de Forças Normais da cobertura do Museu Nacional.	238
Figura 251 – Diagrama de Deformações do Museu Nacional.....	238
Figura 252 – Diagrama de Forças Normais da rampa externa do Museu Nacional.....	239
Figura 253 – Diagrama de Momento Fletor do Museu Nacional.....	239
Figura 254 – Diagrama de Deformações do Museu Nacional – detalhe rampa 3.	240
Figura 255 – Diagrama de Forças Normais dos tirantes do mezanino do Museu Nacional.	241

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da estrutura da Escola Rural Alberto Torres, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.	132
Tabela 2 - Dimensões da estrutura da São Francisco de Assis, Pampulha, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.	147
Tabela 3 - Dimensões da estrutura do bloco principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM-RJ, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.	162
Tabela 4 - Dimensões da estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.	175
Tabela 5 - Dimensões da estrutura da Cúpula da Câmara dos Deputados, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.	188
Tabela 6 - Dimensões da estrutura do edifício Vilanova Artigas, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.	201
Tabela 7 - Dimensões da estrutura do Museu Nacional, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.	236

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEPLAN – Centro de Planejamento da UnB.
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

Capítulo 1.	
INTRODUÇÃO	27
1.1 Apresentação	27
1.2 Justificativa.....	28
1.3 Problema.....	28
1.3.1 Objetivo Geral	29
1.3.2 Objetivos específicos.....	29
1.4 Vinculação ao Tema	29
1.5 Hipótese	30
1.6 Metodologia.....	30
Capítulo 2.	
O SISTEMA ESTRUTURAL NA ARQUITETURA	33
2.1 Uso dos Materiais: da Arquitetura Neoclássica ao Movimento Moderno	38
2.1.1 Ferro.....	38
2.1.2 Aço	46
2.1.3 Concreto.....	50
Capítulo 3.	
A ESTRUTURA NA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA	73
3.1 Quatro Momentos na Arquitetura Moderna Brasileira	79
3.1.1 Recife.....	83
3.1.2 Pampulha	91
3.1.3 Brasília.....	105
3.1.4 Pós-Brasília.....	118
Capítulo 4.	
PROTAGONISMO ESTRUTURAL NA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA - ESTUDOS DE CASO	127
4.1 1º Momento: Recife.....	127
4.1.1 Escola Rural Alberto Torres (Luiz Nunes e Joaquim Cardozo).....	127
4.2 2º Momento: Pampulha.....	142
4.2.1 Igreja S. Francisco de Assis (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)	142
4.2.2 MAM - Rio de Janeiro (Affonso Reidy e Arthur Eugenio Jermann).....	155
4.3 3º Momento: Brasília	168
4.3.1 Igrejinha N. S. de Fátima (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)	168
4.3.2 Câmara dos Deputados (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)	183
4.4 4º Momento: Pós-Brasília	197
4.4.1 Edifício Vilanova Artigas – FAU-USP (Vilanova Artigas e Figueiredo Ferraz)	197
4.4.2 Superior Tribunal de Justiça - STJ (Oscar Niemeyer e Bruno Contarini)	212
4.4.3 Museu Nacional (Oscar Niemeyer e Sussekind)	223
CONCLUSÕES.....	243
REFERÊNCIAS.....	245

Capítulo 1.

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Nas obras modernas podemos identificar um protagonismo da estrutura na concepção da arquitetura. Na Arquitetura Moderna os elementos estruturais são usados de forma aparente, muitas vezes clara e pura, e diretamente relacionados com a estética e com a concepção do espaço arquitetônico. Isso mostra que foi essencial para a concepção arquitetônica da arquitetura moderna o conhecimento técnico das estruturas, tanto dos materiais utilizados quanto ao sistema estrutural adotado (INOJOSA, 2010).

Obras consagradas de diversas épocas e nacionalidades utilizam o componente estrutural como parâmetro norteador do projeto. Muitos casos são reconhecidos como “Arte Estrutural”, quando 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. Segundo o engenheiro Professor João Del Nero “a engenharia estrutural tem uma liberdade de criação que se assemelha à arquitetura” (in SABBAG, 1987).

A relação da estrutura com a arquitetura, ou a semelhança entre as áreas não estão tão evidentes 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). São raros os exemplos em que o arquiteto entende e aplica os conhecimentos de estrutura em seus projetos, ou que o engenheiro seja um apreciador da estética da arquitetura. Esses casos, tem como resultado, usualmente, grandes obras arquitetônicas, onde há “o casamento bem-sucedido da arte e da tecnologia” (SALVATORI, 2011).

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. Assim, o que vemos são edificações onde a estrutura, elemento essencial para a existência da obra, fica em segundo plano, ou até mesmo escondida por adornos arquitetônicos, como sendo um “mal necessário” (SALVATORI, 2011).

1.2 Justificativa

Em muitas edificações da arquitetura moderna 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, onde o elemento estrutural se destaca também como elemento arquitetônico. Como grandes vigas parede proporcionando grandes vãos como no edifício principal do STJ em Brasília, de Oscar Niemeyer; vigas vierendeel que além de cumprirem de forma eficiente e econômica seu papel estrutural, acabam por desenhando as fachadas do Hospital Sara Kubistchek, de João Filgueira Lima, também em Brasília ou ainda os pilares dos palácios de Brasília, as rampas do Museu Nacional, os balanços de concreto do edifício da FAU-USP, em São Paulo, de Vilanova Artigas, os pórticos do MAM do Rio de Janeiro, de Affonso Reidy, dentre tantos outros exemplos.

1.3 Problema

A estrutura é fator imprescindível para a viabilidade da forma na arquitetura, cada forma inovadora gera 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 na história da arquitetura, e poucos trabalhos foram desenvolvidos abordando os aspectos estruturais dessas edificações (MOREIRA, 2007).

Os trabalhos arquitetônicos na Arquitetura Moderna são descritos e estudados em diversas publicações nacionais e internacionais, sejam elas acadêmicas ou comerciais, porém pouco se escreve sobre as realizações tecnológicas que acompanham esses trabalhos (FONSECA, 2007). Dos anos 30 aos anos 70, o Brasil foi reconhecido internacionalmente como um celeiro da Arquitetura Moderna. A construção de Brasília, por exemplo, significou um grande avanço tecnológico na concepção estrutural, bem como representou um marco na arquitetura brasileira. Porém, existe um certo desprezo à história da Engenharia Estrutural de Brasília, que é questionado pelo Professor Augusto Carlos de Vasconcelos, em seu livro *O Concreto no Brasil* (VASCONCELOS, 1992), onde se destaca a obra da Capital como um acontecimento marcante na engenharia e na arquitetura mundial. Esse desprezo ainda expõe outro problema, boa parte das edificações de relevância

histórica deste período arquitetônico no país não apresentam registros adequados de sua concepção, cálculo e projeto estrutural.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal pretendido com essa pesquisa é caracterizar a relação entre a estrutura e a forma e como essa relação se torna um dos elementos definidores do estilo arquitetônico na arquitetura moderna brasileira, levando em consideração os aspectos históricos e arquitetônicos, a tecnologia vigente e o material adotado, evidenciando o protagonismo do sistema estrutural na concepção da arquitetura.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos estão:

- Levantamento de obras representativas na arquitetura moderna;
- Seleção de obras de destaque em que os parâmetros estruturais se apresentam como elemento definidor da forma;
- Contextualização das obras selecionadas;
- Análise estrutural – baseada na sua história, projetos, tecnologia construtiva e intervenções;
- Definição dos modelos dos elementos estruturais definidores da forma e análise através de softwares de cálculo estrutural.

1.4 Vinculação ao Tema

Esse trabalho faz uma leitura do desenvolvimento da arquitetura moderna, focando o aspecto técnico e tecnológico de seus projetos e dos sistemas estruturais aplicados na estética arquitetônica. Com isso são apresentadas análises das relações dos sistemas estruturais com o resultado final na plástica arquitetônica.

A revisão teórica sobre os materiais adotados, os sistemas estruturais e as influências da escolha desses sistemas estruturais na arquitetura tratam da importância desses em obras da arquitetura moderna, destacando essa influência na concepção arquitetônica. Sendo assim está diretamente relacionado com a linha de Estruturas e Arquitetura da área de concentração de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade desse Programa de Pós-Graduação.

1.5 Hipótese

A análise adequada das estruturas em obras exponenciais e inovadoras na Arquitetura Moderna pode consagrar a revolução teórica nas técnicas construtivas e de concepção estrutural que permitiram o avanço inovador dos conceitos da arquitetura durante o período moderno.

Com a caracterização da relação entre a estrutura e a arquitetura de obras relevantes do modernismo brasileiro, é possível identificar o protagonismo do sistema estrutural na concepção e no processo de inovação da forma arquitetônica, seja a partir do projeto estrutural ou das técnicas construtivas adotadas, mostrando que o conhecimento técnico e a exploração dos limites do concreto armado foram imprescindíveis para a formação da Arquitetura Moderna.

O concreto armado surge no Brasil no início do século XX e se solidifica como o material ideal para o desenvolvimento da Arquitetura Moderna no país. A tecnologia do concreto armado desenvolvida no Brasil, através de suas características de moldabilidade e adequação às especificidades do mercado e mão-de-obra nacional, possibilitou a criação dos novos desenhos de formas livres que a arquitetura sugeria, trazendo a estrutura para uma posição de destaque na concepção das obras e colocando o canteiro de obra como espaço de produção da estrutura.

1.6 Metodologia

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, com o intuito de levantar, por meio da leitura e análise de material impresso ou digital, os aspectos históricos e a importância da escolha do sistema estrutural, baseado na tecnologia vigente para a definição da forma arquitetônica. Essa revisão remonta não só o panorama específico do recorte tratado nessa tese – arquitetura moderna brasileira – mas faz um desenho da evolução do material utilizado nas estruturas edificadas, principalmente o concreto armado, material mais utilizado e de maior influência técnica e tecnológica no período estudado.

Com base nessa revisão bibliográfica foi possível identificar quatro momentos temporais da arquitetura moderna brasileira nos quais podemos destacar tanto marcos desse período quanto experiências e avanços tecnológicos estruturais. Esses quatro momentos são descritos e posteriormente utilizados na escolha dos estudos de caso.

Para os estudos de caso foram selecionados, através dessa pesquisa e levando em consideração os quatro momentos citados acima, oito exemplos históricos na Arquitetura Moderna em que essa relação – sistema estrutural, arquitetura – se mostra relevante, a saber:

- Escola Rural Alberto Torres, em Recife. Projeto de Luiz Nunes e projeto estrutural de Joaquim Cardozo, de 1935.
- Igreja São Francisco de Assis da Pampulha, em Belo Horizonte. Projeto de Oscar Niemeyer e projeto estrutural de Joaquim Cardozo, de 1943.
- Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM, no Rio de Janeiro. Projetado por Affonso Eduardo Reidy, com projeto estrutural de Arthur Eugenio Jermann, de 1953 a 1967.
- Igrejinha Nossa Senhora de Fátima, em Brasília. Projeto de Oscar Niemeyer, com projeto estrutural de Joaquim Cardozo, de 1957.
- Congresso Nacional – Cúpula da Câmara dos Deputados, em Brasília. Projeto de Oscar Niemeyer, com Projeto estrutural de Joaquim Cardozo, de 1960.
- Edifício Vilanova Artigas – FAU-USP, em São Paulo. Projetado por João Baptista Vilanova Artigas, com projeto estrutural de João Carlos de Figueiredo Ferraz, de 1969.
- Edifício do Superior Tribunal de Justiça – STJ, em Brasília. Projetado por Oscar Niemeyer, com projeto estrutural de Bruno Contarini, de 1994.
- Museu Nacional Honestino Guimarães, em Brasília. Projetado por Oscar Niemeyer, com projeto estrutural de José Carlos Sussekind, de 2006.

Esses oito estudos de caso são analisados em uma abordagem focada nas características estruturais das edificações, que na época em que estavam inseridas representaram papel de destaque no desenvolvimento técnico da solução adotada.

A avaliação estrutural das obras escolhidas é feita com uma abordagem interdisciplinar, para que sejam analisados todos os aspectos pertinentes à obra em questão. Essa avaliação segue as seguintes etapas:

- Contextualização;
- Descrição das características arquitetônicas;
- Descrição da estrutura e seu estado atual;
- Identificação dos parâmetros estruturais e influência do sistema estrutural para a arquitetura;
- Análise do modelo estrutural. Destacando a função estrutural e estética que cumpre o(s) elemento(s) em estudo.

Para atender os objetivos já descritos, o trabalho foi estruturado em duas partes.

A primeira parte expõe sobre a concepção estrutural na arquitetura, descrevendo os principais sistemas estruturais utilizados, caracterizando a relação direta desses elementos de evidente função estrutural com a função estética que lhe é atribuída pelo projeto arquitetônico.

Dessa forma, faz-se uma pesquisa histórica por tempo e espaço da construção e da arquitetura moderna. Com foco no uso dos principais materiais adotados na construção civil – ferro, aço e concreto – é traçado um arco da evolução técnica da arquitetura neoclássica ao movimento moderno, contextualizando assim a Arquitetura Moderna e a importância tecnológica observada nesse período, estruturando uma “linha do tempo” onde são destacadas obras marcantes do modernismo.

A segunda parte desse trabalho apresenta os quatro momentos da arquitetura moderna brasileira, em que se destacam as características definidoras do sistema arquitetônico. Esses momentos são caracterizados também nos estudos de casos em que o sistema estrutural se mostra importante para a concepção arquitetônica no período da Arquitetura Moderna. Para os estudos de caso são feitas revisões bibliográficas de cada uma das obras selecionadas onde se descreve a arquitetura de cada obra e como se desenvolveram seus projetos. Também são descritas as estruturas das obras em estudo para que possam ser analisados os sistemas estruturais de modo a evidenciar os elementos desses sistemas que são definidores da forma e protagonistas na inovação arquitetônica. Os sistemas estruturais são descritos de forma a entendê-los a ponto de podermos fazer uma análise qualitativa, utilizando o programa SAP 2000, de análise estrutural, software bastante difundidos no meio técnico e acadêmico.

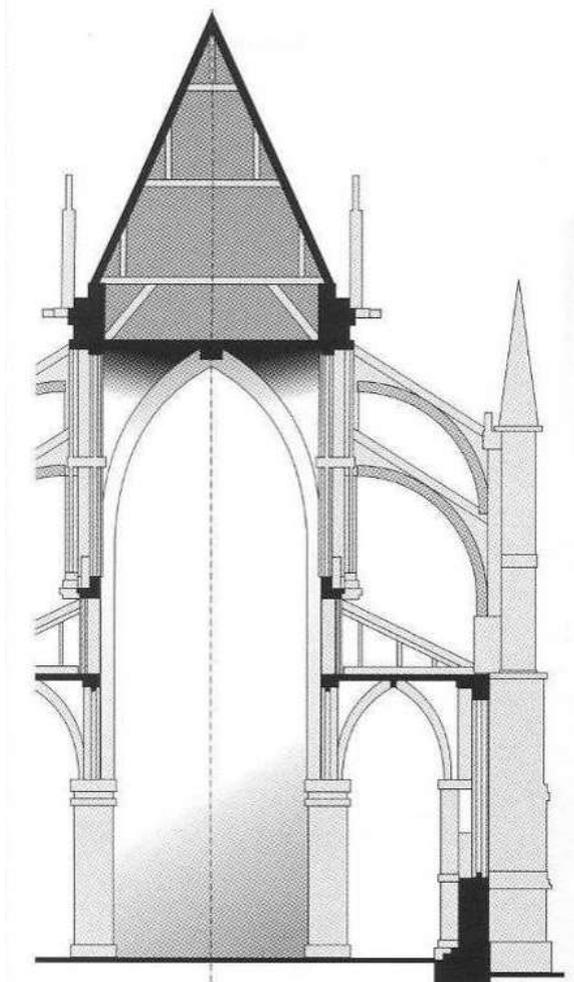
Capítulo 2.

O SISTEMA ESTRUTURAL NA ARQUITETURA

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).

Na arquitetura gótica da Catedral de Notre Dame de Reims, na França construída entre 1211 e 1311 – projeto do Arquiteto Jean d’Orbais, podemos notar a aproximação do sistema estrutural com a arquitetura. Observando as figuras abaixo (Figura 1, Figura 2 e Figura 3) 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 sequência de arcos botantes e contrafortes que “encaminham” as cargas até as fundações (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006). Pode-se concluir que, com os arcos góticos, o sistema estrutural permitiu que as plantas das catedrais ficassem mais livres e com isso, os espaços mais amplos.

Figura 1 – Desenho da secção da Catedral de Notre-Dame, Reims.



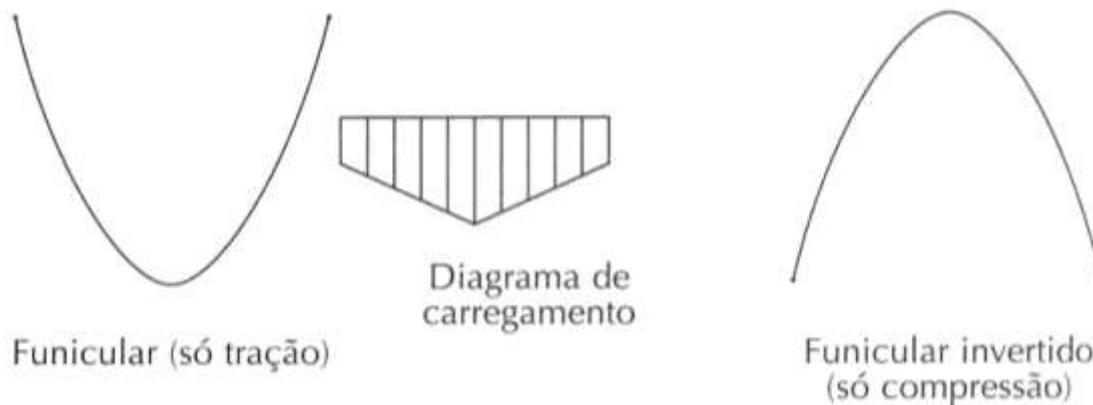
Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42.

Figura 2 – Vista interna da Catedral de Notre-Dame, Reims, França.



Fonte: Foto do autor.

Figura 3 – Esquema estrutural do Arco Funicular.



Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 42.

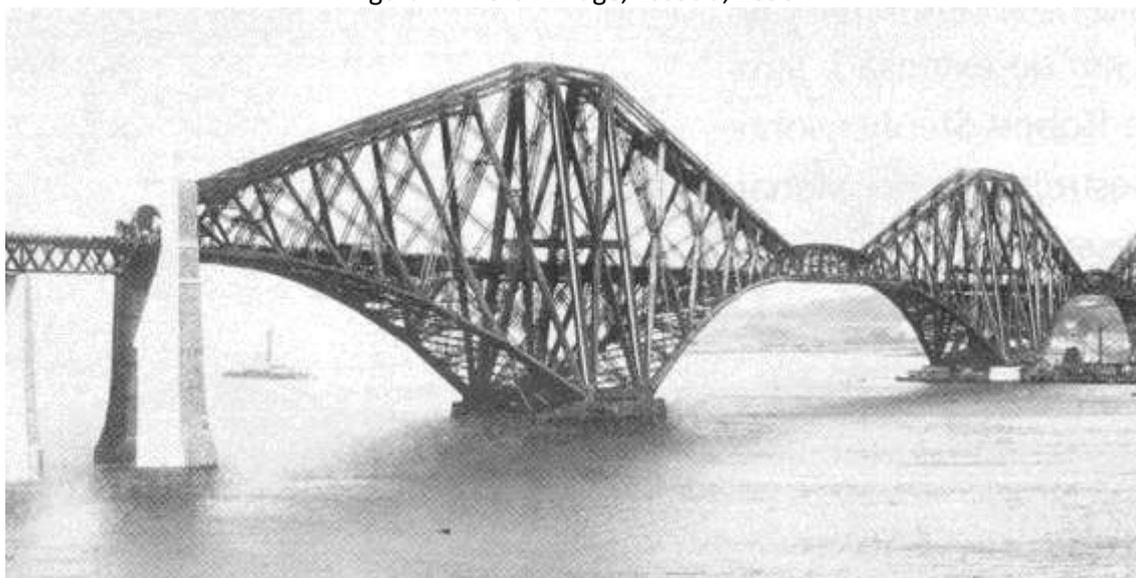
Outro exemplo histórico é a Forth Bridge, na Escócia, de 1890, projetada por Benjamin Baker e John Fowler (Figura 4). Esta ponte significou um grande avanço tecnológico, pois foi a primeira ponte de grande vão a ser construída inteiramente em aço (LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006).

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 apoiam 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).

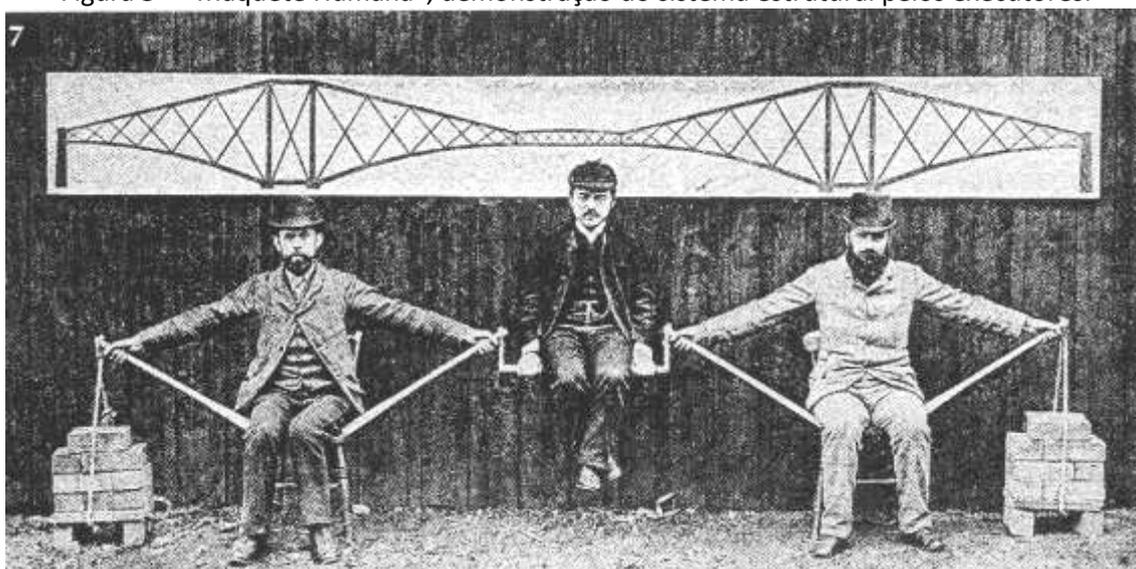
Além disso, é interessante observar a maneira empírica que os executores da ponte utilizaram para demonstrar o sistema estrutural utilizado no projeto. Através de uma “maquete humana” é possível notar os pesos colocados nas extremidades, que fazem o papel dos pilares. (Figura 5).

Figura 4 – Forth Bridge, Escócia, 1890.



Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 98.

Figura 5 – “Maquete Humana”, demonstração do sistema estrutural pelos executores.



Fonte: LOPES, BOGÉA e REBELLO, 2006, p. 98.

Por meio do estudo de obras marcantes na arquitetura é possível observar a importância do conhecimento técnico e do sistema estrutural – tectônica – para a realização de uma arquitetura de boa qualidade (INOJOSA, 2010).

O conceito de estrutura está relacionado a expressão “tectônica”, usada para descrever a relação da arquitetura com a estrutura, e é definido por Bruno Santa Cecília (2006):

“(...)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. (...). 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)

Já em “Matrizes Tectônicas da Arquitetura Moderna Brasileira 1940 – 1960. ”, Rogério Pontes Andrade (2016) resume o significado do termo, apontando para sua relação entre estrutura e forma:

“O termo tectônica deriva do grego tektonikós e significa o que é relativo à arquitetura, à construção, à estrutura (HOUAISS, 2001, p. 2684). Possivelmente, sua aplicação mais difundida esteja na geologia, onde designa o estudo da estrutura da terra. No campo da arquitetura, a teoria tectônica (Bötticher, 1843) refere-se à síntese entre a estrutura e a aparência dos edifícios.” (ANDRADE, 2016)

A noção de tectônica, aparece em textos de historiadores no século XIX ainda relacionados à arte e escultura, para descrever o caráter técnico, formal dos objetos artísticos. Mais tarde, com a aproximação da arte e da arquitetura, o termo passou a ser usado também para descrever a forma estrutural na arquitetura e ganhou força durante as primeiras décadas do século XX, com a aproximação da forma estrutural com a concepção arquitetônica. Na década de 1990, Kenneth Frampton retoma o termo justamente para criticar uma excessiva ornamentação na arquitetura, o que chama de cenografia em “Rappel a l'Ordre: Em Defesa da Tectônica”: “A tectônica volta à tona hoje como categoria crítica devido à tendência de redução da arquitetura à cenografia.” (FRAMPTON, 1990 In: Revista Gávea, nº 12, 1994, pp. 307-319.). Nesse artigo, Frampton defende um retorno à tectônica, com intuito de valorizar as formas estruturais, verdadeiras e funcionais, na arquitetura.

Desde a arquitetura gótica da catedral de Notre Dame, 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 “Forma Estrutural” ou a “Arte Estrutural”.

A “Arte Estrutural” surge com a Revolução Industrial, com os novos materiais e os novos desafios da tecnologia. Coberturas para grandes vãos, edifícios mais altos (arranha-céus), e pontes

extensas surgiram como resposta de uma tecnologia moderna que foi tornada pública. E é exatamente nesses novos equipamentos urbanos que se expressa a Arte Estrutural (BILLINGTON, 1983). Vale destacar, todavia, que em muitos estudos sobre a Revolução Industrial a tecnologia de edifícios é colocada em segundo plano, em comparação com a tecnologia das máquinas que foram criadas no período.

David P. Billington (1983) considera Arte Estrutural as obras que buscaram usar o potencial máximo do material (eficiência) sem deixar de lado a preocupação estética. Além desses dois ideais, eficiência e estética, a Arte Estrutural teve que se basear na economia, tendo em vista que surgiram na maioria das vezes para suprir demandas do poder público.

A demanda pública se utiliza dos princípios de pouco gasto, em pouco tempo, de forma racional, com manutenção simples e barata. Tais características tendem a tornar a forma final mais simples; essa simplicidade, se alinhada com os conceitos de estética e eficiência, cria formas leves, características da Arte Estrutural.

Muitas vezes uma obra de Arte Estrutural não obedece necessariamente nenhuma teoria científica vigente, e sim desenvolve uma teoria aplicável somente naquele caso. Isso torna a obra única, característica de trabalho de engenharia específico, diferindo, portanto, de trabalhos científicos consolidados. Essa prática estrutural foi utilizada por Robert Maillard em suas pontes, como a de Stauffacher, 1899.

Com relação a obras nacionais, podemos ver essa mesma prática nas soluções do Engenheiro Joaquim Cardozo para as formas desenhadas por Oscar Niemeyer, como, por exemplo, a “cúpula invertida” do Congresso Nacional.

A aplicação de teoria científica pura nem sempre é a melhor opção para todos os casos de engenharia ou arquitetura. Existem exemplos claros de repetição de erros a partir de cálculos estruturais genéricos, tais como as várias pontes suspensas defeituosas construídas nos anos 30, sustentadas pela teoria da moda no período. A mais conhecida dessas pontes é a Ponte sobre o Estreito de Tacoma (Tacoma Narrows Bridge), que se tornou famosa quando seu colapso, em 1940, foi gravado em filme.

É preciso entender que a tecnologia estrutural, na medida em que faz parte de elementos de grande visibilidade para a sociedade, não pode estar desvinculada de alguma forma de arte. Existe uma grande diferença entre desenvolver a tecnologia para uma máquina e a tecnologia para uma ponte, vistas as diferentes influências que terão para o público em geral. As estruturas são permanentes, pertencem a locais específicos e acabam se tornando referenciais para a sociedade e mexendo com sua auto-estima, daí a importância da Arte Estrutural.

A Arte Estrutural, além de se basear nos princípios de eficiência, economia e estética é definida como um elemento de três dimensões – Científica, Social e Simbólica.

Para se destacar como Arte Estrutural, a engenharia deve abranger as três dimensões, pois a primeira engloba o princípio de eficiência, do uso racional do material, explorando todo seu potencial. Na segunda dimensão, a Social, encontramos o princípio da economia: é o público que normalmente paga pela obra de Arte Estrutural. A dimensão simbólica, por sua vez, pode ser considerada a mais importante entre as três. Uma obra artística de engenharia deve carregar um simbolismo, deve se tornar importante para a população do lugar onde se encontra, e tal simbolismo está diretamente ligado ao resultado estético da obra.

O uso da técnica na vertente da Arquitetura Moderna arquitetura é abordada nesse trabalho. Em tal vertente destaca-se a preocupação com a exploração da estrutura como elemento plástico e busca a aplicação do conhecimento na construção.

No surgimento das primeiras influências que culminaram na vasta e variada produção arquitetônica do Movimento Moderno, no Brasil e no mundo, podemos perceber a presença de dois fatores essenciais: o material – concreto – e o conhecimento técnico – em estrutura e sistemas construtivos – dos arquitetos. Esse conjunto vai propiciar o desenvolvimento da Arquitetura Moderna.

Os materiais usados nas estruturas dos edifícios durante a transição da Arquitetura Neoclássica do século XVIII e o período que precedeu o início do chamado Movimento Moderno tiveram grande importância na viabilidade de novas formas, na realização de edifícios em altura e na possibilidade de utilizar grandes vãos e balanços. Nesse contexto a tecnologia do ferro (fundido ou forjado), do aço e posteriormente do concreto armado possibilitaram o desenvolvimento de novas formas de se construir que culminaram no Movimento Moderno.

2.1 Uso dos Materiais: da Arquitetura Neoclássica ao Movimento Moderno

2.1.1 Ferro

O papel do material – ferro e aço – utilizado na construção de edifícios foi essencial para o surgimento de novas possibilidades para a arquitetura do final do século XIX.

O século XVIII foi marcado pela expansão dos centros urbanos e o aumento da comunicação entre eles, o que levou à preocupação em se construir novas e eficientes vias de comunicação (estradas e canais) que viabilizassem o comércio entre as cidades. A intensa necessidade de

construção e pontes ao longo das novas estradas no final do século XVIII e início do século XIX trouxe a necessidade de evolução na tecnologia construtiva de pedra e madeira, abrindo campo para novos materiais, como ferro e guza (BENEVOLO, 2001). Nesse contexto, em 1779 Abraham Darby III e seu arquiteto Thomas F. Pritchard construíram a primeira ponte de ferro fundido, sobre o Rio Severn, próximo a Coalbrookdale, na Inglaterra (Figura 6). A partir daí, surgem várias correntes de construtores de pontes utilizando esse material, como Tom Paine, nos Estados Unidos, Thomas Telford, na Inglaterra, entre outros (FRAMPTON, 1997).

Figura 6 – Iron Bridge (Ponte de Ferro) – Ponte sobre o rio Severn, Coalbrookdale, Inglaterra, 1779 – Abraham Darby III e seu arquiteto Thomas F. Pritchard.



Fonte: Herrad Elisabeth Taubenheim – Structurae - <https://structurae.net/photos/155192-iron-bridge>

Além do uso do ferro nas estruturas de pontes, durante o século XVIII, o material foi usado também em edifícios, reforçando estruturas de alvenaria, como no pórtico de Jacques-Germain Soufflot para a Igreja Ste-Geneviève (1772) – atual Panteão de Paris (Figura 7) que é registrado como um uso ainda primitivo e precursor do concreto armado. Vale lembrar que o concreto simples já havia sido na cúpula de maior vão livre da antiguidade, o Panteão de Roma com 44m de vão (HELENE, 2006). Ou ainda a Fiação de Linho de Charles Bage, em Shrewsbury, Inglaterra, primeiro edifício com estrutura de ferro fundido construído no mundo (FRAMPTON, 1997).

A tecnologia do ferro – ferro fundido e ferro forjado – empregada na crescente expansão da ferrovia na Europa e na América do Norte foram paralelamente se integrando à indústria da construção de pontes e edifícios ao longo do século XIX, ganhando espaço pela sua característica de resistência ao fogo, adequada para construção de galpões de múltiplos pisos e permitindo uso em grandes vãos das vigas “I”, desenvolvidas na década de 1830, nos estudos do engenheiro William Fairbain, de Manchester, Inglaterra e de seu colega matemático Eaton Hodgkinson (ADDIS, 2009). Podemos ver essa tecnologia aplicada no depósito do estaleiro naval de Sheerness, também na

Inglaterra, edifício de 4 andares projetado pelo engenheiro Cel. Godfrey T. Greene em 1860 (Figura 8) (FRAMPTON, 1997).

Figura 7 – Fachada do Panteão de Paris.



Fonte: Foto do autor.

Figura 8 – Detalhe de um feixe de teto de ferro fundido da estrutura do depósito de barcos do estaleiro de Sheerness, de Godfrey T. Greene, em 1859.



Fonte: Eric de Mare – English Heritage NMR - <http://viewfinder.english-heritage.org.uk>

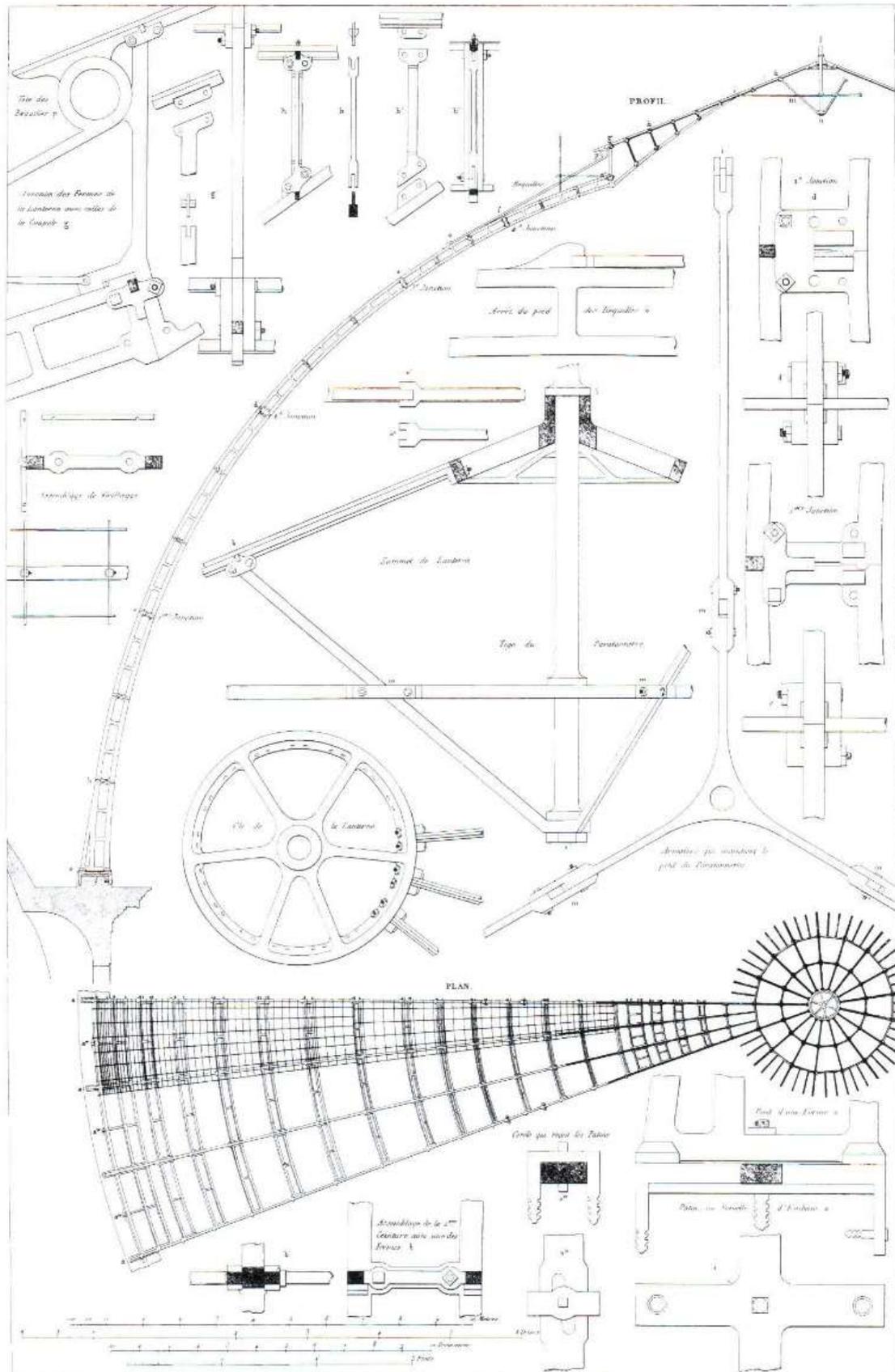
O uso das estruturas de ferro como opção de material resistente ao fogo é identificado na presença cada vez mais comum dessa tecnologia em armazéns e edifícios industriais do século XIX. Na França, entre 1808 e 1813 a cobertura do mercado de trigo de Paris – Halle au Blé – foi reconstruído em ferro, com um projeto de François-Joseph Bélanger que utilizou nervuras principais de ferro fundido e anéis concêntricos de ferro forjado (Figura 9). A cobertura original, em madeira, havia sido destruída em um incêndio em 1803.

Outras estruturas, como as coberturas de igrejas, suscetíveis a serem atingidas por raios devido à altura de suas cúpulas foram também reconstruídas em ferro, como na catedral de Chartres e a na abadia de Saint-Dennis, na França, respectivamente em 1836 e 1845-46, ou ainda construídas em ferro substituindo projetos originalmente pensados em alvenaria, como no caso da Catedral de São Isaque, em São Petesburgo, Rússia. Esta última – construída na fundição do engenheiro escocês Charles Baird, com projeto do arquiteto francês Auguste Richard Montferrand e cálculos do engenheiro russo P.K. Lomonovsky – foi utilizada como protótipo para a construção da cúpula do capitólio dos Estados Unidos em Washington, entre 1856 e 1863 (ADDIS, 2009).

Com o uso do ferro em edificações cada vez mais difundido, a indústria do ferro cresceu em toda a Europa, fazendo com que a tecnologia também se desenvolvesse, permitindo a criação de novos processos de fabricação em escala e com menor custo. Além disso, as características físicas do material também eram exploradas, a grande resistência mecânica e a versatilidade maior em relação aos materiais utilizados até então proporcionavam novas formas que faziam uso da leveza e infinitas possibilidades das estruturas, principalmente nas coberturas. Nesse período, as cidades europeias sofriam grandes mudanças, alavancadas pelo progresso da revolução industrial que moldava as cidades modernas a partir da industrialização e da construção de grandes edifícios comerciais nos grandes centros, da evolução do transporte ferroviário que proporcionaram a migração dos moradores para o subúrbio e a viabilização de grandes centros de entretenimento e diversão pública, como museus, galerias, jardins, teatros (ADDIS, 2009).

Além do ferro, o vidro era outro material cujo uso se difundia na construção de mercados, estações e galerias, já que as estruturas modulares de ferro permitiam grandes abóbodas de berço envidraçadas como na Galerie D'Orléans (Figura 10) de Pierre-Louis Fontaine, construída entre 1828 e 1830 no Palais Royal em Paris (KÜHL, 1998). A característica de pré-fabricação das construções em ferro e vidro permitiram uma rápida expansão dessa tecnologia pelo mundo através da exportação de “kits” de estruturas fabricados nos países industrializados, com destaque para a indústria siderúrgica Inglesa, pioneira no desenvolvimento do setor (BENEVOLO, 2001).

Figura 9 – Ilustração de peças utilizadas na estrutura de ferro na cúpula do Halle au Blé, Paris, 1808-1813, de François-Joseph Bélanger.



Fonte: ADDIS, 2009 – Pág. 296

Figura 10 – Cartão Postal da Galeire d’ Orléans, no Palais Royal, de Pierre-Louis Fontaine, de 1828.



Fonte: Picclick - <https://picclick.fr/CPA-PARIS-1e-Palais-Royal-La-Galerie-dOrleans-332381054730.html>

Nas décadas de 1840 e 1850, com a grande expansão urbana nos Estados Unidos, surgiram indústrias de fundição na costa leste do país, como as fundições de James Bogardus e Daniel Badger, que produziam fachadas em ferro fundido para edifícios altos que ainda usavam estruturas com colunas internas de ferro e vigas de madeira, mais tarde substituídas por vigas de ferro forjado, vencendo os grandes vãos internos (FRAMPTON, 1997). A empresa de Badger – Architectural Iron Works – especializou-se nesse tipo de fachada que se caracterizava por proteger a edificação de incêndios iniciados em edificações vizinhas e por proporcionar uma variedade de estilos arquitetônicos, como o exibido no edifício Haughwout, do arquiteto John P. Gaynor, em Nova York (Figura 11), também conhecido por ser o primeiro edifício público a utilizar um elevador Otis (ADDIS, 2009).

A tecnologia do ferro forjado, com a produção de perfis de ferros laminados cada vez maiores e de qualidade superior, acompanhada pelo desenvolvimento das técnicas de rebitagem a vapor ou hidráulica no final da primeira metade do século XIX possibilitou a utilização de estruturas independentes de ferro, largamente utilizadas nas construções de edifícios no final do século. Essa tecnologia evoluiu a partir da necessidade da criação de telhados de vão maiores e a prova de fogo para a cobertura de rampas de lançamentos de navios dos estaleiros, que não contavam com as paredes de alvenaria para resolver o problema de estabilidade e funcionarem como painéis de cisalhamento. Exemplos dessas estruturas são as coberturas construídas por George Baker em ferro forjado e ferro fundido, marcados pela utilização pioneira de pilares de seção H de ferro fundido

(ADDIS, 2009) como a cobertura da rampa 4 do estaleiro de Chatham – Chatham Historic Dockyard, construída entre 1847 e 1848 com 26 metros de vão livre (Figura 12 e Figura 13).

Figura 11 – Edifício Haughwout, de Pierre-Louis Fontaine, de 1828.



Fonte: Kenenth C. Zirkel – Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:E.V._Haughwout_Building,_Broadway,_New_York.jpg

Figura 12 – Imagem interna da estrutura da cobertura em ferro da rampa 4 do Chatham Historic Dockyard, construída entre 1847 e 1848, Kent, Inglaterra, de George Baker.



Fonte: ADDIS, 2009 – Pág. 355

Figura 13 – Imagem externa da fachada da rampa 4 do Chatham Historic Dockyard, construída entre 1847 e 1848, Kent, Inglaterra, de George Baker.



Fonte: ADDIS, 2009 – Pág. 355

Com essa experiência, em 1850 a tecnologia das estruturas livres foi utilizada por Joseph Paxton na elaboração do projeto do Palácio de Cristal, no Hyde Park em Londres. Paxton utilizou toda sua experiência na construção de estufas para entregar o projeto em tempo recorde – 8 dias (FRAMPTON, 1997). Essa obra é marcante na história do uso do ferro, pois coloca em prática diversos conhecimentos do uso do ferro, como a modulação – 2,43m (Figura 14), ligações rígidas garantindo estabilidade, sistema de pórticos em duas direções, travamentos diagonais (contraventamento em X), entre outros, que tornaram o Palácio de Cristal uma referência para obras posteriores que utilizavam a estrutura independente (ADDIS, 2009).

Figura 14 – Módulo da estrutura independente do piso da galeria do Palácio de Cristal, Hyde Park, Londres, construída entre 1850 e 1851, de Joseph Paxton.



Fonte: ADDIS, 2009 – Pág. 360

Nos anos seguintes, a disseminação do conhecimento técnico e das novas tecnologias tomou novas proporções com o avanço das ferrovias e dos navios a vapor, que distribuíam produtos e levavam cada vez mais pessoas de um país ou de um continente a outro. A partir do exemplo do Palácio de Cristal, grandes exposições, nacionais e internacionais se multiplicaram pelo mundo, ajudando a expor e espalhar as possibilidades da tecnologia construtiva do ferro (ADDIS, 2009). Em 1889, em Paris, a exposição internacional que celebrava o centenário da Revolução Francesa foi marcada pela imponente presença da Torre Eiffel, de Gustave Eiffel, ícone da construção em ferro.

2.1.2 Aço

Já no início da década de 1870, o aço começa a se tornar mais presente na construção civil e aos poucos começava a substituir o ferro forjado, nessa época já disseminado de forma natural entre os construtores. A qualidade do aço aumentava, com processo de produção que também o tornavam mais acessível como o processo Bressemer (Inglaterra, 1856) e Siemens-Martin (Alemanha 1864).

Nesse mesmo período, nos Estados Unidos, uma crescente demanda por mais espaços comerciais, principalmente em Nova York, com o fim da Guerra Civil em Chicago, devido ao grande incêndio de 1871, desencadeou um processo de desenvolvimento de tecnologias que permitissem construir edifícios cada vez mais altos, aproveitando ao máximo o potencial construtivo dos terrenos.

Assim, as estruturas independentes dos galpões, estações e estufas europeias serviram de inspiração para engenheiros e arquitetos como George Post, que criou estruturas de pilares de ferro em substituição às paredes internas de alvenaria e vigas de ferro em perfil “I”, permitindo estruturas muito mais leves e mais baratas. Ou ainda, William LeBaron Jenney, que chegou a estudar engenharia na França, antes de se estabelecer em Chicago e criar estruturas de edifícios de escritório em ferro e aço, que usavam pilares afastados da fachada, como no Palácio de Cristal, o que proporcionava uma fachada em alvenaria mais esbelta, mais leve – suportando apenas o peso próprio, permitindo maior utilização da área de piso e maiores aberturas de vidro (ADDIS, 2009).

Jenney também foi responsável pela criação do “arcabouço estrutural”, que consistia em acrescentar vigas a cada piso, dividindo a altura útil das alvenarias a um pavimento. Além disso, Jenney também inovou ao utilizar na estrutura do Home Insurance Building, em Chicago, de 1885, vigas de aço com perfil “I”, fabricadas com o processo Bessemer, no lugar das vigas em ferro forjado (ADDIS, 2009).

Essas edificações que utilizavam estruturas independentes de ferro ou aço expunham um contraste entre a simplicidade do sistema estrutural e a complexidade dos ornamentos de fachada que ainda eram utilizados e requeridos pelos usuários da época.

Ainda no final do século XIX, durante as décadas de 1880 e 1890 nos Estados Unidos, uma relação mais próxima entre arquitetos e engenheiros e o desenvolvimento tecnológico, trazidos pela invenção do elevador de passageiros e a aplicação das estruturas de aço nas edificações (FRAMPTON, 1997), possibilitou a construção de edifícios altos.

Ao contrário do que acontecia na escola europeia da época, conhecida como Beaux Arts – Belas Artes, nessa nova relação da tecnologia com a construção de edificações, o arquiteto não seria mais o único protagonista da concepção da obra, dividindo esta função com o engenheiro, ou até mesmo se resumindo ao papel de decorar as fachadas de grandes edifícios de múltiplos pavimentos em estrutura de ferro ou aço.

A construção de edifícios em altura e o uso do aço nas estruturas de edificações propiciou um avanço tecnológico que se espalhou rapidamente da América do Norte para o resto do mundo em no início do século XX, edifícios de mais de 20 andares já eram comuns em várias cidades grandes da América do Sul, África, Austrália e Extremo Oriente (ADDIS, 2009).

O aço propiciava muitas vantagens para a construção, como a rapidez na construção e o controle tecnológico que permitiu a propagação da tecnologia pelo mundo em um curto espaço de tempo – 20 anos. Porém, também trazia aos arquitetos da época certa limitação de criação, por se tratar de um material altamente industrializado. O desenvolvimento criativo dos projetos estruturais era baseado em condições de fabricação, com o desenvolvimento “da engenharia de produção”. Além disso, o ferro e o aço eram materiais mais apropriados a estruturas independentes e carregavam, nos casos de edifícios de múltiplos pavimentos uma grande carga de exigências de proteção contra incêndio que impedia os arquitetos de exibirem a estrutura e o material de forma pura e verdadeira, restringindo aos arquitetos o trabalho de decoração de fachadas.

Nesse período, surgem algumas exceções, como o Guaranty Building em Buffalo, Nova Iorque, projetado pelo arquiteto Louis Sullivan em 1895 (Figura 15).

Louis Sullivan mostrava, uma hipótese ainda embrionária e teórica de visão mais pura da arquitetura, diminuindo o uso de ornamentos excessivos por considera-los “mentalmente um luxo, não uma necessidade” buscando a “produção de edifícios bem formados e agradáveis em sua nudez” (SULLIVAN, 1892 apud FRAMPTON, 1997). Sullivan também cunhou a expressão “a forma segue a função”, muito difundida na arquitetura moderna.

Sullivan criou assim uma linguagem arquitetônica adequada à estrutura dos “arranha-céus”, explorando de maneira mais harmônica os ornamentos ainda presentes nos revestimentos

das fachadas e contornos das janelas, mas destacando a forma retilínea dos pilares. Essa ideia é vista em prática na cornija côncava do Guaranty Building, onde a força dos pilares que formam a fachada do edifício se juntam em torno das janelas circulares do último pavimento (FRAMPTON, 1997).

Figura 15 – Guaranty Building em Buffalo, Nova Iorque, de Louis Sullivan, 1895.



Fonte: commons.wikimedia.org

Ainda nos Estados Unidos, discípulo de Louis Sullivan durante o final do século XIX, o arquiteto americano Frank Lloyd Wright, que procurava não se enquadrar em nenhum movimento da arquitetura de sua época buscou romper com as regras tradicionais da arquitetura vigente e foi reconhecido entre o final do século XIX e o início do século XX pelas “casas das pradarias” ou “Prairie Houses” americanas, que se caracterizavam pela fachada frontal retilínea em contraste com a assimetria das fachadas dos jardins, inclinações mínimas dos telhados e janelas em linha, características que preconizavam elementos estéticos do modernismo (FRAMPTON, 1997), vistos

por exemplo no projeto de Wright para a Robie House, na Universidade de Chicago em 1910 (Figura 16).

Durante o período mais fértil da produção de Wright em seu estilo pradarista ele contou em seu ateliê com uma equipe multidisciplinar de profissionais, entre artistas plásticos, paisagistas e com o engenheiro Paul Mueller, responsável pelos projetos estruturais das obras de Frank Lloyd Wright, incluindo o último exemplo dessa faz na obra do arquiteto, o Hotel Imperial de Tóquio, construído a partir de 1919, no Japão, projeto pelo qual o engenheiro foi aclamado, tendo o edifício sobrevivido ao grande terremoto de 1923.

Figura 16 – Robie House, Universidade de Chicago – IL, EUA, de Frank Lloyd Wright, 1909.



Fonte: Dan Smith - Creative Commons

No Brasil a tecnologia da construção em aço demorou a se desenvolver, já que esbarrava, durante o início do século XIX na falta de mercado interno que fosse capaz de “consumir” tais tecnologias e na precariedade da infraestrutura de transporte. Somente no final do século XIX, com o aumento da população de imigrantes, sobretudo europeus, é que a indústria urbana brasileira se desenvolve e os novos centros urbanos começam a absorver os sistemas construtivos, principalmente ingleses. Baseados na tecnologia do ferro e alvenaria e posteriormente do aço, as tecnologias vindas da Europa são responsáveis pelos novos desenhos de cidades brasileiras que investiam em melhorias de saneamento, transportes e no próprio “embelezamento”, através do emprego de um novo “padrão estético” da arquitetura clássica e posteriormente o ecletismo (SANTOS, 2008). O uso em larga escala de tecnologia e produtos importados freou o

desenvolvimento da indústria brasileira e impediu o desenvolvimento técnico da mão-de-obra da construção civil no Brasil.

2.1.3 Concreto

As origens do concreto como material estrutural, ainda não armado com aço, já aparece em grande escala na construção das estradas e pavimentações da antiga Roma, como a Via Ápia, de 312 a.C., porém, o concreto armado moderno tem suas origens datadas em 1824 após o registro da patente do cimento Portland, por John Aspdin. Nessa época, o concreto era pouco aplicado na construção civil, e os destaques do uso desse material estão registrados nas patentes francesa de construção em argamassa armada de Joseph Louis Lambot, para construção de barcos (Figura 17) e Monier, na construção de vasos, em 1855 e 1877, respectivamente (HELENE, 2006).

Figura 17 – Um dos barcos em argamassa armada de Lambot, 1855.



Fonte: O Século XX - oseculoxx.blogspot.com

O uso do concreto armado em estruturas começou a aparecer no final do século XIX, com a industrialização do cimento Portland e pesquisas sobre o novo material, que o tornavam mais confiável e conhecido entre os construtores. Dentre essas pesquisas destacam-se as descobertas de Louis Vicat, inventor, em 1817 do cimento artificial conhecido como outro branco (SIQUEIRA, 2008) e René Ferét, responsável pelo primeiro estudo relacionado à dosagem dos materiais que compõe

o concreto em 1896, quando chefiava o Laboratório de “Ponts et Chaussées”, na França (TUTIKIAN e HELENE, 2011).

Em 1892, François Hennebique, um construtor francês registrou patente para um projeto e construção de uma estrutura utilizando um novo sistema construtivo que foi chamado de “béton armé” ou concreto armado (Figura 18). Hennebique, um autodidata da construção, demonstrou a confiabilidade e segurança de seu sistema ao projetar e construir um edifício de sete andares, o primeiro com estrutura inteira em concreto armado, que substituiu as estruturas de aço e os pisos metálicos ou de madeira por pilares e vigas e lajes de concreto armado (HELENE, 2006). O edifício, inaugurado em 1901 (Figura 19) foi sua residência e sede de sua empresa em Paris e ainda existe até os dias de hoje.

Hennebique também se destacou por sua capacidade de administração nos negócios e marketing de seus produtos. Entre 1892 e 1909 ele passou de um único escritório de projetos e construções para 62, além de dezenas de profissionais licenciados por ele para executarem obras seguindo suas patentes espalhados pelo mundo todo. Assim, Hennebique foi responsável por uma rápida expansão da técnica do concreto armado, resultando na execução de mais de três mil projetos e cerca de 100 pontes por ano apenas nos primeiros 7 anos do negócio (KAEFER, 1998).

O concreto armado, no entanto, ainda era visto como um material inferior ao aço, sendo pouco aceito em construções de relevância. O arquiteto francês Auguste Perret foi pioneiro no uso do concreto como elemento plástico na composição dos edifícios. Perret foi responsável por diversas obras durante a primeira metade do século XX, como o edifício 25-bis em 1903, a garagem da rue Ponthieu em 1906 (Figura 20), o Théâtre Champs-Élysées em 1913 (Figura 21) e a igreja de Notre-Dame Le Raincy, em 1923.

Figura 18 – Patente do Concreto Armado de Hennebique, 1892.

No. 611,907.

Patented Oct. 4, 1898.

F. HENNEBIQUE.

CONSTRUCTION OF JOISTS, GIRDERS, AND THE LIKE.

(Application filed Dec. 29, 1897.)

(No Model.)

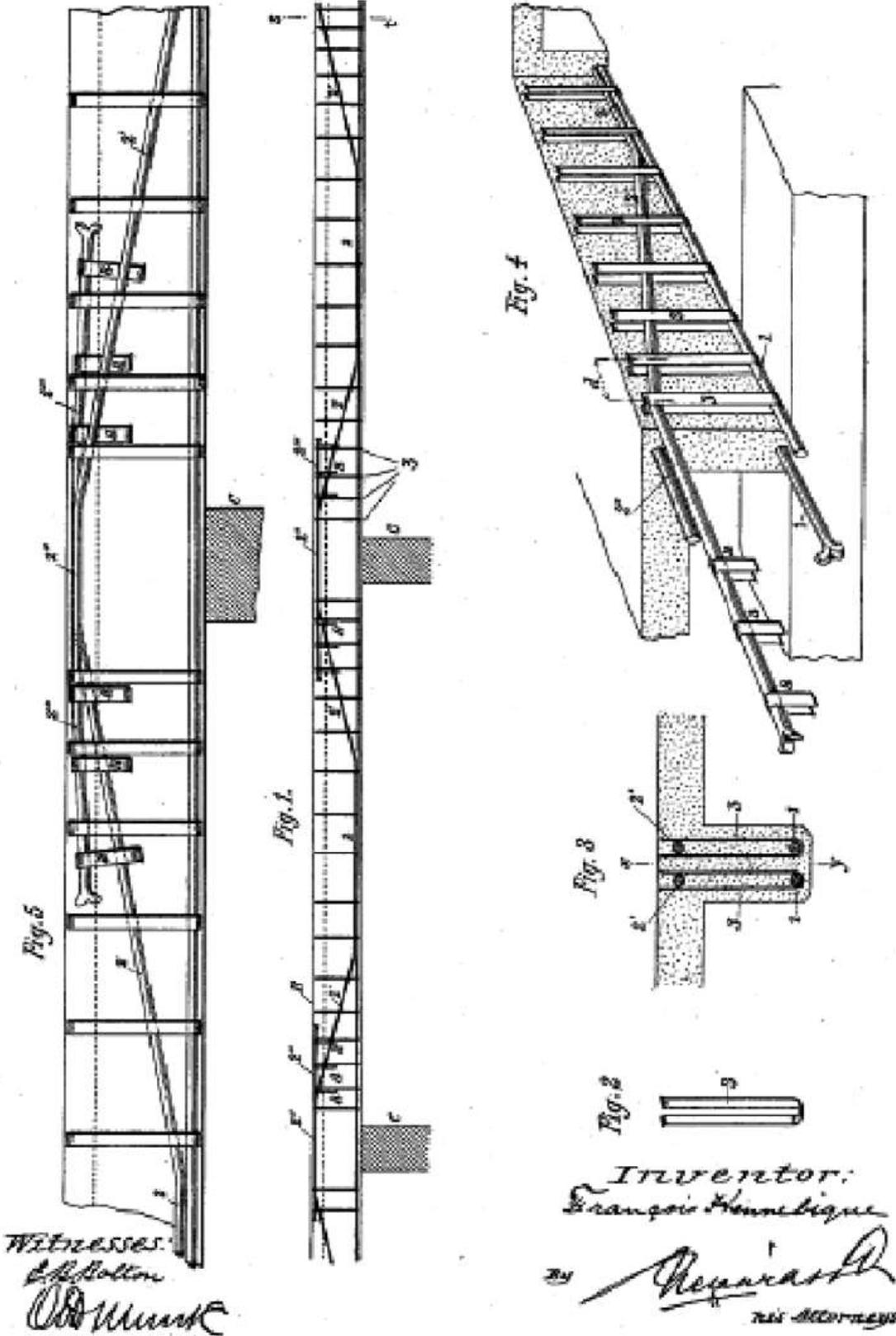


Figura 19 – Edifício Hennebique, inaugurado em 1901, Paris, França.



Fonte: Foto de Gérard Métron, em Structurae: International Database and Gallery of Structures - www.structurae.net

Figura 20 – Fachada da garagem da rue Ponthieu, em Paris, de Auguste Perret 1906.

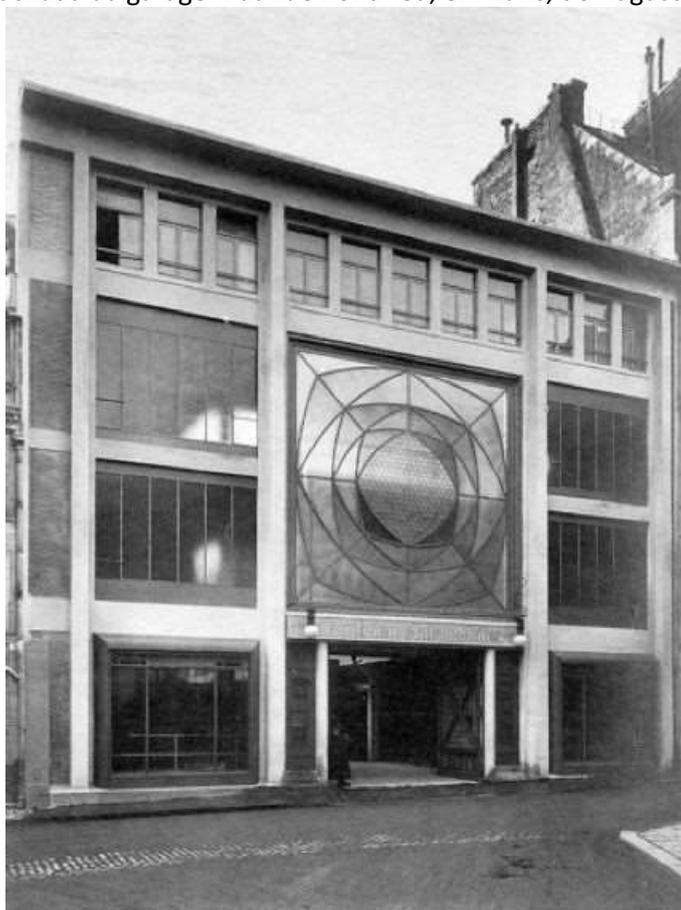


Figura 21 – Fachada do *Théâtre des Champs-Élysées*, em Paris, de Auguste Perret 1913.

Fonte: Foto de Roland Nizet, em Structurae: International Database and Gallery of Structures - www.structurae.net

No início do século XX surgem então, de forma mais relevante, as estruturas em concreto armado, que a princípio adotavam o material em substituição ao aço por razões de segurança contra incêndio e principalmente pelo alto custo do aço. Nesse início, o uso do concreto nas edificações se limitava à substituição do material, sem explorar os grandes avanços estéticos que o concreto proporcionaria nas décadas seguintes.

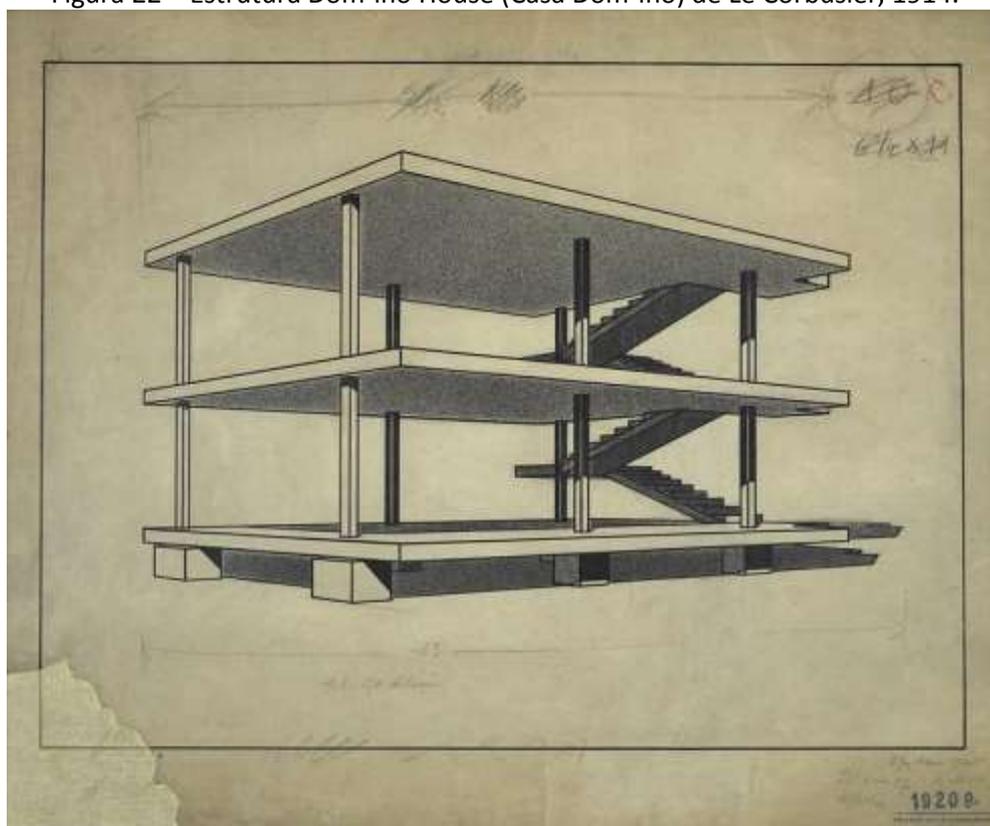
A partir de 1910 o concreto passa a ser aos poucos utilizado de forma plástica e estética. Arquitetos começam a explorar a natureza do material e as possibilidades de formas livres e superfícies curvas, mantendo sua capacidade estrutural em grandes balanços ou cascas de coberturas de grandes vãos, não se limitando a elementos bidimensionais como pilares e vigas (ADDIS, 2009).

Em 1914, Le Corbusier (pseudônimo do arquiteto franco-suíço Charles-Édouard Jeanneret) criou pela primeira vez uma estrutura independente de concreto armado, utilizando pequenos balanços e uma laje lisa no projeto das Dom-ino Houses (Figura 22) onde já apareciam os primeiros princípios da arquitetura moderna de Le Corbusier, como a planta livre. A Dom-ino House foi um protótipo criado para uma construção em série de casas, pois sua estrutura era extremamente

econômica para os padrões da época. Esse sistema vislumbrava a reconstrução das cidades destruídas durante a primeira guerra mundial e foi descrito assim por Le Corbusier:

“Aqui, em 1914, foi uma concepção de um sistema de construção que previa os problemas da reconstrução do pós-guerra. Foi apenas mais tarde, em 1929, na época da Loucheur Law, que poderiam ser aplicados os princípios da casa Domino. (...) Foi concebido um sistema estrutural - um quadro - completamente independente das plantas baixas da casa: este quadro receberia os pisos e escadarias. Era para ser fabricados a partir de elementos padronizados para serem montados uns aos outros permitindo grande variedade no agrupamento das casas. O concreto armado era para ser feito sem molde; para ser mais exato, haveria um arranjo especial elaborado no local que permitiria o enchimento de lajes de piso totalmente liso e nivelado por meio de um simples andaime de vigas duplo-T fixado temporariamente a colares fixados à parte superior de cada coluna; as colunas de concreto armado, preenchidas no início do trabalho iria ser alinhadas pelo sistema acima do andaime. O construtor entregaria os quadros marcados e agrupados a partir da solicitação do arquiteto ou, mais simplesmente, a partir do pedido do cliente. Outro contratante forneceria todos os elementos adicionais, que poderiam ser produzidos em massa: as janelas, portas, etc. Isso resultaria em um método completamente novo de construção: as janelas seriam anexadas ao quadro estrutural, as portas seriam fixadas com seus quadros e alinhadas com os painéis de parede para formar os ambientes. Então, poderia começar a construção das paredes exteriores.” (Tradução do autor de LE CORBUSIER, “Le Corbusier et Pierre Jeanneret, Oeuvre complète, volume1, 1910-1929”, em Fondation LE CORBUSIER - www.fondationlecorbusier.fr)

Figura 22 – Estrutura Dom-ino House (Casa Dom-ino) de Le Corbusier, 1914.

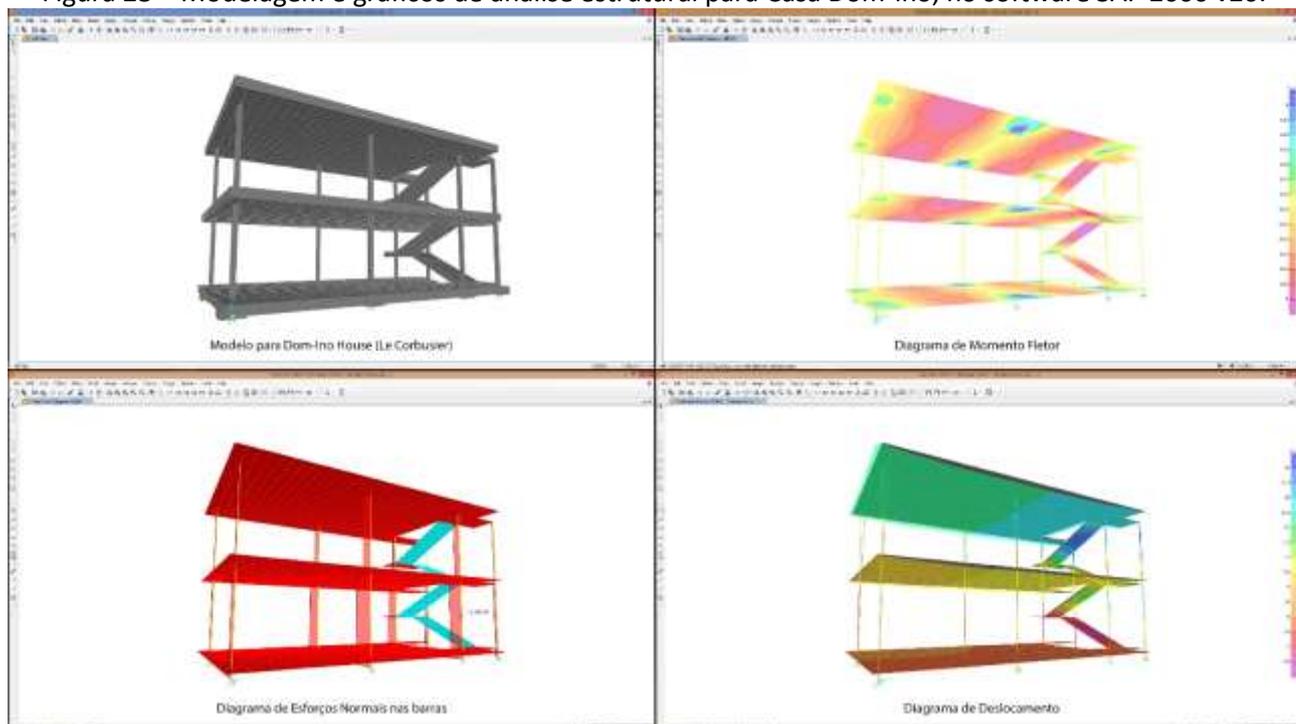


Fonte: Fondation LE CORBUSIE - www.fondationlecorbusier.fr.

O famoso esquema da casa Dom-ino é o módulo principal, ou “*L’ossature standard*”, do sistema publicado por Le Corbusier – “*Les Maisons Dom-ino, Oeuvre Complete, Volume 1, 1910-29*”, citado por İSKENDEROĞLU (2009). Esse módulo principal aparece como uma das possíveis plantas de tipos diferentes nos esboços de montagens alternativas para o sistema construtivo Dom-ino (İSKENDEROĞLU, 2009).

Na Figura 23 é mostrada a modelagem do sistema estrutural do módulo Dom-ino conforme descrito por İSKENDEROĞLU (2009), no programa SAP2000, com os gráficos de momento fletor, esforços normais e deslocamentos gerados pelo software. Notamos no gráfico de momento fletor que há uma concentração de momentos negativos nos encontros dos pilares com as lajes, esses esforços, radiais e circulares em torno desses encontros são esperados e fazem com que as placas tenham que ser mais espessas para suportar o efeito de punção comum às lajes tipo cogumelo, como essas (REBELLO, 2000). No gráfico de esforços normais vemos a distribuição das cargas pelos pilares, até os blocos de fundação. Por fim, o gráfico de deslocamentos mostra que o sistema é rígido, sofrendo deslocamentos inferiores a 1 cm quando submetidos ao peso próprio.

Figura 23 – Modelagem e gráficos de análise estrutural para Casa Dom-ino, no software SAP 2000 v20.



Fonte: Desenhos do Autor. Programa SAP 2000 v20.

Apesar da Dom-ino House ser apenas um protótipo conceitual, previsto para um sistema construtivo de casas em série, uma estrutura muito similar foi utilizada pelo arquiteto em 1931, na “casa do guarda e jardineiro” da Villa Savoye (Figura 24), como é chamada na descrição do panfleto de visita do museu, editado pelo “*Centre des Monuments Nationaux*” da França. Essa casa, localizada na entrada da propriedade da mais famosa obra do arquiteto em Poissy, França, é

considerada o único exemplar da casa mínimo unifamiliar – um modelo de construção apresentado por Le Corbusier e seu primo Pierre Jeanneret no congresso do CIAM de 1929.

Figura 24 – “Casa do guarda e jardineiro”, da Villa Savoye, de Le Corbusier, 1931.



Fonte: Foto do autor.

Em 1923, Le Corbusier publicou “Vers une Architecture” (Por Uma Arquitetura), obra que se apresenta como um manifesto de rompimento com a estética das Belas Artes e avança na exploração das novas formas e possibilidades estéticas do concreto armado. Le Corbusier, ao contrário dos representantes da escola anterior, reconhece a arte na concepção estrutural das edificações:

Os Arquitetos de hoje não realizam mais as formas simples. Operando com o cálculo, os engenheiros usam formas geométricas, que satisfazem nossos olhos pela geometria e nosso espírito pela matemática; suas obras estão no caminho da grande arte. (LE CORBUSIER, 1998. p 11-12)

Le Corbusier defende ainda uma arquitetura capaz de produzir casas em série, valoriza a engenharia industrial de automóveis e aviões e enaltece uma arquitetura mais pura, sem adereços tradicionais de estilos anteriores.

É possível observar esses conceitos em toda sua obra de Le Corbusier, como no Pavilhão da Universidade de Paris, de 1930 (Figura 25). Na Villa Savoye (Figura 26), de 1931, onde conseguiu reunir os “Cinco pontos da Nova Arquitetura” – Planta Livre, Fachada Livre, Pilotis, Terraço Jardim e

Janelas em fita – publicados em 1926 na revista francesa L'Esprit Nouveau - concebida e editada por ele e por Amédée Ozenfant em 1921. E também na Unidade de Habitação de Marselha (Figura 27). Sempre respaldado pelas possibilidades de construção do concreto armado, que o permitia criar o “Volume” e a “Superfície”, dois “lembretes aos arquitetos” publicados por Le Corbusier em “Por uma Arquitetura” em 1923 (LE CORBUSIER, 1923).

Figura 25 – O pavilhão suíço da Universidade de Paris de Le Corbusier, década de 1930.



Fonte: Foto do Autor.

Figura 26 – Villa Savoye de Le Corbusier, 1931.



Fonte: Foto do autor.

Figura 27 – Vistas dos pilotis do térreo da Unidade de Habitação de Marselha (Le Corbusier, 1947).



Fonte: Foto de Paul Koslowski – Fundacion Le Corbusier (www.fondationlecorbusier.fr).

A arquitetura concebida através da racionalidade da estrutura, se utilizando das características estruturais e escultóricas do concreto armado foi se disseminando ao longo das décadas de 20 e 30 do século XX. O engenheiro e arquiteto galês Owen Williams foi um dos primeiros projetistas a destacarem essa relação estética do concreto armado em suas construções (Figura 28).

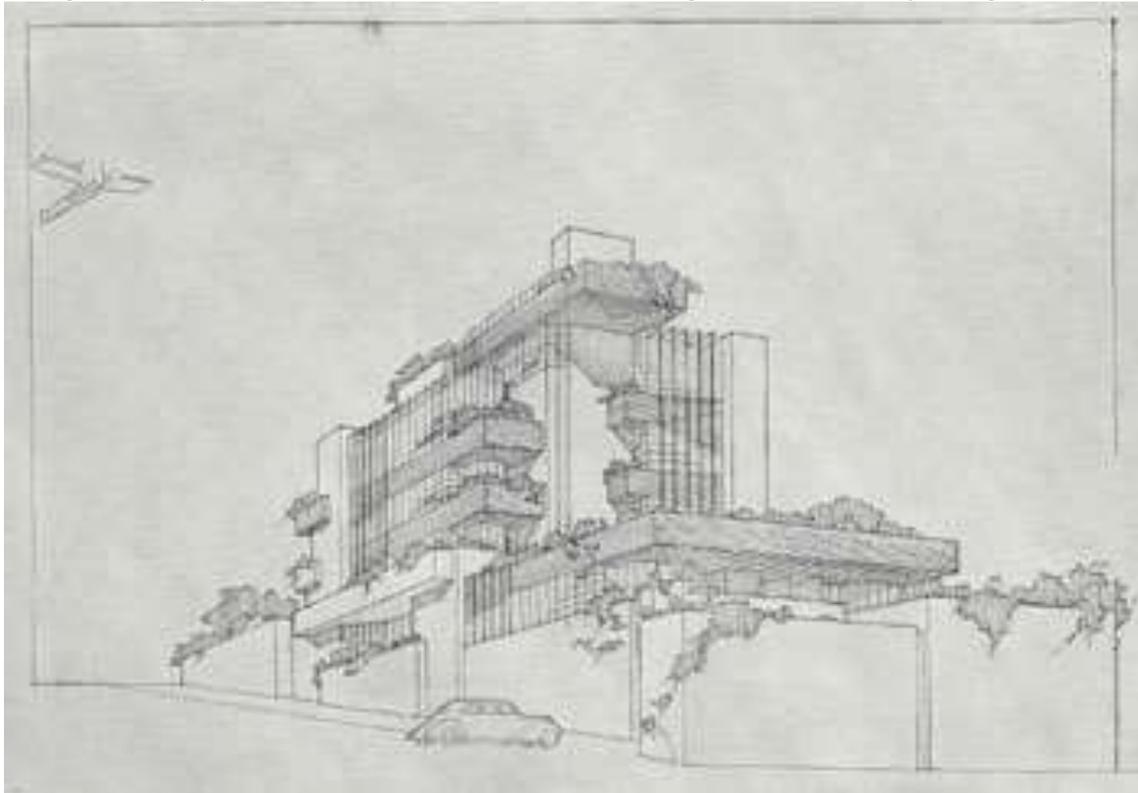
Figura 28 – Corte, mostrando o pórtico rígido e vista do Edifício Daily Express, Londres, de Owen Williams e Elis and Clarke, 1930-32.



Fonte: ADDIS, 2009. p. 516.

Nesse mesmo momento, a partir de 1929, o trabalho do já citado arquiteto Frank Lloyd Wright passa por outro período significativo em sua carreira que tem como marco inicial o projeto para os apartamentos Elizabeth Noble em Los Angeles, onde o arquiteto explora os limites dos balanços em concreto armado (Figura 29). Nessa fase, Wright incorpora novas soluções técnicas e novos materiais, como o sistema modular de paredes cortina, concebido para envolver estruturas de concreto monolíticas (FRAMPTON, 1998).

Figura 29 – Apartamentos Elizabeth Noble, em Los Angeles, de Frank Lloyd Wright, 1929.



Fonte: The Wright Library – steinerag.com

Outra obra marcante desse período e em toda a carreira de Frank Lloyd Wright é a Fallingwater House – Casa da Cascata (Figura 30) - onde o arquiteto utiliza ao extremo o potencial do concreto armado de produzir balanços monumentais, mantendo a leveza do projeto em uma impressionante integração com a natureza que o envolve, a cascata que permeia os planos retilíneos e horizontais de concreto dos balanços, fazendo com que a estrutura pareça flutuar entre as árvores e sobre a água.

Essa derradeira fase da carreira de Frank Lloyd Wright culminou no projeto do Museu Guggenheim em Nova Yourk (Figura 31), de 1943. Onde o arquiteto utiliza os princípios estruturais e espaciais da Fallingwater House aplicando uma ideia estrutural de uma hélice decrescente que se inverte formando uma rampa usada como uma grande galeria espiralada, a qual ele chama de “onda contínua”. A fachada do museu apresenta curvas lisas em concreto armado entremeadas de

iluminação que dão um caráter futurista, característico das últimas criações de Wright (FRAMPTON, 1998).

Figura 30 – Fallingwater House, de Frank Lloyd Wright, 1935-1937.



Fonte: Carol M. Highsmith - Library of Congress

Figura 31 – Museu Guggenheim em Nova Iorque, de Frank Lloyd Wright, 1943.



Fonte: PEREZ, 2016

O raciocínio formal da estrutura de concreto armado é defendido também na Bauhaus, uma escola de artes e arquitetura, a “casa de construção”, como sugere a tradução livre do termo Bauhaus, foi criada em 1918 em Weimar na Alemanha, pelo arquiteto Walter Gropius. A Bauhaus e

seu fundador difundiam uma arquitetura funcional, modular, que pudesse ser reproduzida em escala, características que podem ser observadas nos projetos de Gropius, como a própria sede da escola em Dessau, Alemanha, de 1926 (Figura 32) ou ainda antes na sede da fábrica Fagus em Leine, Alemanha de 1913 (Figura 33).

Figura 32 – Edifício da Bauhaus em Dessau, Alemanha, de Walter Gropius, 1926.



Fonte: ADDIS, 2009. p. 514.

Figura 33 – Fábrica Fagus, em Leine, Alemanha, de Walter Gropius de 1913.



Fonte: Carsten Janssen, commons.wikimedia.org.

A Bauhaus funcionou desde sua inauguração em 1918 até 1933, quando fechou as portas por pressão do governo nazista na Alemanha. Durante todo esse período exerceu forte influência no início do movimento modernista, nas artes e principalmente na arquitetura. Walter Gropius

dirigiu a escola entre 1918 e 1925, passando o comando para Hannes Meyer de 1928 a 1930 e posteriormente a Ludwig Mies van der Rohe de 1930 até 1933.

Mies van der Rohe foi um arquiteto alemão, posteriormente radicado nos Estados Unidos, fortemente influenciado pelo De Stijl – O Estilo, movimento artístico holandês que prezava pelo minimalismo de formas e cores, abstraindo qualquer presença de adereços, seja na arte gráfica ou na arquitetura, vigorou na Europa entre os anos de 1917 e 1931. Ícone da produção de elementos tridimensionais do De Stijl, a cadeira “Red and Blue Chair” de Gerrit Rietveld, criada em 1919 e reproduzida em cores em 1923, mostra a relação dos elementos verticais e horizontais com os planos inclinados objetivando o conforto e a simplificação do desenho do objeto, pensado para ser produzido em série (MOMA, 2004).

Na arquitetura, o único projeto executado totalmente de acordo com os princípios do De Stijl foi a residência Rietveld Schröder, também de Gerrit Rietveld (Figura 34), construída em 1924. Entre as características defendidas pelo movimento estão evidentes na construção a flexibilidade dos espaços interiores, o uso dos planos verticais e horizontais, o uso de cores primárias, demarcando ambientes internos e as ideias puras inerentes ao De Stijl como abstração, precisão, geometria, pureza artística e austeridade (FRACALLOSSI, 2012).

Figura 34 – Residência Rietveld Schröder de Gerrit Rietveld, 1925.



Fonte: FRACALLOSSI, 2012.

Apesar de ter produzido apenas um projeto arquitetônico puramente sob os preceitos do De Stijl, o movimento foi grande influência nas primeiras décadas do modernismo, como pode ser observado nas obras do já citado Mies Van der Rohe, como o pavilhão da Exposição de Barcelona

(Figura 35) de 1929, obra que exibe o apuro da forma e uma total adequação aos materiais utilizados (SAIA, 1955) , frutos de extensas pesquisas do arquiteto que o levou da produção de uma arquitetura ainda neoclássica no início do século XX até os projetos de Chicago, que representam grande influência para a arquitetura moderna e contemporânea, representados pelo aclamado Crown Hall, prédio da escola de arquitetura do Instituto de Tecnologia de Illinois (Figura 36), de 1956. Essas obras mostram grande maturidade do estilo de Mies Van der Rohe ao utilizar em suas obras materiais variados, como aço e concreto, em perfeita harmonia.

Figura 35 – Pavilhão da Exposição de Barcelona de Mies Van der Rohe, 1929.



Fonte: Foto do Autor.

Figura 36 – Crown Hall, Instituto de Tecnologia de Illinois de Mies Van der Rohe, 1956.



Fonte: Joe Ravi - Creative Commons

No final da década de 1920 havia grande relação entre os arquitetos dos principais centros do mundo, os principais nomes da arquitetura influenciavam uns aos outros, participavam de concursos internacionais e se organizavam em exposições, a arquitetura se tornava internacional e

o modernismo se propagava pelo mundo. Porém, em 1928, com a realização do primeiro CIAM – Congresso Internacional de Arquitetura Moderna em Lake Lemán, na Suíça que a o modernismo na arquitetura tomou forma de movimento.

A arquitetura moderna começou a aparecer na Europa ao final da Primeira Guerra Mundial (1914 – 1918), mas ainda em expressões isoladas. Alguns arquitetos utilizavam o exercício da profissão com a finalidade de gerar transformações técnicas, formais e sociais, mas não formavam um movimento expressivo. Foi a partir de 1928 então, nos CIAMs, que esse ideário toma forma de movimento e começa a ser difundido como “Arquitetura Moderna” (CONDURU, 2005).

O primeiro CIAM foi proposto por Le Corbusier, juntamente com outros arquitetos, e recebeu os principais nomes da arquitetura moderna, vindos da França (Le Corbusier, Robert Mallet-Stevens, Auguste Perret e Pierre Chareau), Suíça, Alemanha (Walter Gropius, Erich Mendelsohn, Ernst May e Ludwig Mies van der Rohe), Holanda (Mart Stam e Gerrit Rietveld), Itália, Espanha (Josep Lluís Sert), Áustria (Josef Frank), Bélgica (Victor Bourgeois), Checoslováquia (Adolf Loos), Finlândia (Alvar Aalto), entre outros. Este encontro além de marcar o início do Movimento Moderno na Arquitetura também destacou a arquitetura como construção e o racionalismo formal de uma indústria da construção, reflexos da economia da época e da reorganização social pós-Primeira Guerra (FRAMPTON, 1998).

Outros CIAMs aconteceram em 1929 em Frankfurt, em 1930 em Bruxelas. Em 1932, quando deveria ter ocorrido em Moscou, foi cancelado e ocorreu em um cruzeiro entre Marselha e Atenas, no qual foi redigido a Carta de Atenas, artigo que descreve a cidade modernista, funcional na qual se organizam quatro categorias: Moradia, Trabalho, Lazer e Transporte. Depois disso ocorreram os CIAMs de Paris em 1937, Bridgwater em 1947 e Hoddesdon em 1951, ambos na Inglaterra, Aix-en-Provence em 1953 e finalmente em Dubrovnik em 1956. Ao longo dos anos os CIAMs espelhavam o desenvolvimento da arquitetura e do urbanismo moderno, incluindo os conflitos entre as sucessivas gerações de arquitetos, organizadores dos congressos. Esses conflitos culminaram em um rompimento entre a “velha guarda” representada por Le Corbusier e um grupo de arquitetos conhecidos como Team X, responsáveis pela organização do último congresso o CIAM-X.

A difusão da Arquitetura Moderna contribuiu também para a difusão do uso do concreto armado nas construções, tendo sido esse o material mais utilizado pelos arquitetos modernistas, dada sua capacidade de viabilizar uma liberdade de formas, nitidez das linhas construtivas e a clareza dos volumes arquitetônicos que antes não se via possível com outros materiais (COSTA *apud* SANTOS, 2008, pag. 19).

No Brasil, o concreto armado se tornou rapidamente o material “mais natural” do Movimento Moderno, sendo difundido de forma rápida e se tornando o material mais adequado à

situação brasileira. Além disso, a difusão do sistema construtivo do concreto foi acompanhada de uma intensa campanha de divulgação do concreto como um produto de tecnologia avançada (SANTOS, 2008). A imagem do concreto como solução tecnológica para a construção tanto das obras mais consagradas quanto para as obras mais cotidianas superou seus pontos negativos, como a geração de resíduos, a baixa qualidade técnica nos canteiros ou as dificuldades de modificações ou demolições quando as obras se tornam inadequadas ou obsoletas.

O concreto armado une as características físicas mais favoráveis dos elementos que compõe esse material – a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço. Mais do que isso, a fluidez do concreto armado permite que este tome formas variadas que se adequam tanto aos anseios criativos da arquitetura, quanto às necessidades do sistema estrutural ideal para a distribuição racional das cargas (SALVADORI, 2011).

Assim, os arquitetos brasileiros logo se apropriaram do novo material e de sua característica fluida, que permitia a experimentação e a criação de formas inovadoras. Oscar Niemeyer aplicou em suas obras essa versatilidade do concreto armado alegando que na época “o concreto armado permitia coisas que não estavam sendo feitas” (NIEMEYER appud WOLF, 1987).

A rápida disseminação da técnica do concreto armado no Brasil também ajudou a desenvolver o que TELLES (1994) chamou de “escola brasileira do concreto armado”, já que, antes mesmo de ser incluída nas escolas de Engenharia e Arquitetura “a nova técnica foi rapidamente assimilada e dominada pelos engenheiros brasileiros” tornando-se respeitada e procurada por profissionais de todo o mundo, que consideravam a escola brasileira de vanguarda, desenvolvendo uma tecnologia de ponta para a época. Essa tecnologia foi acompanhada pelo desenvolvimento da também reconhecida internacionalmente “Arquitetura Moderna Brasileira”.

“Poucos anos depois do início da vulgarização do concreto armado no Brasil, deu-se o aparecimento da chamada “arquitetura moderna” (...) O concreto armado e a arquitetura moderna agiram um como catalizador do outro, e vice-versa: o concreto armado possibilitou a realização de construções com novas formas e audaciosas soluções arquitetônicas (...)” (TELLES, 1994, pp.484-5)

Essa escola brasileira de concreto armado se estabeleceu em uma base acadêmico-científica formada a partir da segunda metade do século XIX, que coincide com a fundação da Escola Politécnica do Rio de Janeiro, em 1862 e consolida a separação entre a engenharia militar e a engenharia civil no Brasil (SANTOS, 2008). Nesse período a formação dos engenheiros dava grande importância ao conhecimento científico, muitas vezes em detrimento ao desenvolvimento da mão-de-obra da construção civil.

Assim, no final do século XIX o Brasil reunia as condições para desenvolver sua indústria, com um mercado consumidor já estabelecido com o fim da escravidão, um comércio de importação e exportação de certo porte, um processo de urbanização acelerado e a formação de profissionais especializados, principalmente engenheiros. Nesse contexto, os engenheiros, principais agentes da modernização do país, envolveram-se não só técnica e cientificamente como também política e socialmente nesse processo. Esse envolvimento se dá principalmente pela grande influência do Clube de Engenharia durante o período de reconstrução (higienismo e embelezamento) do Rio de Janeiro no final do século XIX e início do século XX.

Em outro contexto, mas de relevante importância para formação da base científica da “Escola Brasileira do Concreto Armado” e da arquitetura moderna brasileira, em 1894 é fundada a Escola Politécnica de São Paulo. Diferente da Escola Politécnica do Rio de Janeiro que se espelhava na *École Polytechnique de Paris*, a de São Paulo foi influenciada pelas escolas alemãs - *Politechnikum de Karlsruhe*, de 1832 e *Eidgenössische Technische Hochschule de Zurich*, de 1834 (SANTOS, 2008).

A Escola Politécnica de São Paulo considerava a arquitetura uma espécie de especialização da engenharia, iniciando a ideia do Engenheiro-Arquiteto, que seria formada em 1933 com a criação do sistema CONFEA – CREAS (Conselho Federal de Engenharia e Arquitetura e os Conselhos Regionais de Engenharia e Arquitetura) e a regulamentação das profissões dos engenheiros e arquitetos. Esse conceito se diferenciava da figura do arquiteto formado pela Escola de Belas Artes do Rio de Janeiro e consistia em formar o profissional responsável em projetar e construir edificações (SANTOS, 2008).

Durante o início do século XX, as profissões de arquitetos e engenheiros disputavam espaço no mercado. Enquanto arquitetos eram vistos como desenhistas de plantas e eram afastados das construções, este espaço era ocupado pelos engenheiros, vistos com mais respeito técnico. A partir da terceira década (1920), os arquitetos se utilizam do conceito de perícia técnica para o desenho, adotando um discurso de racionalidade e funcionalidade aliado a um novo padrão estético que se enquadra nos preceitos da Arquitetura Moderna, e conseguiram adquirir assim um novo status para a profissão (SANTOS, 2008). Essa nova posição profissional dos arquitetos passa a explorar o vasto potencial criativo do concreto armado.

Nesse novo contexto, se inicia no Brasil um período de grande criação arquitetônica, os arquitetos, se utilizando do potencial criativo que o concreto armado proporcionava, se reaproximaram dos engenheiros que dividiam o interesse e entusiasmo pelos novos conceitos da arquitetura moderna e juntos produziram grandes obras, fazendo com que a “Escola Brasileira do Concreto Armado” fosse responsável por diversos recordes mundiais nas estruturas.

Dentre esses recordes mundiais, que foram essenciais para a divulgação da engenharia e arquitetura brasileira do concreto armado no mundo podemos citar o Edifício “A Noite” no Rio de Janeiro, projetado pelo engenheiro Emílio Baumgart, com 24 pavimentos e 102,8 metros de altura (Figura 37), inaugurado em 1928. Além da audaciosa estrutura de concreto armado, que possui lajes de grandes dimensões para a época (até 5,0 × 9,5 m) com espessura de apenas sete centímetros – inferior ao mínimo exigido pela norma atual (ABNT, 2004) – o sistema estrutural tem soluções inovadoras como as mísulas nas vigas de apoio e o fato dessa obra ter passado por uma verificação quanto à resistência ao vento (inédita no Brasil) ocasionando o acréscimo de seis pilares em cada pavimento, que passaram a funcionar como grandes pórticos, juntamente com as respectivas lajes (TELLES, 2017).

Figura 37 – Edifício “A Noite”, projeto de Otto Baumgart, 1929, Rio de Janeiro.



Fonte: Foto de Fulviusbsas - Creative Commons (em TELLES, 2017)

No ano seguinte à inauguração do Edifício “A Noite”, em São Paulo, o Edifício Martinelli (Figura 38) ultrapassou seu recorde. Com 105,6 metros de altura e 30 andares, O Edifício Martinelli, projetado pelo engenheiro Amleto Nipote teve sua construção iniciada em 1924 e passou por diversos percalços, como falta de material disponível, embargos e alterações de projeto que já com a obra iniciada teve o número de pavimentos aumentado de 18 para 30 andares, levando sua conclusão para 1929.

Para essa drástica mudança, os engenheiros responsáveis pela obra tiveram que recorrer a análises de estabilidade e materiais, tendo que utilizar tijolos furados em todas as paredes para diminuir a carga e solicitaram um laudo a um grupo de notáveis engenheiros do Rio de Janeiro formado por Emílio Baumgart, J. M, Sampaio Corrêa e Roberto Marinho de Azevedo, que atestaram a boa qualidade da construção (TELLES, 2017).

Figura 38 – Edifício Martinelli, 1930, São Paulo.

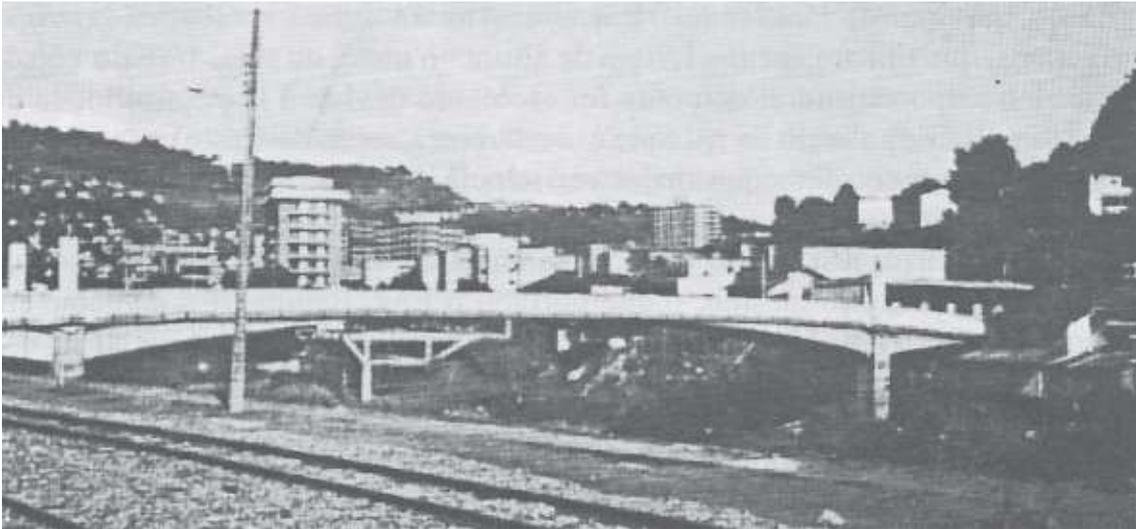


Fonte: Foto de Elisa Bono - iStockphoto.com (em TELLES, 2017)

Não foi só em edifícios em altura que a engenharia brasileira se destacava internacionalmente. Em 1930, Emílio Baumgart projetou a Ponte sobre o Rio do Peixe (Figura 39), que depois levou seu nome. A ponte que vencia um vão central de 68 metros, com mais dois vãos menores de acesso marcou o novo recorde mundial em pontes em vigas retas de alma cheia de concreto armado. Essas vigas apresentavam uma expressiva esbeltes, com apenas 1,70m de altura (1/40 do vão). Além do recorde mundial, essa obra, que está entre as mais expressivas do engenheiro, marcou a invenção do método construtivo dos “balanços sucessivos” (TELLES, 2017).

Infelizmente essa obra foi destruída em uma grande enchente em 1983, quando teve suas fundações afetadas pelo desabamento de um edifício nas proximidades.

Figura 39 – Ponte Emilio Baumgart sobre o Rio do Peixe, 1930.



Fonte: Do livro O Concreto no Brasil – Recordes, Realizações, História, de Augusto Carlos de Vasconcelos (VASCONCELOS, 1992)

Outra obra grandiosa da engenharia brasileira que demonstra a referência em concreto armado foi o Estádio do Maracanã (Figura 40). O projeto, escolhido por concurso foi de autoria da equipe de arquitetos formada por Waldir Ramos, Raphael Galvão, Miguel Feldman, Oscar Valdetaro, Orlando Azevedo, Pedro Paulo Bernardes Bastos e Antônio Dias Carneiro, enquanto a estrutura extremamente arrojada para a época, com dimensões extraordinárias, foi de responsabilidade também de uma equipe de engenheiros, em que se incluíam Antônio Alves de Noronha, Sérgio Marques de Souza, Paulo Rodrigues Fragoso e Alberto Costa.

O destaque dessa estrutura, que infelizmente não existe mais, foi a antiga marquise, em concreto armado com 36 metros de comprimento em balanço – um recorde mundial. Porém essa marquise cobria apenas 40% do público e foi substituída por uma marquise translúcida, de estrutura metálica, com 68 metros de comprimento, cobrindo 95% do público, exigência para a reforma de 2013, quando o estádio foi preparado para sediar a final da Copa do Mundo de 2014.

Figura 40 – Estádio do Maracanã em 1970, construído em 1950.



Fonte: Coleção 3 ERA, proc.1094-T-83 (Arquivo Central IPHAN, Rio)

A parceria dos arquitetos modernistas com grandes nomes da engenharia continuou a dar ao Brasil lugar de destaque internacional e outros recordes mundiais em concreto armado, como o famoso vão livre do MASP em São Paulo, da arquiteta Lina Bo Bardi, projetado em 1958, com 74 metros, projetado pelo engenheiro José Carlos de Figueiredo Ferraz (Figura 41), projeto que infelizmente se perdeu em um incêndio no escritório do engenheiro.

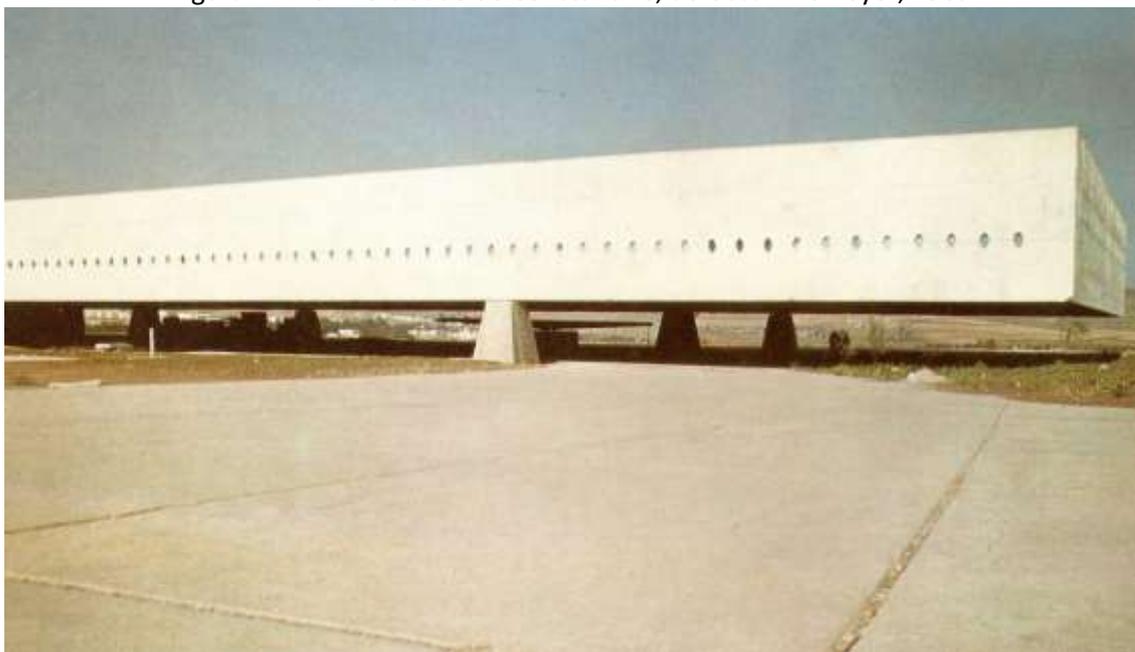
Figura 41 – MASP – Museu de Arte de São Paulo, de Lina Bo Bardi e José Carlos de Figueiredo Ferraz, 1953.



Fonte: Aarquiteta (em www.arcoweb.com.br/noticias/noticias/exposicao-na-casa-de-vidro-comemora-os-50-anos-do-masp-1)

E mesmo em obras internacionais os profissionais brasileiros, especialistas em concreto armado, se destacavam. Como na grande viga-parede do Edifício de Classes da Universidade de Constantine com seus 50 metros de vão e 25 metros de balanço e apenas 30 centímetros de espessura, fruto da parceria de Oscar Niemeyer com o engenheiro Bruno Contarini (Figura 42).

Figura 42 – Universidade de Constantine, de Oscar Niemeyer, 1969.



Fonte: Autor desconhecido (em <http://giljacobus.blogspot.com/2009/12/projeto-da-universidade-de-constantine.html>)

Outro parceiro mais recente de Niemeyer, José Carlos Sussekind desafiou os limites do concreto armado nos últimos 30 anos da carreira do arquiteto (INOJOSA, 2010). No projeto do Palácio Tiradentes, parte do conjunto da Cidade Administrativa Tancredo Neves em Belo Horizonte, 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 43 – Palácio Tiradentes, em Belo Horizonte, de Oscar Niemeyer e José Carlos Sussekind.



Fonte: Revista Techne, nº 154. Janeiro de 2010.

Capítulo 3.

A ESTRUTURA NA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

No Brasil, a Arquitetura Moderna deu seus primeiros passos no início do século XX. A aproximação de arquitetos com pensamentos modernistas como Lúcio Costa e Gregori Warchavchik durante a década de 1920 influenciou uma produção arquitetônica que se utilizava das influências do movimento moderno internacional e do uso de novos materiais, como o concreto armado (FRAMPTON, 1998).

Tal período coincide com a época da “construção” da nação, um período em que os arquitetos foram responsáveis pela construção de diversos edifícios públicos e de interesse social como escolas, hospitais, maternidades, albergues, estações, sedes ministeriais, repartições públicas, edifícios de instituições civis, etc. A Arquitetura Moderna no Brasil, portanto, teve um papel importante na transformação social e na formação do gosto estético da população (CASTELLOTTI, 2006).

Os arquitetos modernistas acreditavam no caráter regenerador da nova forma, na importância da arquitetura como ferramenta de transformação social, “na capacidade dos edifícios de reeducarem os hábitos e a percepção da população, instituindo novos modos de ver e viver” (CONDURO, 2005). Contudo, ainda existia uma relação forte de compromisso com a elite burguesa, o que se configurava como uma contradição da arquitetura moderna.

É de Warchavchik, arquiteto russo radicado no Brasil a primeira casa modernista em São Paulo, a Casa Modernista da Rua Santa Cruz, de 1927 (Figura 44). O projeto, totalmente inovador para a época, é composto por um conjunto de elementos prismáticos brancos e é totalmente livre de ornamentos. Warchavchik enfrentou diversos desafios para a construção do projeto, tanto na disponibilidade de materiais como cimento e vidro, passando pela qualificação da mão-de-obra e até para a aprovação junto à prefeitura, chegando a ter que propor elementos decorativos para a casa, que posteriormente não foram executados (FRACALLOSSI, 2013).

Esses desafios refletiam as dificuldades de explorar um estilo novo, diferente do que apresentava a arquitetura brasileira na época. Warchavchik trouxe ao Brasil ideias vanguardistas dos movimentos da arquitetura internacional, que logo seduziu nomes do movimento modernista da Semana de Arte Moderna de 1922, como Mário de Andrade, impulsionando o movimento moderno na arquitetura brasileira. A casa da rua Santa Cruz é a obra "mais emblemática da virada arquitetônica brasileira" (LIRA, 2011).

Um dos primeiros registros de movimentos arquitetônicos relacionados ao estilo moderno é o movimento encabeçado pelo arquiteto Luiz Nunes em Recife entre 1934 e 1937 – abordado

nessa tese a seguir. Nessa mesma época é construído o Edifício Gustavo Capanema (Figura 45), 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, além dos arquitetos Carlos Leão, Affonso Eduardo Reidy, Ernani Vasconcellos e Jorge Machado Moreira, e se tornou o marco de partida da arquitetura moderna brasileira (CARDOZO, 1956).

Figura 44 – Casa Modernista da Rua Santa Cruz, de Gregori Warchavchik, 1929 em São Paulo.



Fonte: FRACALOSSO, 2013

A obra, considerada o primeiro grande monumento do modernismo na América do Sul, teve a importante participação de Le Corbusier, como consultor de projeto e recebeu importantes 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, 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).

A partir desses movimentos, surgem no Brasil arquitetos que conseguem explorar e dominar tecnologias mais bem adaptadas a realidade local, dando ênfase à expressão tectônica, “a utilização da estrutura como elemento gerador do espaço e definidor da expressão plástica” (SANTA CECÍLIA, 2006).

Esse desenvolvimento pode ser destacado pela análise de obras ícones do período modernista. Estas análises, com enfoque no sistema estrutural de grandes obras arquitetônicas contribuem para o entendimento da importância do conhecimento técnico para a concepção da arquitetura moderna brasileira.

Figura 45 – Edifício do Ministério da Educação e Saúde, atual Palácio Gustavo Capanema, Rio de Janeiro.



Fonte: CPDOC FGV (CASTRO, 2009).

Apesar do protagonismo da engenharia e arquitetura brasileira para o concreto armado no mundo, um grande desafio dos arquitetos e engenheiros 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 (INOJOSA, 2010).

Com o desenvolvimento da tecnologia brasileira do concreto armado, os arquitetos modernistas brasileiros passaram a expressar uma ideia nacional em suas obras e cada um pode imprimir na arquitetura suas características pessoais, mesmo que respeitando conceitos modernistas vigentes. Oscar Niemeyer mostrava o desenvolvimento da engenharia nacional através de formas inovadoras, rompendo o pragmatismo retilíneo do concreto armado na arquitetura internacional; Vilanova Artigas explorava a monumentalidade de pilares esculturais que sustentavam empenas estruturais de concreto armado e lajes nervuradas que permitiam grandes vãos; Paulo Mendes da Rocha estabelecia um discurso sobre o lugar pela exibição do conhecimento técnico, em formas puras que exploravam a essência dos materiais; João Filgueira Lima fazia uso da exploração da lógica da pré-fabricação e da montagem (MACIEL, 2006), entre outros.

Essa relação da técnica de construir com a arquitetura trouxe para as obras modernistas brasileiras um protagonismo compositivo evidenciado nos usos dos elementos estruturais puros, como nas sequências de pórticos usadas por Affonso Eduardo Reidy ou nas cascas e planos estruturais de Oscar Niemeyer (ANDRADE, 2016).

A Figura 46, apresenta um diagrama que mostra, em ordem cronológica algumas das obras mais significantes da Arquitetura Moderna no mundo e no Brasil citadas nessa revisão histórica. São obras em que se pode notar o protagonismo da forma estrutural no resultado estético arquitetônico. A partir desse gráfico podemos identificar, no Brasil, momentos específicos em que o sistema estrutural aparece de forma marcante na arquitetura. Não se trata aqui de movimentos específicos ou de fases distintas do Movimento Moderno, mas mais que isso, são momentos importantes para o desenvolvimento estético e técnico que permitiram que a arquitetura moderna brasileira se estabelecesse como uma das mais importantes do mundo.

Figura 46 – Linha do Tempo – Obras da Arquitetura Moderna.



Fonte: Produzido pelo autor.

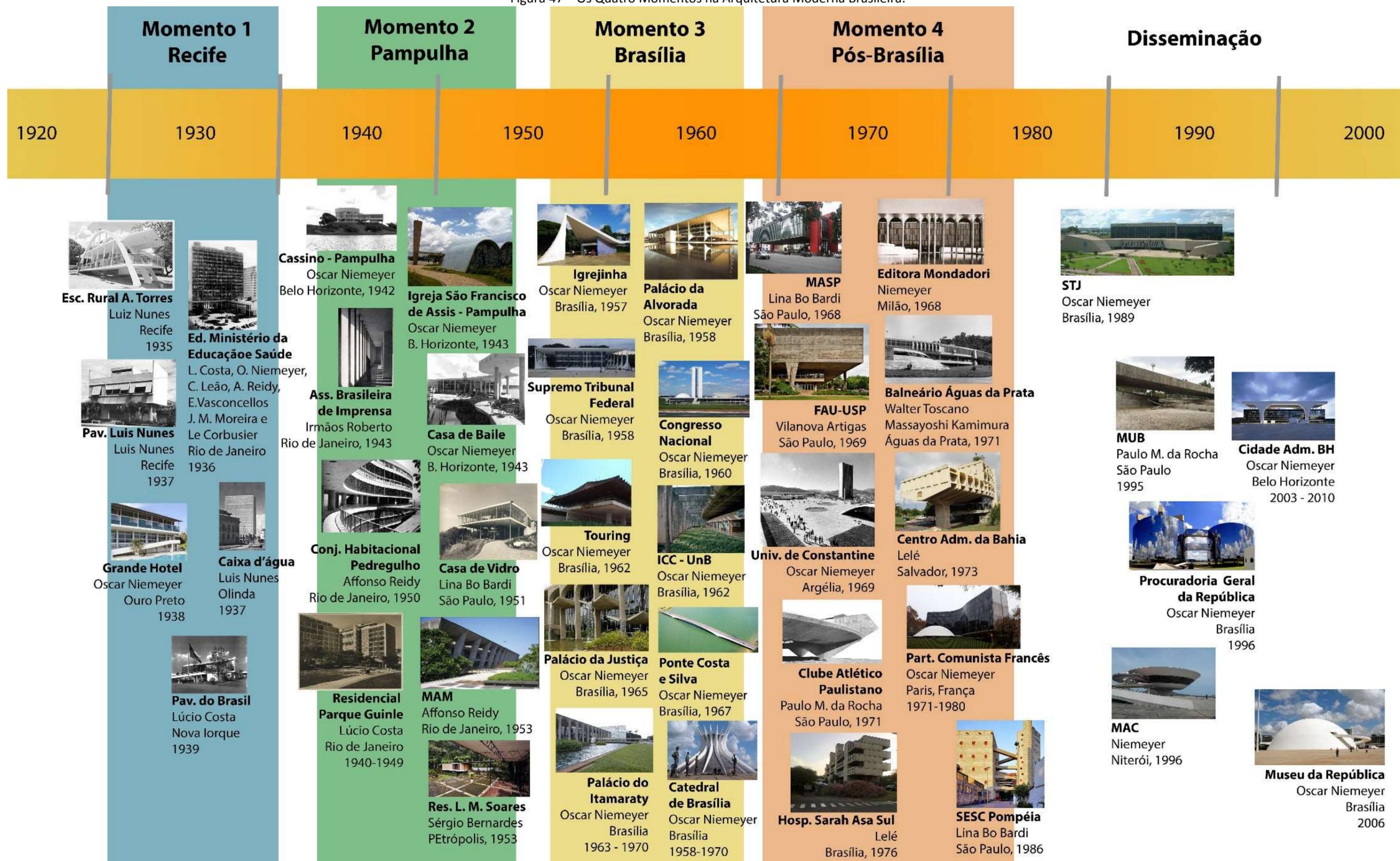
3.1 Quatro Momentos na Arquitetura Moderna Brasileira

A partir da “linha do tempo” da Figura 46 é possível traçar o recorte temporal proposto por esse trabalho. Nesse recorte foram identificados, durante o período histórico mais produtivo do Movimento Moderno na Arquitetura Brasileira – entre as décadas de 1930 e 1970 – quatro momentos nos quais a integração da arquitetura com a estrutura marcaram de maneira expressiva um impulso no desenvolvimento e na disseminação da arquitetura moderna brasileira. Impulsos como esses são descritos por Joaquim Cardozo (1956) – se referindo especificamente aos dois primeiros – como sendo movimentos capazes de caracterizar uma formação histórica, comparados aos “impulsos animadores” que na história da arte acontecem no momento do surgimento de um novo estilo.

O primeiro desses momentos acontece na década de 30 e é representado pelas experiências em concreto armado muito bem-sucedidas do arquiteto Luiz Nunes nas diretorias D.A.C. e D.A.U. em Recife, Pernambuco. O segundo momento é representado pelos trabalhos de Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo em Belo Horizonte, no conjunto da Pampulha e se estende pela arquitetura da escola carioca de Affonso Reidy, durante as décadas de 40 e 50. O terceiro momento se concentra no marco para a arquitetura moderna brasileira que representou a construção de Brasília, também com projetos de Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo entre as décadas de 50 e 60. Já o quarto momento enquadra um período pós-Brasília em que o movimento moderno se difunde em várias obras de arquitetos brasileiros espalhadas pelo Brasil e o mundo gerando várias escolas modernistas com características locais e individuais e extrapola o limite do recorte temporal (da década de 1970) mostrando um período de continuidade e disseminação do movimento, quando os exemplos representativos são pontuais e isolados, mas que influenciam a arquitetura até os dias atuais.

O gráfico da Figura 47 organiza os quatro momentos da arquitetura moderna brasileira em uma ordem cronológica, apresentando exemplos das obras mais representativas em cada um deles. Na sequência, os momentos são descritos e destacadas suas principais obras e os principais arquitetos e engenheiros, responsáveis pelos impulsos tecnológicos que os caracterizaram.

Figura 47 – Os Quatro Momentos na Arquitetura Moderna Brasileira.



Fonte: Produzido pelo autor.

3.1.1 Recife

O primeiro momento de destaque da arquitetura moderna brasileira é marcado pela experiências de Luiz 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, 1956), em 1934 leva grande influência modernista para Recife, onde com apoio político consegue fundar a D.A.C., Diretoria de Arquitetura e Construção, responsável por projetar, construir e fiscalizar todas as obras públicas do estado de Pernambuco. Faziam parte dessa equipe o engenheiro Joaquim Cardozo e o paisagista Roberto Burle Marx, além de outros arquitetos, engenheiros e estudantes (SANTANA, 1998).

No início do funcionamento da D.A.C. foi preciso um árduo trabalho de conscientização tanto para que os audaciosos projetos fossem aceitos em um ambiente onde predominava o desinteresse a incompreensão, quanto para que pudessem preparar projetistas, arquitetos, engenheiros e mestres de obra para trabalharem com os novos conceitos e novas tecnologias trazidas por Luiz Nunes. Essa introdução de uma visão moderna nos profissionais que já exerciam a arquitetura na época e a formação de novos profissionais com a mesma visão, foi responsável por uma geração de arquitetos “discípulos” como os arquitetos Mario Russo, Acácio Gil Borsoi, Delfim Amorim e Heitor Maia Neto que deram continuidade ao trabalho iniciado nos anos 30, e vieram a se tornar depois professores da antiga Escola de Belas Artes de Pernambuco, atual Faculdade de Arquitetura (COSTA, 2008).

Em 1935 a repressão após a revolta comunista de 1935 e apenas quatro meses depois de sua criação, a D.A.C., assim como seus principais colaboradores, foi vinculada ao movimento revolucionário sob acusações infundadas e teve trabalhos paralisados, o que suscitou no afastamento de Luiz Nunes. A interrupção durou até o final de 1936, quando Luiz Nunes foi reconduzido ao cargo de diretor por pressão dos próprios desenhistas, arquitetos e engenheiros, que por estarem alinhados com os conceitos modernistas implementados por Nunes não aceitaram as alterações propostas por seu substituo – arquiteto Aurélio Lopes (CARDOZO, 1956). Nessa nova fase, a diretoria teve sua responsabilidade ampliada, tornando-se Diretoria de Arquitetura e Urbanismo (D.A.U.).

Antes disso, em outubro de 1935, a D.A.C. 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. Essa exposição é considerada a primeira exposição de Arquitetura Moderna no Brasil (DANTAS, 2004).

Entre os projetos expostos em Porto Alegre se destacaram: a Escola Rural Alberto Torres, construída em 1935 e 36 (Figura 48), a Caixa D'água de Olinda de 1937 (Figura 55) e o Pavilhão Luiz Nunes de 1937 (antigo Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE) – (Figura 49 e Figura 50).

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 ideia de ordem e de unidade” que caracterizam o movimento moderno na arquitetura, cuja “força e capacidade de execução” representam uma “linguagem brasileira” da arquitetura moderna – que surpreendeu críticos e estudiosos estrangeiros durante as décadas seguintes – já adequadas à capacidade de execução, disponibilidade de materiais e à cultura nacional (CARDOZO, 1956).

O pouco tempo que durou a experiência da D.A.C. – primeira fase dos trabalhos de Luiz Nunes em Recife – foi suficiente para que fossem produzidos projetos com grande aperfeiçoamento técnico, inovadores para época e com princípios arquitetônicos claros, embasados nas influências modernistas vindas da Europa, principalmente na figura de Le Corbusier.

Le Corbusier exerceu forte influência na formação da arquitetura moderna brasileira, trazendo, desde sua primeira visita, em 1929, acontecimento dado como “marco de referência na formação da consciência da modernidade arquitetural” (MARQUES & NASLAVSKY, 2011). Em Recife não foi diferente, as ideias do arquiteto repercutiram pela imprensa local, encontrando eco na já latente cultura modernista de Pernambuco, principalmente no campo das artes.

Figura 48 – Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arq. Luiz Nunes, construído em 1935-36.



Fonte: Benício Whatley Dias - Acervo Fundação Joaquim Nabuco – Ministério da Educação.

Figura 49 – Laboratório de Anatomia Patológica (Pavilhão de Óbitos) em Recife, projeto do Arq. Luiz Nunes, 1936 foto de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York – 1943.



Fonte: Portal Vitruvius - Arquitextos 072, maio de 2006.

Figura 50 – Croqui do Pavilhão Luiz Nunes (Pavilhão de Verificação de Óbitos, atual sede do IAB-PE).



Fonte: Croquis de Arquitetura.

Segundo Marques & Naslavsky (2011), outro fator que facilitou a difusão das ideias modernistas europeias trazidas por Le Corbusier ao Brasil foi a presença, no Rio de Janeiro em 1929, de Luiz Nunes, que, ainda estudante da Escola de Belas Artes, assistiu à primeira visita do arquiteto franco-suíço ao Brasil.

Além de Luiz Nunes, outro personagem fundamental para esse primeiro momento da arquitetura moderna brasileira foi Joaquim Cardozo. Conhecido como o “Engenheiro da Poesia”, Cardozo é considerado um pioneiro do Movimento Moderno e mais tarde se destacaria como calculista das principais obras de Oscar Niemeyer – que o considerava o homem mais culto que já conheceu (NIEMEYER, 2000). 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.

Os dois profissionais encontraram em Recife um ambiente favorável para que um grupo de jovens engenheiros e arquitetos alinhados com os novos preceitos do modernismo, envolvidos em uma “efervescência em torno do conhecimento científico” (CARDOZO apud MARQUES & NASLAVSKY, 2011) e com apoio político do então governador Carlos de Lima Cavalcanti, pudessem implementar uma iniciativa, pública e organizada, em torno da produção de projetos e obras que representaram o primeiro movimento da arquitetura moderna brasileira.

Ainda durante a primeira fase dessa iniciativa, na D.A.C., Luiz Nunes foi orientado por Joaquim Cardozo a respeito das técnicas construtivas mais atuais da época. Utilizando uma vasta biblioteca de livros e revistas técnicas que ambos montaram na diretoria, Cardozo e Nunes aplicaram inovações tecnológicas em várias das obras projetadas por eles. Dentre as inovações, destacam-se as escadas helicoidais apoiadas apenas nas extremidades, usadas pela primeira vez no Brasil, no Hospital da Força Pública ou Brigada Militar do Derby e o projeto da Escola Rural Alberto Torres, que usa, também pela primeira vez no Brasil, rampas de acesso ao edifício em substituição às escadas. Esta rampa, objeto de estudo deste trabalho é o grande destaque, tanto formal quanto de inovação estrutural da obra.

Apesar das limitações encontradas na época no Brasil, esse momento na arquitetura moderna brasileira em Recife expõe, de forma clara, as influências modernistas europeias. Já em seu primeiro projeto em Recife, a Usina Higienizadora de Leite, de 1934, Nunes aplica conceitos já estabelecidos na Bauhaus por Walter Gropius, alguns anos antes.

Com uma sensibilidade refinada para adaptar os conceitos modernistas à realidade local, Luiz Nunes consegue utilizar materiais e técnicas disponíveis e ainda adequa a arquitetura ao clima da região. A Figura 51 mostra as semelhanças entre a Usina Higienizadora de Leite de Luiz Nunes e a Fabrica Fagus, de Walter Gropius, onde podemos notar, em comum, o uso marcante das linhas horizontais e a clara separação das diferentes atividades do programa em diferentes volumes prismáticos justapostos e contrastantes entre si pelo tratamento das fachadas, além do uso de elementos tipicamente modernistas, como as marquises de concreto armado (MARQUES & NASLAVSKY, 2011).

Figura 51 – Comparação entre os edifícios da Usina Higienizadora de Leite em Recife (de Luiz Nunes, 1934) e a Fábrica Fagus em Leine na Alemanha (de Walter Gropius, 1913).



Fonte: Montagem do autor. Imagens originais: Museu da Cidade do Recife e Carsten Janssen.

Outra obra de Luiz Nunes que marca a influência dos traços modernistas no momento de Recife, do mesmo ano de 1934 é a Escola de Débeis Mentais ou Escola de Anormais, que, em linhas gerais, segundo Cardozo (1956), “lembra a L'école Maternelle de André Lurçat. A Figura 52 mostra a comparação da escola de Nunes com a Karl-Marx Middle School, in Villejuif, de Lurçat, construída entre 1931-1933, uma das diversas escolas projetadas pelo arquiteto para o município francês. Ambos os projetos são divididos em blocos específicos para cada atividade escolar, interligados por marquises, podendo assim ser ampliados sem perder as características iniciais.

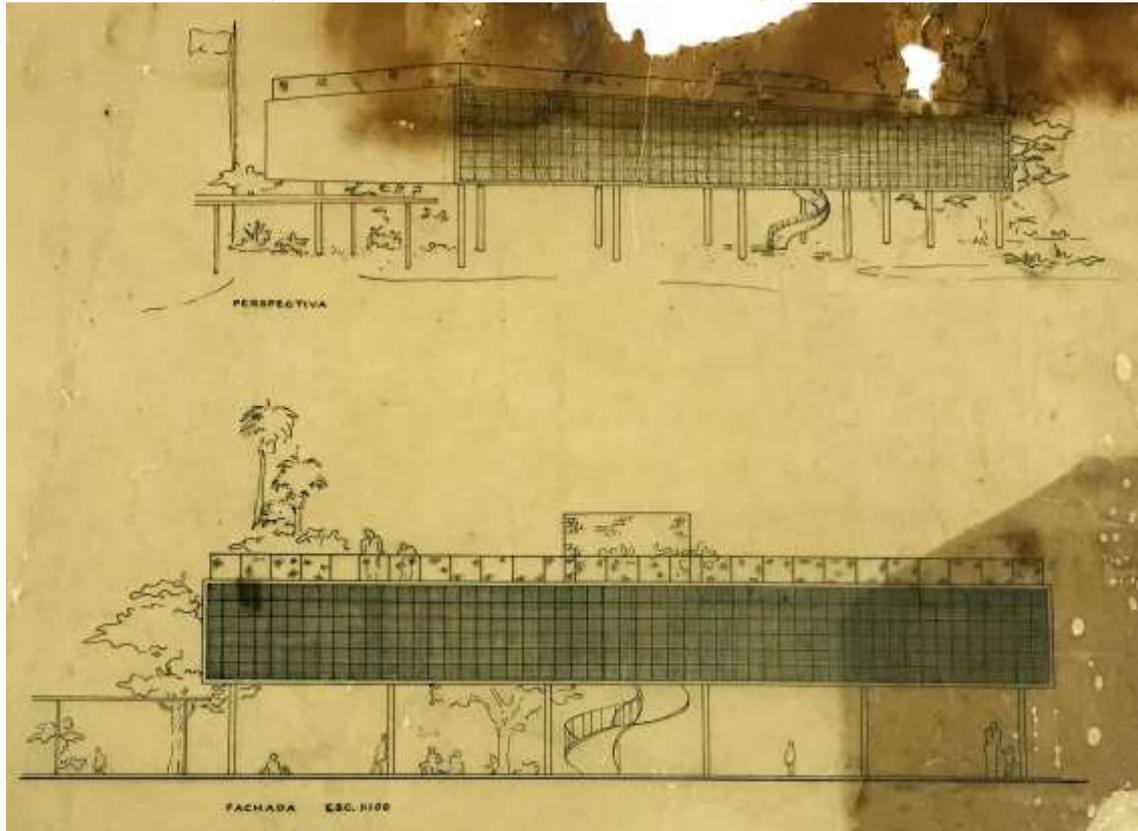
Figura 52 – Comparação entre o projeto para a Escola de Débeis Mentais em Recife de Luiz Nunes, 1934 (esquerda) e a Karl-Marx Middle School, em Villejuif de André Lurçat, 1931 (direita).



Fonte: Montagem do autor. Imagens originais: Arquivo Público de Pernambuco e Misfits' Architecture (<https://misfitsarchitecture.com/2016/07/07/architecture-misfit-23-andre-lurcat/>).

Um elemento modernista marcante utilizado na L'école Maternelle de André Lurçat é a elevação dos edifícios e a criação de pilotis, uma solução adequada para edifícios escolares, já que o espaço exterior coberto ao nível do solo cria espaços úteis aos seus programas. Esse recurso foi explorado em outros projetos da D.A.U. nos anos seguintes, já no segundo período de atividades da Diretoria, como o projeto para a Escola Experimental, de 1937 (Figura 53), que apresenta não só essa característica modernista como também faz uso das janelas em fita e do telhado jardim, além da escada helicoidal, semelhante à utilizada no Hospital da Força Pública.

Figura 53 – Perspectiva e Vista Frontal do projeto original do pavilhão de salas para uma Escola Experimental em Recife (de Luiz Nunes e equipe, 1937).



Fonte: Arquivo Público de Pernambuco Jordão Emerenciano, foto de Paulo M. V. Ribeiro.

Na Escora Rural Alberto Torres, de 1935, os arcos que sustentam as rampas de acesso ao prédio também sugerem a influência direta das obras de Le Corbusier, especificamente o projeto do arquiteto franco-suíço para o Palácio dos Sovietes de 1931, que não foi selecionado entre os vencedores, mas gerou grande admiração dos arquitetos alinhados com os preceitos do modernismo, (SILVA, 2012). O projeto das rampas da escola tem a mesma proporção entre arco e tirantes usados por Le Corbusier (Figura 54).

Figura 54 – Comparação entre os arcos do Palácio dos Sovietes, de Le Corbusier (esquerda) e da Escola Rural Alberto Torres, e Luiz Nunes (direita).



Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.

A segunda passagem de Luiz Nunes em Recife, a partir de 1936, marca uma aproximação do arquiteto com os conceitos corbusianos de Arquitetura Moderna, fruto do período que esteve

no Rio de Janeiro e da reaproximação da escola carioca de Lucio Costa (MARQUES & NASLAVSKY, 2011). Nesse mesmo período estava sendo desenvolvido, com a participação do próprio Le Corbusier, o projeto do edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro.

Tendo sido projetada pela equipe da D.A.U. ao mesmo tempo que o Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro, a Caixa D'água de Olinda (Figura 55) traz em sua composição elementos que se tornariam característicos para a arquitetura moderna brasileira e estão presentes desde os primeiros esboços de estudo do projeto do Ministério. Entre esses elementos, podemos destacar sua implantação que respeita de o importante ambiente histórico e geográfico no qual está localizado, criando uma esplanada-belvedere, contrastando a horizontalidade deste com a verticalidade do volume do prédio, além do uso de pilotis no pavimento térreo, separando visualmente os dois volumes e trazendo leveza ao conjunto.

Figura 55 – 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.

Chama ainda a atenção nessa obra o arrojo estrutural com a utilização do concreto armado em uma estrutura em altura, comparada à época aos grandes arranha-céus e a presença marcante das fachadas em elemento vazado – cobogó, exaltando novamente a adequação aos sistemas construtivos, ao clima e à cultura locais. Sobre esse projeto, Joaquim Cardozo descreve com entusiasmo parte de sua experiência com os sistemas construtivos locais:

“Os volumes e superfícies vazadas que antigamente eram resolvidos com as venezianas, foram criados agora com o emprego justo e adequado de um material pernambucano por excelência e que conserva a mesma simplicidade de linhas de certas grades e esquadrias: o combogó”(…) “Estas superfícies de combogó

atuando nas fachadas muito ensolaradas como verdadeiro “brisesoleil”, produzem desenhos caprichosos de sombra e luz, de bom efeito decorativo” (sic)(53). (Foi com base nesta riqueza de concepção e levando em conta a sua excepcional localização que participamos de um grupo que elaborou um projeto para utilização do espaço Cobogo, na caixa d’água de Olinda.” (CARDOZO apud MARQUES & NASLAVSKY, 2011).

Mais um exemplo da grande produção da D.A.U. na segunda metade da década de 30 e considerado uma das melhores obras de Luiz Nunes, o antigo Pavilhão de Verificação de Óbitos de 1937. O edifício que leva hoje seu nome e abriga a sede do IAB-PE está localizado à margem do Rio Capibaribe e, assim como a Caixa D’água de Olinda, é um exemplo do apuro pelo lugar e respeito ao entorno do arquiteto ao implantar suas obras. O Pavilhão é vizinho de dois edifícios públicos importantes, a Faculdade de Medicina, de estilo eclético e a então Escola Técnica, em estilo art-déco e com ambos compõe um conjunto de evidente contraste, mas que se equilibram entre si.

Dentro dessa composição, o Pavilhão Luiz Nunes aparece em uma escala menor, comparado às casas modernistas da época, em especial à Villa Savoye, de Le Corbusier, com a qual divide os cinco pontos da arquitetura moderna descritos pelo arquiteto franco-suíço – a fachada livre, as janelas em fita, os pilotis, o terraço jardim e a planta livre (Figura 56).

Figura 56 – Comparação entre Vila Savoye, de Le Corbusier em 1929 (esquerda) e o Pavilhão Luiz Nunes de 1936 (direita).



Fonte: Montagem do autor. Imagens originais: Foto do autor e Carsten Janssen – Creative Commons.

Os trabalhos da Diretoria de Arquitetura e Urbanismo de Pernambuco se encerraram ainda em 1937, com o falecimento precoce de Luiz Nunes, antes de completar 30 anos, vítima de tuberculose. Pouco tempo após sua morte, uma equipe de desenhistas e profissionais remanescentes da D.A.U., lideradas pelo arquiteto Fernando Saturnino de Britto foi responsável, em 1939, pelo projeto do Palácio da Fazenda (Figura 57), que teve a estrutura em concreto armado calculada por Joaquim Cardozo. Esse projeto marca, a afirmação da linguagem arquitetônica de Luiz Nunes e sua equipe como linguagem oficial, mostrando que, apesar das experiências da D.A.C e D.A.U terem sido breves, deixaram um legado, tanto para o desenvolvimento das obras em Pernambuco, como para a arquitetura moderna brasileira.

Parte desse legado pode ser extraído das relações entre os profissionais – arquitetos e engenheiros – das equipes que passaram pelas D.A.C. e D.A.U. durante esses quase quatro anos. O engenheiro Antônio Baltar, importante membro da D.A.C. e D.A.U. descreveu assim essa relação:

“Arquiteto e engenheiro estrutural se entenderam pela primeira vez nessa parte do país e naqueles tempos, para harmonizar as suas tarefas complementares, ganhando aqueles uma maior consciência mecânica de seus projetos – estes últimos sendo obrigados a alargar e aprofundar os seus meios de investigação e previsão estrutural. [A que ninguém saiu devendo, concluímos]”. (BALTAR, 1963 apud NASCIMENTO, 2007)

Figura 57 – Palácio da Fazenda de Pernambuco, em Recife, de Fernando Saturnino de Britto e Joaquim Cardozo.



Fonte: Visit Recife (<https://visit.recife.br/o-que-fazer/atracoes/monumentos-historicos/secretaria-da-fazenda>).

Para Baltar, as estruturas projetadas pela D.A.C. e D.A.U. durante esse momento em Recife representaram uma “verdadeira revolução operada nos métodos de cálculo estrutural então usuais” (NASCIMENTO, 2007). Explorando as dimensões das peças projetadas e assim aproveitando o máximo das propriedades de resistência dos materiais e produzindo formas que se harmonizavam à arquitetura e inovando o cálculo estrutural, como relata Baltar:

(...) se fizeram avançar as taxas de trabalho dos materiais, acompanhando o seu uso de precauções e ensaios tecnológicos nunca antes realizados, resultando em estruturas mais esbeltas, independentes e simplificadas – mais funcionais e mais belas, enfim. (BALTAR, 1963 apud NASCIMENTO, 2007).

3.1.2 Pampulha

O segundo momento destacado da história da arquitetura moderna brasileira é descrito por Joaquim Cardozo como o “Episódio da Pampulha” e é representado pelo Conjunto da Pampulha,

projetado por Oscar Niemeyer e construído entre 1940 e 1943. Esse conjunto de edificações públicas é tido como a primeira obra de maturidade artística de Niemeyer, um dos maiores representantes da arquitetura moderna brasileira. Apesar de suceder o momento de Recife, é nesse período que as obras de Niemeyer, por serem amplamente divulgadas nacional e internacionalmente, inauguram o chamado “Estilo Brasileiro”, uma arquitetura reconhecida, em todo mundo como a Arquitetura Moderna do Brasil (FARIA, 2007).

Figura 58 – Igreja São Francisco de Assis na Pampulha, Belo Horizonte MG.



Fonte: Foto do autor.

Esse momento começa com a mudança de Cardozo para o Rio de Janeiro. Depois de criticar o “Estado Novo” em um discurso como paraninfo da turma de formandos de 1939 do curso de Engenharia da Escola de Belas Artes, Cardozo é demitido, mudando-se para a então capital do país – Rio de Janeiro – 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 (Figura 60), a Casa de Baile (Figura 61), o late Clube e a Igreja de São Francisco (Figura 58 e Figura 59); havia também o projeto de um hotel, que não foi

construído. Esses projetos ocorreram 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).

Figura 59 – Fundos da Igreja São Francisco de Assis - Paineis de Portinari 1945-55 (Conjunto da Pampulha), Belo Horizonte MG.



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

Uma das características desse projeto que torna esse mais um momento importante na história da arquitetura moderna brasileira 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 apud 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 (INOJOSA, 2010).

Apesar da relação próxima entre engenheiro e arquiteto e das importantes contribuições de Joaquim Cardozo para as obras da Pampulha, do ponto de vista estrutural, esse momento foi pouco explorado em publicações do ramo, nem mesmo pelo próprio Joaquim Cardozo, que escreveu sobre a Pampulha em dois textos citados nesse trabalho. Mesmo assim, é importante destacar a relação de parceria criativa entre Cardozo e Niemeyer, onde engenheiro e arquiteto “conhecendo-se mutuamente e explorando, ambos, lado a lado, as possibilidades plásticas de um novo material” (NASCIMENTO, 2007).

Sobre essas experiências, destacam-se soluções para duas questões que eram discutidas por arquitetos modernistas do mundo inteiro, descritas por Cardozo no artigo “Arquitetura Brasileira – características mais recentes” (CARDOZO, 1955) – a “Modificação dos Pilotis” e a “Transformação da Abóbada”. Sobre a primeira Cardozo descreve:

“Os próprios pilotis dos primeiros tempos da arquitetura moderna transformaram-se, assinalando agora com maior agudeza esse ‘canto dos pontos de apoio’ de que nos fala Perret; os pilotis modificaram-se em formas plásticas que à primeira vista dão a impressão de esculturas e que são, entretanto, funcionais, pois resultam das transições entre os espaços criados, entre os prismas estruturais que coordenam a estabilidade da construção” (CARDOZO, 1955).

As contribuições propostas por Niemeyer e Cardozo nesses temas apontam para um trabalho não apenas intuitivo, mas de profunda pesquisa em busca das melhores soluções disponíveis, levando em consideração não só seus próprios conhecimentos e experiências profissionais, mas também o momento histórico, as tecnologias e métodos construtivos vigentes, os materiais disponíveis e os estudos científicos da época. Assim, explorando essas possibilidades e buscando uma marca nacional, uma adequação local e imprimindo a elas o caráter individual de cada um, chegavam a resultados realmente inovadores (NASCIMENTO, 2007).

Assim como o momento de Recife, este também foi marcado e documentado com uma importante exposição, desta vez com a “Brazil Builds” (Figura 62 e Figura 63), 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.

Obra diferenciada de outras da época, 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).

Para atingir essa ruptura, Niemeyer se valeu também da tecnologia do concreto armado, utilizando-a de forma criativa e inovadora. 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 a marquise do 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).

Figura 60 – Antigo cassino, 1950, atual Museu de Arte da Pampulha (Conjunto da Pampulha).



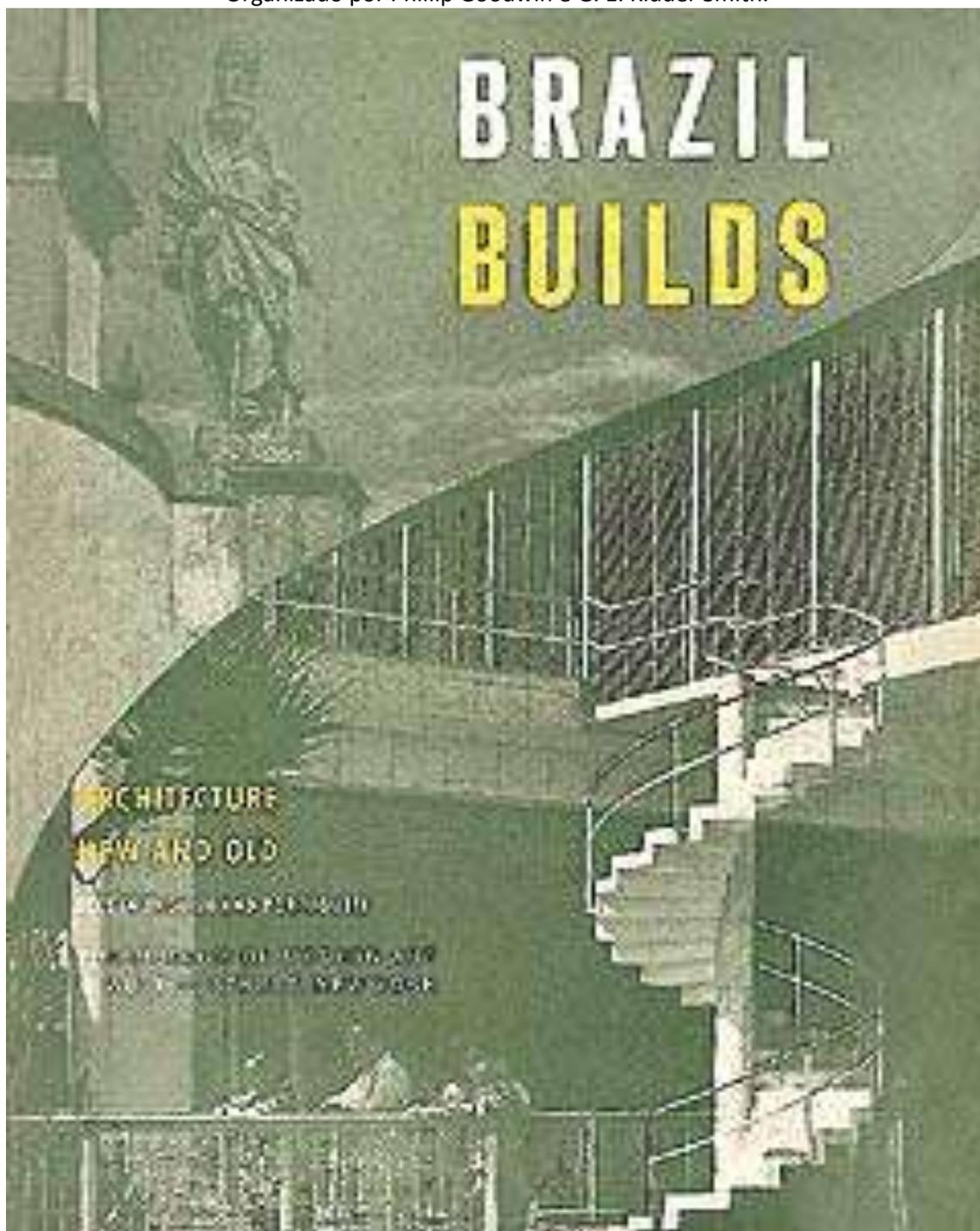
Fonte: Foto de Cândia de Oliveira (Museu Histórico Abílio Barreto). CPDOC FGV – Centro de Pesquisa e Documentação da História Contemporânea do Brasil da Fundação Getúlio Vargas.

Figura 61 – 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.

Figura 62 – Capa do Catálogo da Exposição “Brazil Builds”, 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 63 – 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.



Fonte: Fotos de G. E. Kidder Smith para a exposição “Brazil Builds” em Nova York - 1943. Portal Vitruvius - Arqtextos 072, maio de 2006.

Desde a década de 30, principalmente a partir de 1935, com o primeiro momento descrito anteriormente, a arquitetura moderna brasileira já ganhava fama internacional e começava a aparecer na Europa por meio de artigos de revistas especializadas como a *Architecture Aujour’hui*, da França e a inglesa *The Architectural Review*, além do catálogo “Brazil Builds”, elaborado especialmente para a exposição no Museu de Arte Moderna de Nova York. (CASTELLOTTI, 2006). Com essa fama surgem também as críticas, a primeira e a mais polêmica do crítico Max Bill, arquiteto e escultor, diretor da Escola de Ulm (Alemanha) e aluno da Bauhaus que, em visita ao Brasil em 1953, concedeu uma entrevista à 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 apud 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 a escultura. (...) afirmo, mais uma vez, que, em arquitetura, tudo deve ter sua lógica, sua função imediata”. (BILL, 1953 apud 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 descendermos 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 apud CASTELLOTTI, 2006, pág. 62)

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).

Apesar das críticas, Max Bill destacou Affonso Eduardo Reidy como o mais importante arquiteto dessa geração brasileira. Além disso, em outro artigo, dessa vez publicado em 1954 na *The Architectural Review*, elogia novamente a arquitetura de Reidy, com destaque ao projeto do Conjunto Residencial de Pedregulho (Figura 64), no Rio de Janeiro, citado na resposta de Lúcio Costa.

Esse número da revista trazia textos de diversos arquitetos de renome na época como Ernesto Rogers (Itália), Walter Gropius (Alemanha), Peter Craymer (Inglês que atuava no Brasil), Hiroshi Ohye (Japão).

Affonso Reidy, nasceu em Paris, França, em 1909, sua ascensão, anglo-saxã por parte do pai e latina por parte da mãe, é frequentemente lembrada ao falar de sua obra. Reidy cresceu no Rio de Janeiro e viveu mais da metade de sua vida ao lado de Carmem Portinho – terceira brasileira a receber um diploma de engenharia, tida como uma mulher à frente de seu tempo e a conhecida atitude livre e apaixonada do casal pode ser encontrada em suas realizações e na plástica franca, audaciosa e desinibida, inovadora e extrovertida da arquitetura de Affonso Reidy. “Formas livres e liberadoras que não deixam de provocar imagens de paixão e erotismo.” (CONDURO, 2000).

Affonso Reidy ingressou na Escola Nacional de Belas Artes aos 17 anos e se formou Arquiteto em 1930. Em 1931 já lecionava a cadeira de Composição de Arquitetura, inicialmente como assistente do arquiteto russo-brasileiro Gregori Warchavchik e depois como titular, sucedendo-o. Em 1932, Reidy foi nomeado arquiteto-chefe da Prefeitura do Distrito Federal, da qual foi funcionário durante toda sua carreira. Entre 1936 e 1942, integrou a equipe de Lúcio Costa para o projeto do Ministério da Educação e Saúde quando teve contato próximo com Le Corbusier.

Figura 64 – Conjunto Habitacional Pedregulho, Rio de Janeiro, 1950 de Affonso Eduardo Reidy. Vista do bloco de apartamentos.



Fonte: Portal Educatorium – www.educatorium.com/projetos.

Affonso Reidy era um seguidor declarado de Le Corbusier. No projeto do “Pedregulho” ele materializa a ideia da edificação “em fita” proposta por Le Corbusier nos estudos feitos para o Rio de Janeiro durante sua primeira visita, em 1929 (Figura 65). Além disso, Reidy também incorpora

aos projetos do edifício os conceitos de Le Corbusier para habitação e sua relação com o entretenimento e a saúde pública.

O Conjunto Residencial Prefeito Mendes de Moraes, no Pedregulho, 1946 foi a primeira obra expressiva de Reidy, projetada enquanto ele ocupava a função de arquiteto-chefe do Setor de Planejamento do Departamento de Habitação Popular (DHP), criado e dirigido por sua esposa, a engenheira Carmen Portinho na prefeitura do Distrito Federal.

Figura 65 – Comparação entre o projeto de Le Corbusier para o Rio de Janeiro em 1929 (esquerda) e o Conjunto Residencial Pedregulho, de Affonso Reidy, de 1950 (direita).



Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.

Figura 66 – Projeto/Maquete – Escola do Conjunto Residencial Prefeito Mendes de Moraes - Pedregulho, Benfica, Rio de Janeiro, 1946.



Fonte: CONDURO, 2000 (p. 4).

O Conjunto Pedregulho, fica localizado no bairro Benfica, no Rio de Janeiro, próximo ao centro da cidade. O projeto, amplo, previa, além das unidades habitacionais, toda uma estrutura urbana com escolas e centros de lazer e esporte (Figura 66). A conclusão da obra levou 4 anos, entre 1946 e 1952. Referência na temática da habitação popular até os dias de hoje, o projeto constituiu uma das primeiras tentativas de construir conjuntos habitacionais no país. (SILVA, 2005).

Outra obra importante de Reidy é o Colégio Brasil-Paraguai, em Assunção, de 1952 (Figura 67) e é considerada um marco que redireciona a obra do arquiteto para a valorização dos atributos construtivos na arquitetura. Regado de importantes influências, como a Unidade de Habitação de Marselha (Le Corbusier, 1946-52) a escola e o hotel projetados em 1951 por Oscar Niemeyer em Diamantina, Minas Gerais, e o Crown Hall, Faculdade de Arquitetura do Instituto Tecnológico de Illinois (IIT), de Mies Van der Rohe em 1950, o projeto de Reidy utiliza de elementos marcantes que iriam influenciar toda uma escola modernista nas décadas de 1960 e 1970. Os pilares em 'V', a estrutura porticada e o concreto aparente que aparecem um ano mais tarde no projeto do MAM.

Figura 67 – Colégio Brasil-Paraguai, Assunção, Paraguai. Affonso Reidy, 1952.



Fonte: LEONÍDIO, 2006.

O Conjunto Residencial Marquês de São Vicente, 1952 Situado no baixo da Gávea, no Rio de Janeiro, foi construído para substituir uma favela (Figura 68). O terreno é bastante acidentado, numa encosta de morro, com desnível de 60 metros e ainda é cortado pelo rio Rainha. O projeto contou com obras de canalização do rio e a construção de uma avenida de ligação do bairro do Leblon ao da Gávea, cortando a montanha com um túnel (Dois Irmãos). Sobre esse túnel, Reidy surpreende colocando o edifício residencial, sinuoso, se adaptando ao formato do terreno e utilizando os pilares em 'V' no andar intermediário.

Figura 68 – Conjunto Residencial Marquês de São Vicente. Affonso Reidy, 1952.



Fonte: MAHFUZ, 2003.

As críticas internacionais formaram o contexto da Arquitetura Moderna Carioca, mas os críticos da época foram quase unânimes em exaltar a arquitetura de Affonso Reidy, em contraponto com a arquitetura de Oscar Niemeyer e Lúcio Costa, por exemplo. A nova geração de arquitetos do Rio de Janeiro considerava que o Modernismo Brasileiro precisava tomar outro rumo, e se preocupavam com as críticas de “gratuidade formal” e “decorativismo”. Assim, surgia principalmente entre jovens arquitetos e estudantes de arquitetura, uma divisão que de um lado tinha como ícone Oscar Niemeyer e, de outro, Affonso Eduardo Reidy, principalmente depois do projeto do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, que passou a representar a Arquitetura Moderna Carioca. Como declarava Alfredo Britto ainda estudante da Faculdade Nacional de Arquitetura: “Eu não tenho dúvida de que, com o MAM, o Reidy traz uma alternativa para a questão Oscar Niemeyer” (CONDURO, 2005).

Essa relação mostra que o segundo momento aqui destacado não se resume às obras da Pampulha. A relação estrutura e arquitetura aparece com vigor nas duas vertentes da arquitetura moderna brasileira que se formavam nesse período.

O Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM – foi projetado por Affonso Reidy entre 1952 e 1953 (Figura 69). A solução construtiva de Affonso Reidy no projeto do MAM se destaca pela utilização da compensação entre momentos fletores na base do ‘V’ formado pelos pilares dos pórticos que compõe a arquitetura do edifício. Esse artifício, apesar de aparentar contrariar o percurso natural das cargas, imposto pela gravidade, ampliando seu percurso até a fundação, é

justificável tanto pela questão estética como por questões estruturais que serão analisadas em um dos estudos de caso dessa tese.

Figura 69 – Vista do corpo principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, bloco de exposições. Rio de Janeiro.



Fonte: CASTELOTTI, 2006, p.86

Nesse contexto, as obras de Affonso Reidy no Rio de Janeiro fazem parte também desse segundo momento, já que apesar de estabelecer, em certa medida, contrapontos formais com a arquitetura de Niemeyer na Pampulha, tem em comum, além da relação de continuidade e evolução conceitual levantada por Lúcio Costa, o mesmo compromisso com a estrutura e o equilíbrio entre a forma arquitetônica o sistema estrutural.

Além dessas obras, a exposição “Brasil Builds” de Nova York e o próprio Joaquim Cardozo em seus textos sobre esse momento da arquitetura moderna brasileira citam com destaque os edifícios do conjunto da exposição do IV Centenário de São Paulo; as obras dos irmãos MM Roberto como o edifício Marquês do Herval que também “adotam variadas disposições de colunas, todas partindo do mesmo princípio que determinou as construções sobre pilotis” e o Edifício Anglia que traz soluções de iluminação, acústica e ventilação “dignas de ficarem incorporadas às boas características da arquitetura brasileira contemporânea”. (NASCIMENTO, 2007)

Outros exemplos trazidos por Cardozo para esse contexto de inovação nas soluções estruturais para a arquitetura moderna são os edifícios de apartamentos do Parque Guinle (Figura 70), projetados por Lucio Costa e as obras do arquiteto Sérgio Bernardes, que vinha procurando “aliar a estruturas de concreto armado certos elementos em treliça de ferro soldado, de uma extraordinária delicadeza”, técnica aplicada na residência Lota Macedo Soares (Figura 71), em Petrópolis, Rio de Janeiro de 1953, obra que rendeu ao arquiteto um prêmio para jovens arquitetos

na II Bienal de São Paulo, que teve em seu júri nomes consagrados como Alvar Aalto, Walter Gropius e Ernest Rodger.

Joaquim Cardozo conclui:

“Todos estes resultados são reveladores de que a arquitetura brasileira, longe de paralisar-se em fórmulas exaustas, vai-se desenvolvendo com uma vitalidade surpreendente e uma riqueza de tendências e soluções bem compatível com os progressos da técnica e dos métodos construtivos.” (CARDOZO, 1955).

Figura 70 – Vista do conjunto de edifícios residenciais do Parque Guinle, de Lúcio Costa de 1940-1949, no Rio de Janeiro.



Fonte: Autor desconhecido, em Casa de Lúcio Costa (<http://casadeluciocosta.org/>).

Figura 71 – Residência Lota Macedo Soares, de Sérgio Bernardes, em Petrópolis, RJ, de 1953.



Fonte: Bernardes Arquitetura (<https://www.bernardesarq.com.br/memoria/lota-macedo-soares/>).

3.1.3 Brasília

O terceiro momento da arquitetura moderna brasileira foi a construção de Brasília e foi objeto de estudo do autor na dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Brasília em 201 com o título “O Sistema Estrutural na Obra de Oscar Niemeyer” onde são destacadas as principais obras do arquiteto e sua relação com o sistema estrutural adotado.

Nos edifícios monumentais da Capital, como o Palácio do Planalto (Figura 72) e o edifício do Supremo Tribunal Federal (Figura 73) a utilização do potencial técnico do concreto armado, alinhado a uma criatividade plástica no desenho das formas estruturais permitiu que Niemeyer criasse grandes estruturas que “pousam levemente” sobre o solo (INOJOSA, 2010). Sobre esse momento, Niemeyer destaca a criatividade das colunas dos palácios.

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 72 – Palácio do Planalto em Brasília. Foto de Bernie DeChant.

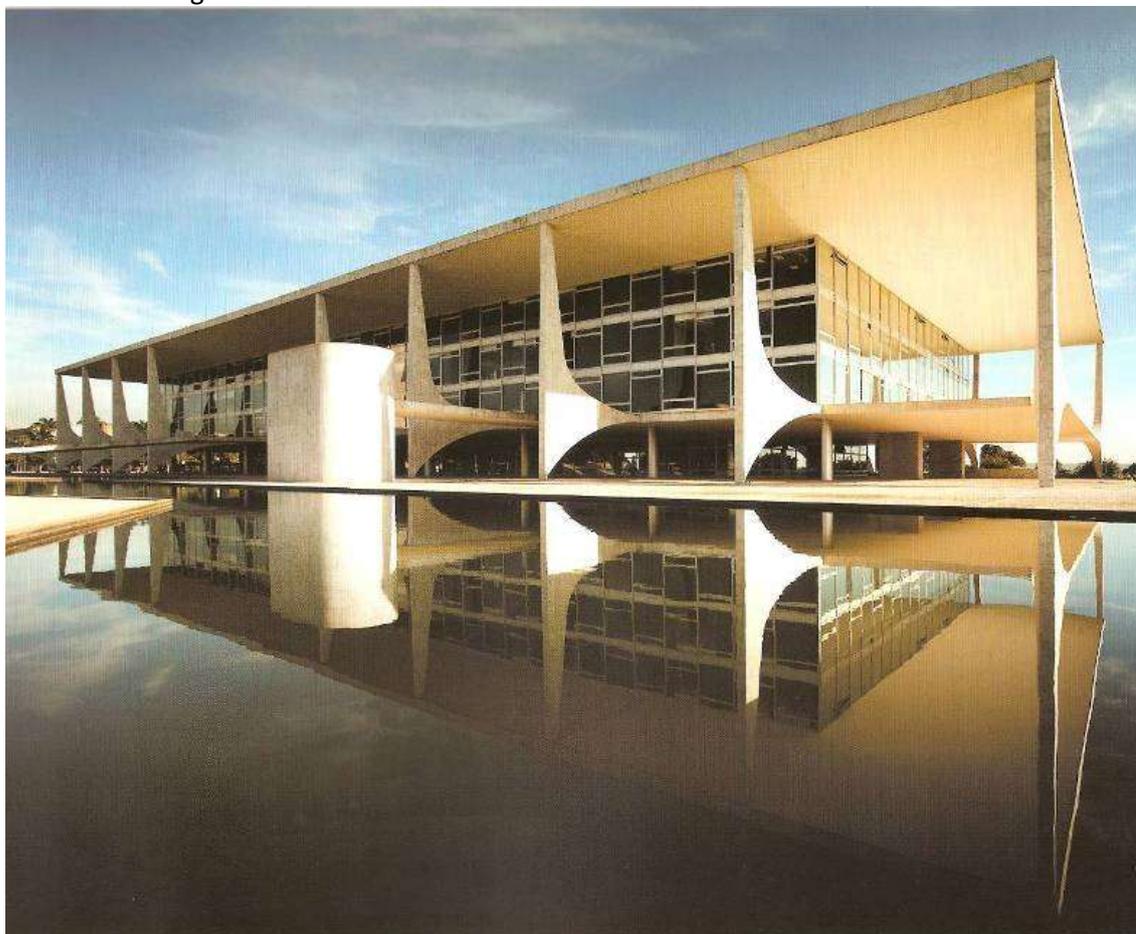


Figura 73 – Supremo tribunal Federal em Brasília.



Fonte: Foto do autor.

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. Isso se deve graças ao talento, criatividade e ousadia de três grandes nomes da Arquitetura Brasileira, Lúcio Costa, Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo (GALLINDO, 2004).

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 Cardozo. 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).

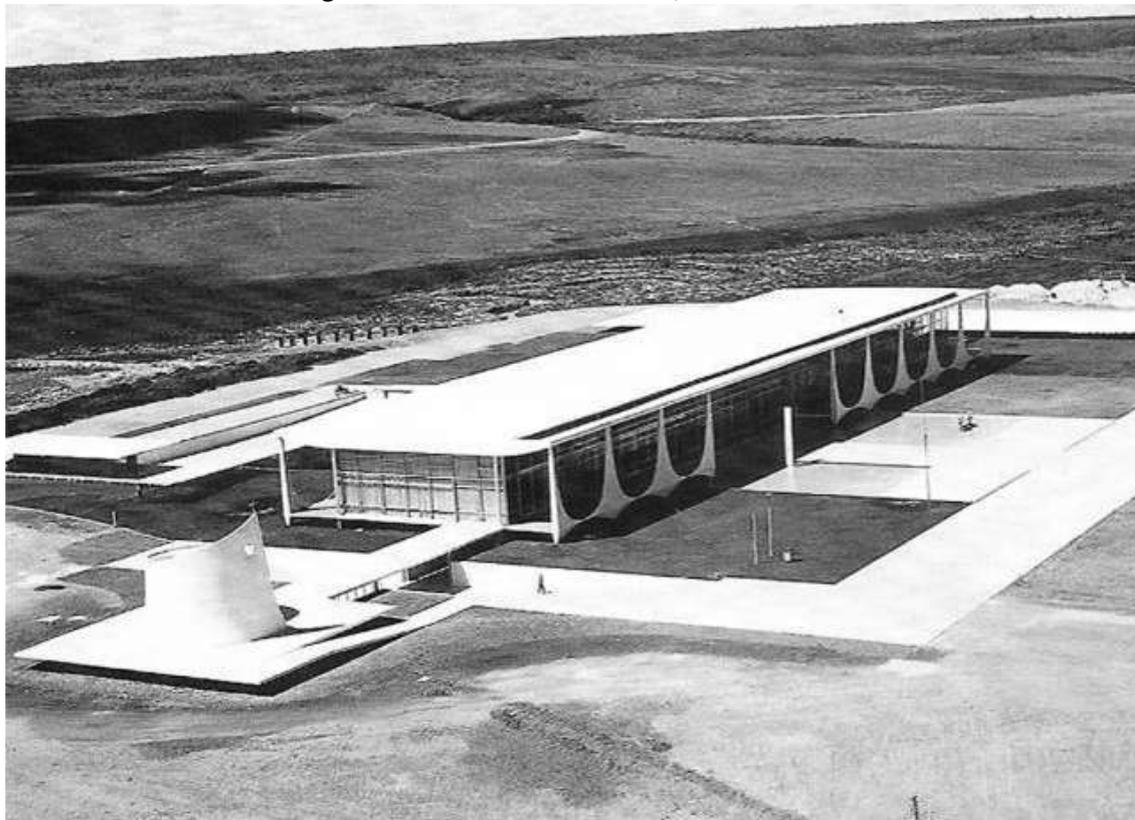
Os projetos de Brasília trouxeram desafios e exigiram que Joaquim Cardozo trabalhasse, quase que ao mesmo tempo, com problemas e soluções estruturais inovadoras. Como os “verdadeiros arcobotantes, não mais como abóbodas, mas escorando-se entre si” da Catedral, ou “uma casca limitada pela superfície de uma zona de elipsoide 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 esbeltes dos perfis e das grandes e finas lajes desenhadas por Niemeyer.

O primeiro palácio a ser construído em Brasília foi o Palácio da Alvorada (Figura 74), 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).

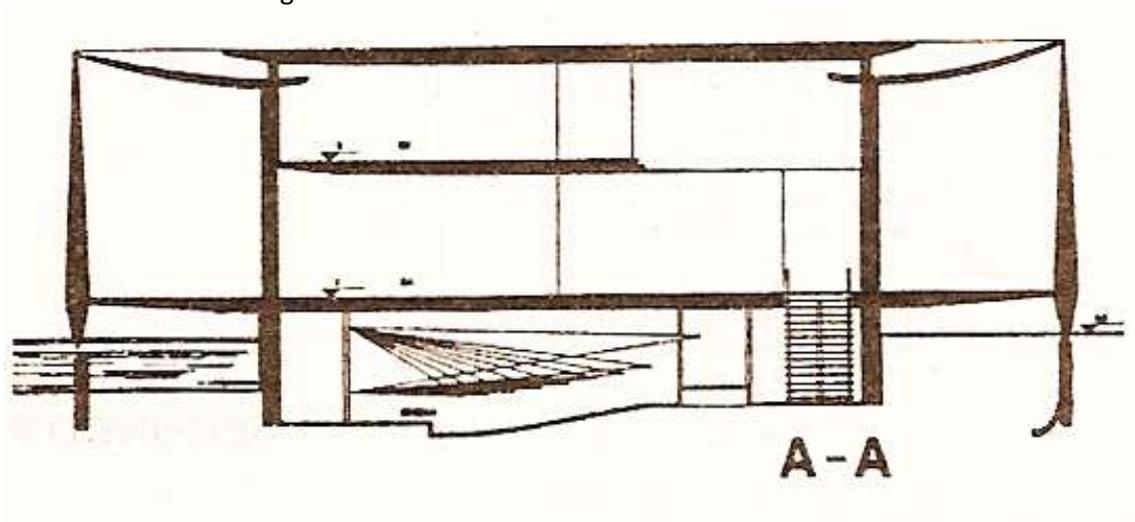
Figura 74 – Palácio da Alvorada, Brasília 1957.



Fonte: Foto de Marcel Gautherot. UNDERWOOD. 2003 p. 86.

Na Figura 75 é mostrado um corte transversal 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).

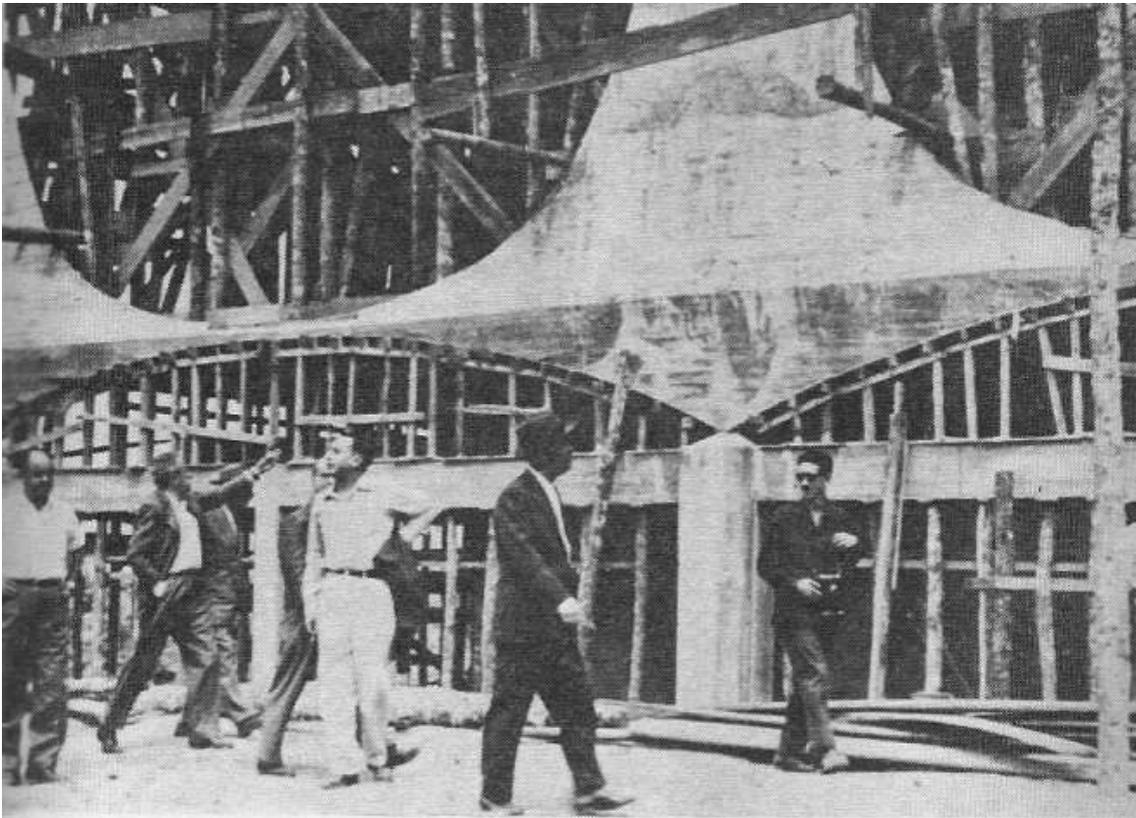
Figura 75 – Corte transversal do Palácio da Alvorada.



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). Característica marcante dessa obra, o desenho dos pilares da varanda chama a atenção na composição da fachada do edifício. 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 76 (VASCONCELOS, 1992).

Figura 76 – Foto da construção em que aparecem os apoios dos pilares do Palácio da Alvorada antes de serem aterrados.



Fonte: VASCONCELOS, 1992 (Volume I), pág. 89.

Soluções similares para diminuir a espessura da laje de cobertura próximo 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.

Ainda em 1957, em Brasília, ergueu-se a Igreja Nossa Senhora de Fátima (Figura 77), projeto de Oscar Niemeyer, também com o engenheiro Joaquim Cardozo, um dos primeiros edifícios da nova capital. A Igrejinha Nossa Senhora de Fátima é um dos estudos de caso deste trabalho, nela

podemos constatar que a forma arquitetônica da Igreja Nossa Senhora de Fátima está relacionada diretamente com a maneira que o arquiteto e o engenheiro intervíram de forma criativa no seu sistema estrutural.

Figura 77 – Vista da Igreja Nossa Senhora de Fátima.



Fonte: Foto do autor.

Outra obra de Brasília, onde é possível destacar o desenho arquitetônico seguindo as linhas do sistema construtivo é o antigo Touring Club (Figura 78), projetado em 1962 por Oscar Niemeyer. 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, 2007).

Podemos observar nas Figura 78 e Figura 79 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.

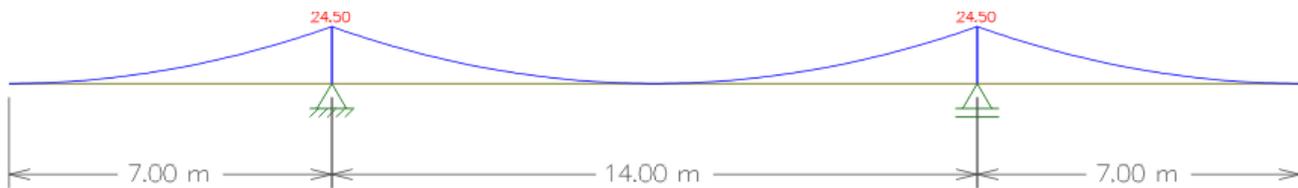
Um desenho de viga muito semelhante a esse já havia aparecido em outra obra de Niemeyer. A cobertura do anexo do late Clube de Pampulha em Belo Horizonte, de 1961 apresenta uma situação semelhante, porém nesse caso os balanços não são simétricos. Isso gera uma mudança no diagrama de momento fletor, que apresenta um momento fletor negativo maior no apoio próximo ao maior balanço (Figura 80). Essa diferença no desenho do gráfico de momento fletor foi repetida pelo arquiteto na forma das vigas (Figura 81).

Figura 78 – Antigo Touring Club do Brasil, Brasília.



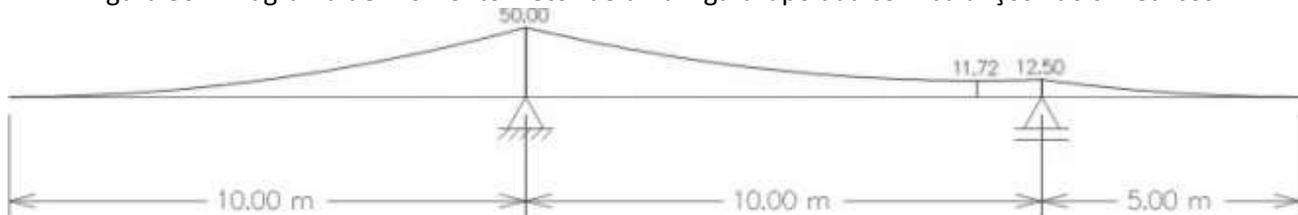
Fonte: Foto do Autor.

Figura 79 – Diagrama de Momento Fletor da viga de cobertura do Touring Club do Brasil, Brasília.



Fonte: Desenho do autor. Programa FTOOL (INOJOSA, 2010).

Figura 80 – Diagrama de Momento Fletor de uma viga bi apoiada com balanços não simétricos.



Fonte: Desenho do autor. Programa FTOOL (INOJOSA, 2010).

Figura 81 – Anexo do late Clube Pampulha.



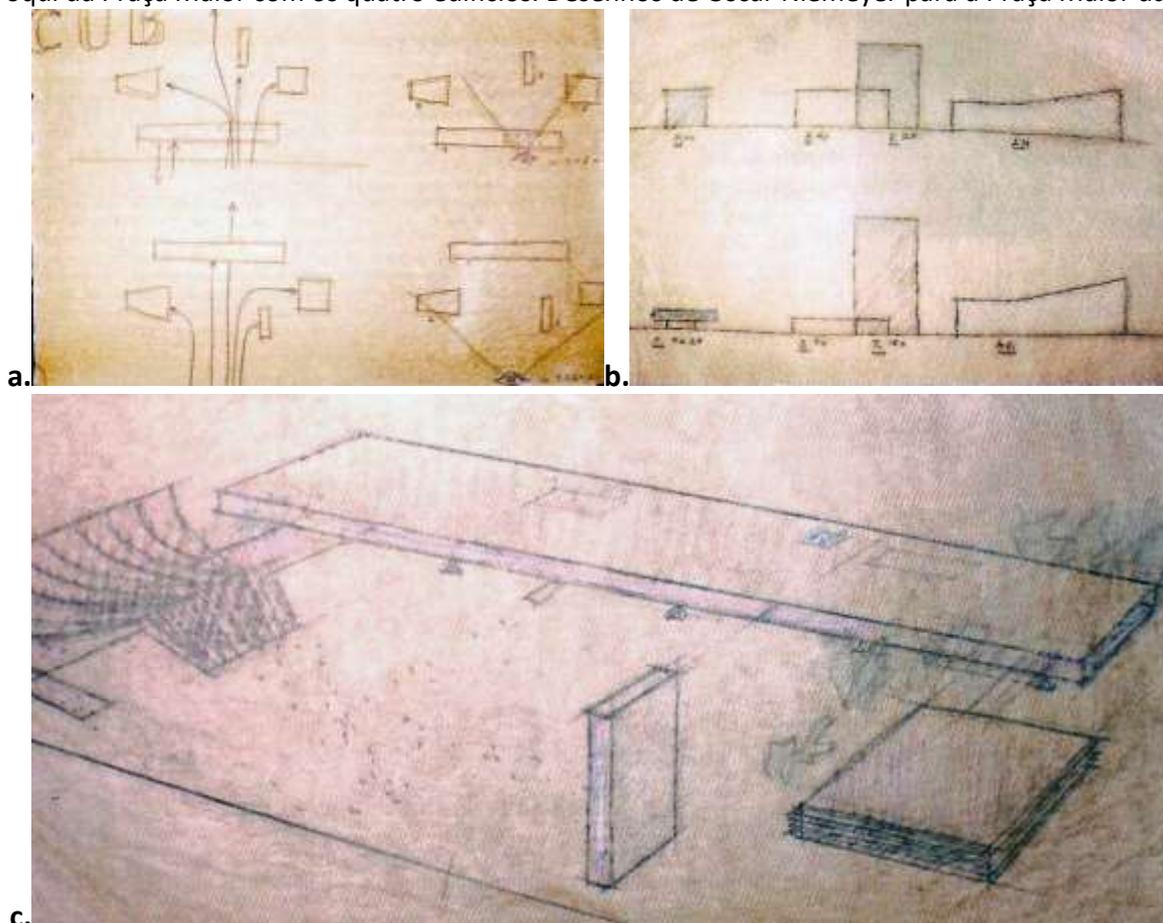
Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

O plano de urbanização da UnB – Universidade de Brasília, 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 (INOJOSA, 2010).

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. 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 ideia da praça, a volumetria e a forma de seus edifícios evoluíram na ideia de Niemeyer (CAMPOS, 2009) (Figura 82).

Figura 82 – 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.



O Edifício do ICC (Figura 83), 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 ideia 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 utilizados como salas de aula (FONSECA, Regis, 2007).

Figura 83 – 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.

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 (Figura 84), sendo considerado um marco desse segmento no Brasil (MOREIRA, 2007).

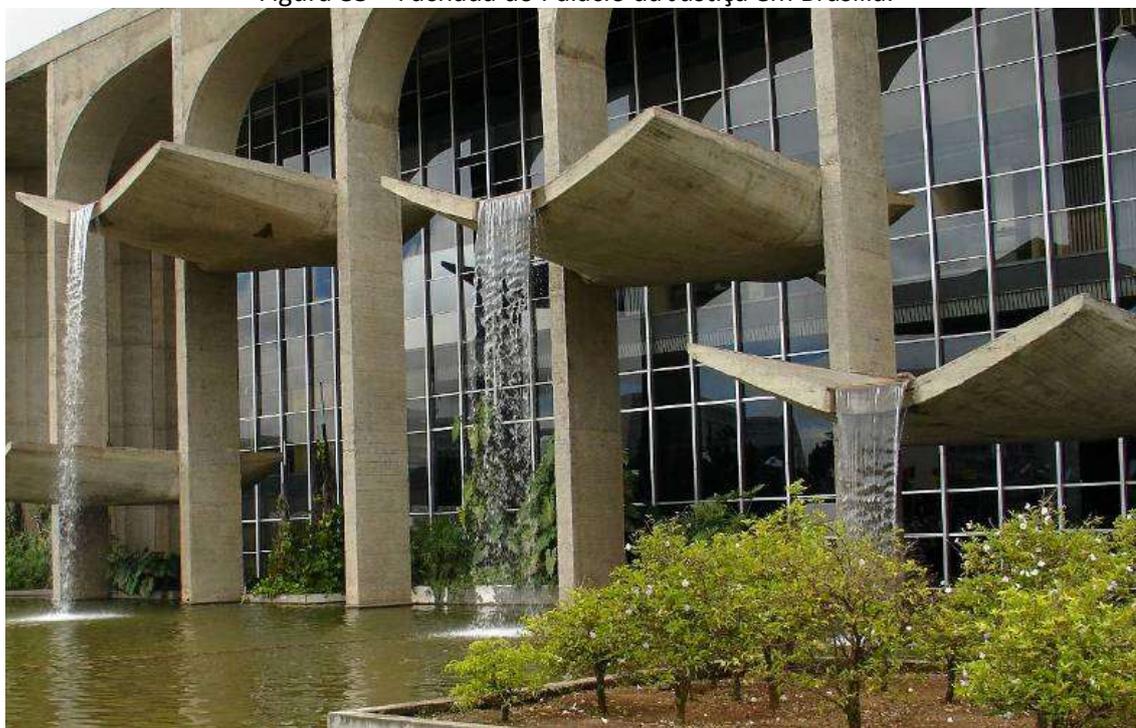
Figura 84 – Montagem das vigas pré-moldadas da cobertura do ICC.



Fonte: FONSECA, Regis, 2007, p. 6.

Estruturas mais ousadas e fachadas monumentais podem ser vistas nos palácios de Brasília projetados por Oscar Niemeyer, como o Palácio da Justiça (Figura 85), de 1965. 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.

Figura 85 – Fachada do Palácio da Justiça em Brasília.



Fonte: Foto do autor.

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 e sugeriu que os arcos da fachada principal, que haviam sido feitos como arcos plenos fossem reformados para a forma de semiarcos, conforme haviam sido pensados originalmente.

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 (INOJOSA, 2010).

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 pelos 9 semiarcos que ligam pilares extremamente esbeltos, espaçados a cada 6,5 metros (MOREIRA, 2007).

A fachada posterior do edifício 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 semiarcos 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. 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 contra flecha 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 contra flechas de até 5 centímetros (MOREIRA, 2007).

Outro palácio, construído no período entre 1963 e 1970, tendo sofrido diversas paralisações em sua obra, o Palácio do Itamaraty (Figura 86) 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 86 – Fachada do Palácio do Itamaraty, Brasília.



Fonte: 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 para a 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 como as mostradas na Figura 87. 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 contra flechas nas vigas, contrabalanceando as elevadas deformações na retirada dos escoramentos (SANTOS, 2007).

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

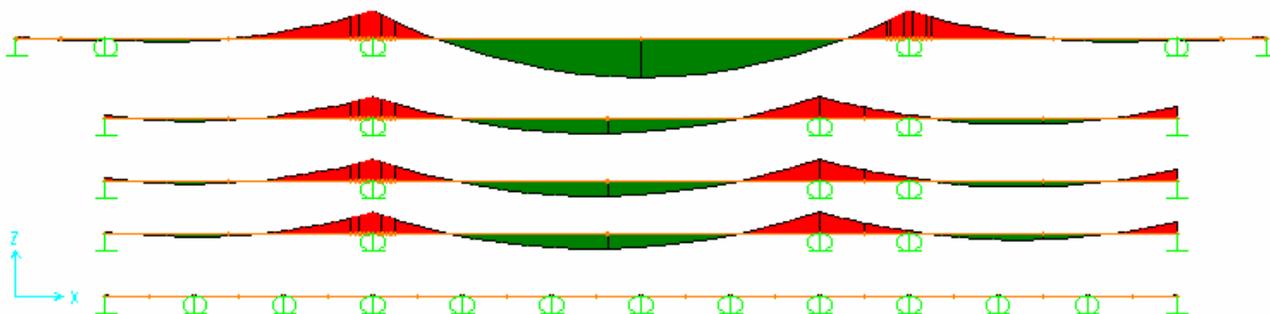
de momento fletor obtido por Santos (2007) através do programa SAP 2000 para as vigas na direção Leste-Oeste (Figura 88) os esforços estão concentrados nos pilares internos da estrutura, o que permite, a exemplo dos outros palácios, maior leveza nas colunas da fachada.

Figura 87 – Jardim interno do Palácio do Itamaraty, Brasília.



Fonte: Foto do autor.

Figura 88 – Diagrama de momentos fletores nas vigas no sentido Leste-Oeste do Palácio do Itamaraty.



Fonte: SANTOS, 2007.

Além dos palácios, alguns anos depois, na ponte Honestino Guimarães (Figura 89), antiga ponte Costa e Silva em Brasília, de 1967, Niemeyer utilizou seus conhecimentos sobre o sistema estrutural para criar uma obra simbólica, cujo resultado evidencia a proximidade da forma com a necessidade estrutural. No projeto da ponte, única ponte construída projetada pelo arquiteto, 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 vão menores de 110 metros cada, uma solução estrutural – grande vão ladeado por vão menores – de total conhecimento do arquiteto, e pode ser notada em vários palácios de Brasília (FONSECA, Roger, 2007).

Na Figura 90 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 89 – Vista aérea da Ponte Honestino Guimarães em Brasília.



Fonte: Foto de Augusto Areal. Infobrasília.

Figura 90 – Ilustrações com base no Gráfico de Momento Fletor para a Ponte Honestino Guimarães.

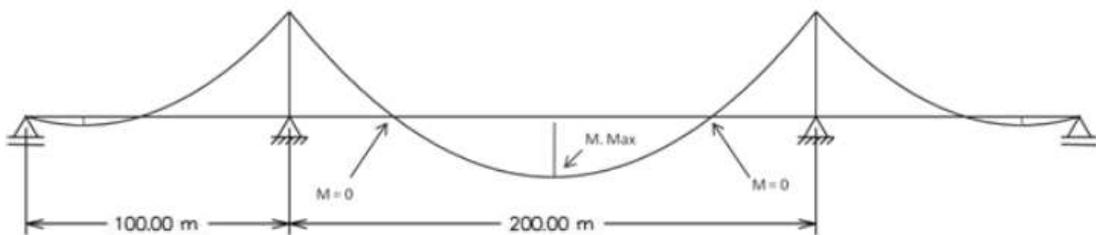


Figura 4.27 – Resultado do gráfico dos esforços de Momento Fletor realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

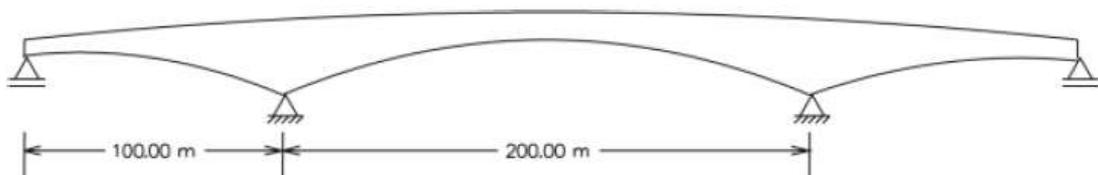


Figura 4.28 – Resultado formal obtido ao se inverter o gráfico de momento fletor, a forma arquitetônica tendo como referência a forma do gráfico de momento. Desenho realizado pelo autor. Fonte: (Photoshop, 2007).

Nos projetos de Brasília a carreira de Joaquim Cardozo é marcada pelos maiores desafios estruturais enfrentados pelo engenheiro, como nos projetos da Catedral de Brasília e da Cúpula da Câmara dos Deputados – analisada em um dos estudos de caso desta tese, 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).

No projeto da Catedral de Brasília (Figura 91), 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 91 – Catedral de Brasília.



Fonte: Foto do autor.

3.1.4 Pós-Brasília

A fama internacional alcançada pela arquitetura moderna brasileira, durante o momento anterior – Brasília – representou uma revolução não só para a arquitetura, mas a qualidade e a diversidade e a inovação estética proporcionada pelos arquitetos brasileiros provocou um avanço técnico e tecnológico para a engenharia e a construção brasileira, que foi também reconhecida internacionalmente. Apesar disso, as obras realizadas, principalmente no Brasil após esse momento

– nas décadas de 60 e 70 – ficaram de certo modo “esquecidas” pelos críticos, e subestimadas na historiografia internacional (ZEIN, 2005). Mesmo assim podemos destacar mais um momento na arquitetura brasileira, pois após consolidação de Brasília existem inúmeras obras de alto interesse técnico e formal produzidas durante esse quarto momento.

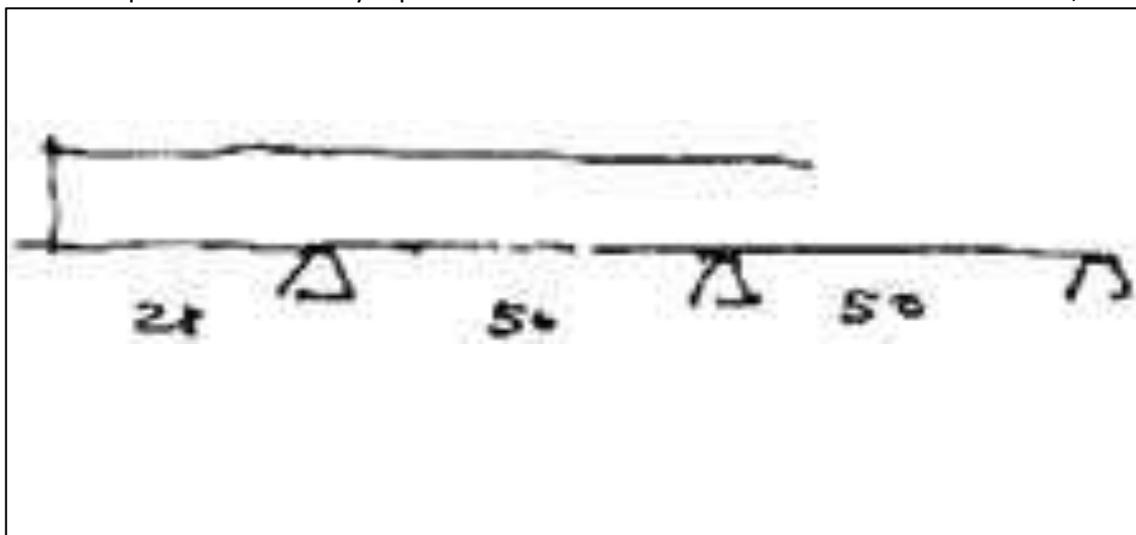
Exemplos disso são os projetos realizados no exterior nas décadas de 60 e 70 por Oscar Niemeyer, durante o período de exílio, criando estruturas para vencer grandes vãos e formas cada vez mais livres (OHTAKE, 1987). Sua inventividade também fez com que a tecnologia estrutural evoluísse, como resume bem 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)

Nesse período, os arquitetos brasileiros concretizam seus projetos mais arrojados, que testam os limites da tecnologia do concreto armado em balanços gigantescos e colunas cada vez mais esbeltas (SABBAG, 1987).

Na Argélia a Universidade de Constantine, 1969, projetada por Oscar Niemeyer (Figura 92 e Figura 93), possui 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 92 – Croqui de Oscar Niemeyer para o Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia.



Fonte: Fundação Oscar Niemeyer

Figura 93 – Edifício de Classes – Universidade de Constantine, na Argélia, 1969.



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, e com ele a arquitetura e a engenharia brasileira, 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 edifício marcante desse momento é a Sede do Partido Comunista Francês em Paris, projetado por Niemeyer em 1965 e construído entre 1971 e 1980 (Figura 94).

Figura 94 – Sede do Partido Comunista Francês, Paris, 1971 a 1980.

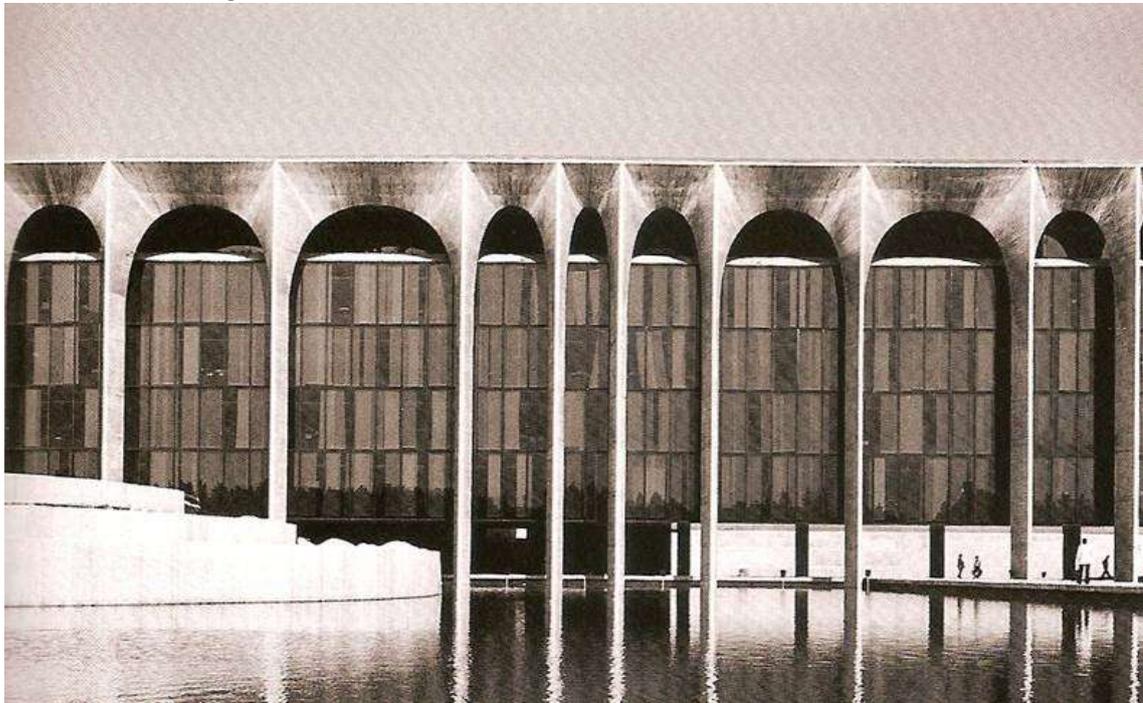


Fonte: Foto do autor.

Um exemplo da disseminação da tecnologia brasileira na construção civil, também dessa fase, foi a construção da sede da empresa Fata Engineering em Turim, Itália em 1975. 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 apud NIEMEYER, 2000). Isso mostra como a inventividade da arquitetura moderna contribuía para a evolução da técnica construtiva (INOJOSA, 2010).

Bruno Contarini, grande nome da engenharia brasileira participou desse momento com grande destaque no Brasil e no exterior, foi responsável por diversas obras da fase internacional de Niemeyer além da Universidade de Constantini, como a sede da editora Mondadori em Milão na Itália em 1968 (Figura 95).

Figura 95 – Sede da Editora Mondadori em Milão, Itália, 1968.



Fonte: UNDERWOOD, 2002, pag. 111.

No Brasil os arquitetos modernistas brasileiros também criam várias obras nas quais 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 desse período. Como no já citado “maior vão livre do mundo” na época, no Museu de Arte de São Paulo – MASP, de Lina Bo Bardi em 1968 ou nos grandes planos e empenas estruturais de concreto armado, de Villanova Artigas, no edifício da FAU-USP, em São Paulo de 1969 (Figura 96).

O edifício da FAU é um clássico representante da Arquitetura Brutalista Paulista, que, segundo ZEIN (2006) concentrou boa parte da melhor arquitetura brasileira dos anos 1960-70 e,

tendo sua origem ainda na década de 1950 – a exemplo do MAM do Rio de Janeiro de Reidy, representou uma certa ruptura formal com a arquitetura da “Escola Carioca” tanto de Oscar Niemeyer como do próprio Affonso Reidy. Essa ruptura acontece de forma gradual, em consequência das próprias mudanças e evoluções dos estilos internacionais como Mies Van der Rohe e Le Corbusier e a partir dos anos 1960 essas obras começam a se diferenciar das demais, caracterizando um novo momento na arquitetura moderna brasileira.

Grandes arquitetos paulistas se destacam nesse momento produzindo as obras que caracterizaram o Movimento Brutalista, além do edifício da FAU-USP, Vilanova Artigas de Carlos Cascaldi desenvolvem na década de 60 os projetos para a garagem de barcos do Clube Santapaula, Walter Toscano e Massayoshi Kamimura apresentam o Balneário de Águas da Prata, em 1971 (Figura 97) e Paulo Mendes da Rocha em 1973 mostra “equilibrada confluência entre concepções estrutura, arquitetônica e urbanística” na obra do Estádio Serra Dourada, em Goiânia (Figura 98), onde se destacam a cobertura plana e elevada de apoio central e o edifício de acessos e serviços elevado sob pilotis (ZEIN, 2005).

Figura 96 – Edifício Vilanova Artigas – FAU-USP, 1969.



Fonte: www.arquivo.arq.br.

Antes disso, em 1961, Paulo Mendes da Rocha já havia projetado a cobertura do Ginásio do Clube Atlético Paulistano (Figura 99), obra representativa do arrojo estrutural do Brutalismo. E mais tarde exhibe sua técnica refinada para gerar a forma, na “pedra no céu”, a grande viga bi apoiada do Museu Brasileiro da Escultura em São Paulo, em 1988 (Figura 100). Obra descrita pelo engenheiro Mário Franco – responsável pelo projeto estrutural do museu – como sendo um “cartão de visitas” da tecnologia brasileira em concepção arquitetônica e estrutural, onde foram empregados materiais de ponta e utilizados o que havia de mais atual em análise estrutural por computador (Depoimento

do Engenheiro Mário Franco sobre a concepção estrutural do MUBE, vídeo de Luiz Bragmann, em ORNSTEIN et al., 1991).

Entre as características que diferenciavam a Arquitetura Brutalista das demais obras modernistas estão a exposição dos materiais em estado natural, como o concreto aparente, geralmente com uma “crujeza” proposital no acabamento apresentando superfícies limpas, aparência também repetida no interior dos edifícios, que provocavam uma “clara exibição da estrutura” e seria “uma afirmação energética da estrutura” (BANHAM, 1959 apud ZEIN, 2005).

Figura 97 – Balneário de Águas da Prata, de Walter Toscano e Massayoshi Kamimura em 1971.



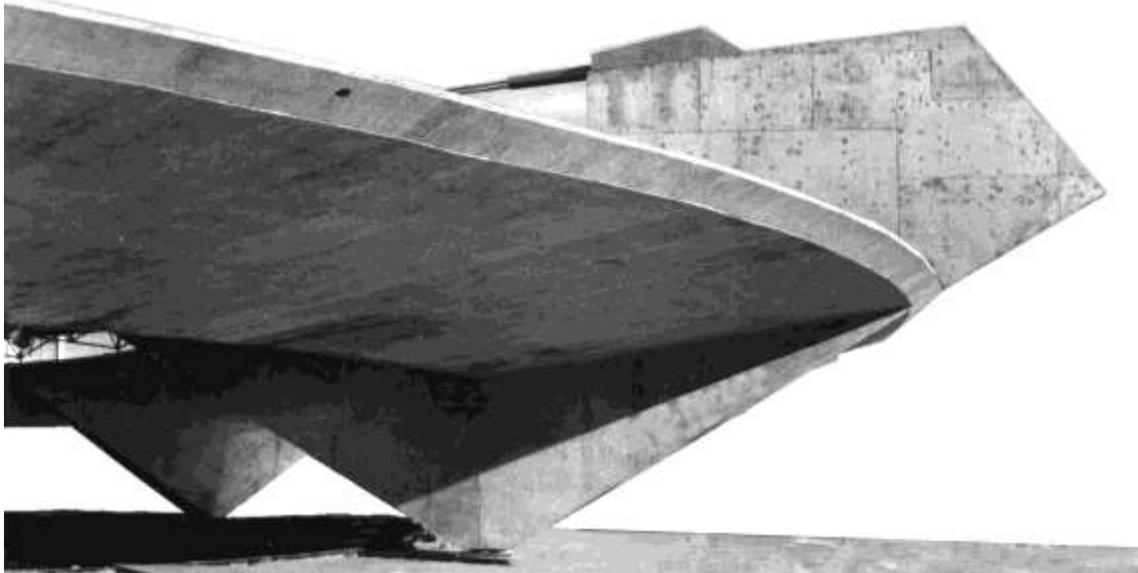
Fonte: <http://www.tecto.com.br>.

Figura 98 – Estádio Serra Dourada em Goiânia, de Paulo Mendes da Rocha em 1973.



Fonte: Acervo Paulo Mendes da Rocha em www.itaucultural.org.br.

Figura 99 – Cobertura do Ginásio do Clube Atlético Paulistano, de Paulo Mendes da Rocha, em 1971.



Fonte: Acervo Paulo Mendes da Rocha em www.archdaily.com.br.

Figura 100 – Museu Brasileiro da Escultura - MUBE, de Paulo Mendes da Rocha, em 1988.

Fonte: Foto de Nelson Kon em www.nelsonkon.com.br/mube/.

Mas esse momento não se restringe ao Brutalismo Paulista, ele é marcado também pela diversidade entre as “escolas” da arquitetura moderna brasileira. Além da “Escola Carioca”, que trouxe certa sequência do momento de Brasília e da “Escola Paulista”, representada pelo Brutalismo, outros exemplos do protagonismo estrutural podem ser registrados, como na exploração lógica do sistema construtivo industrializado, de João Filgueira Lima no Centro Administrativo da Bahia, em Salvador, de 1973 (Figura 101) (INOJOSA, 2010).

Figura 101 – Centro Administrativo da Bahia, em Salvador, de 1973, de João Filgueira Lima.

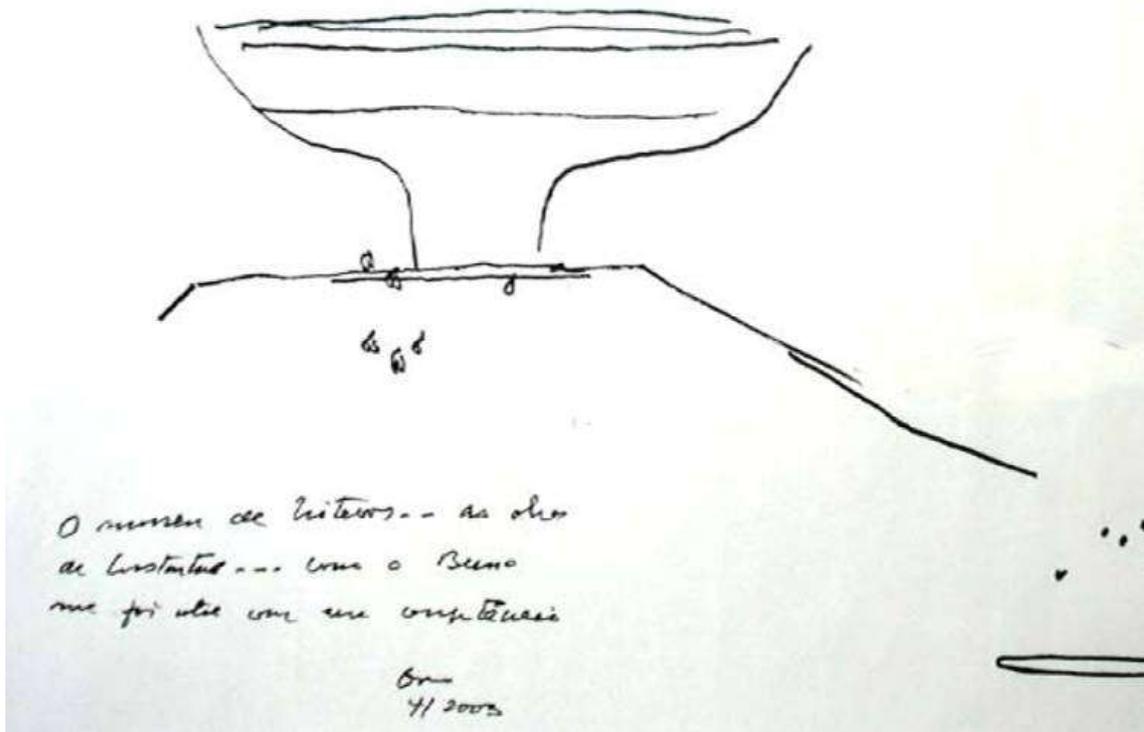


Fonte: Foto de Kaki Afonso em www.archdaily.com.br.

Durante esse momento da arquitetura moderna brasileira, destacamos novamente a importância dos engenheiros responsáveis pelos cálculos estruturais das obras destacadas, como Bruno Contarini, que foi responsável, além dos exemplos já mostrados, pelo cálculo do Superior Tribunal de Justiça, em Brasília em 1989 e o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói de 1996 (Figura 102), 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.

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. Este prêmio também foi recebido, em 2006, por Paulo Mendes da Rocha, por sua imensa contribuição à arquitetura durante o momento pós-Brasília, consagrando a qualidade da arquitetura moderna brasileira.

Figura 102 – Croqui de Oscar Niemeyer para o Museu de Arte Contemporânea – MAC de Niterói, no texto, uma alusão à contribuição de Bruno Contarini.



Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

Capítulo 4.

PROTAGONISMO ESTRUTURAL NA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA - ESTUDOS DE CASO

Muitos são os exemplos vistos nesse trabalho que demonstram a importância do sistema estrutural para a concepção arquitetônica moderna, a seguir, são apresentados os estudos de caso que apontam a importância dos elementos estruturais escolhidos para cumprirem o papel portante das cargas a eles atribuídas e que também se mostram protagonistas da definição da forma arquitetônica.

Nas obras destacadas nesta tese, ao longo de toda a história, arquitetura e a estrutura nascem juntas, não são elementos distintos da construção. Mais que isso, na arquitetura moderna brasileira a estrutura é protagonista e os elementos estruturais, quase sempre aparentes, são responsáveis pela estética e a concepção do espaço arquitetônico.

A seleção dos estudos de caso levou em consideração fatores históricos, da relevância da obra para o período em que foi concebida e fatores técnicos, da inovação tecnológica trazida pelo projeto, no uso do potencial do material ou na inventividade do sistema estrutural que contribuíram para caracterizar o momento histórico ao qual está relacionado.

Porém, foi levado em consideração também a disponibilidade de informações, que reunidas e organizadas, fossem capazes de propiciar uma análise qualitativa correta da relação tectônica – estrutura e arquitetura – das obras selecionadas, evidenciando assim o protagonismo do sistema estrutural no decorrer do desenvolvimento da arquitetura moderna brasileira ao longo de cada momento, desde os primeiros episódios do movimento, até a consolidação e dissipação do estilo.

4.1 1º Momento: Recife

4.1.1 Escola Rural Alberto Torres (Luiz Nunes e Joaquim Cardozo)

O projeto do edifício da Escola Rural Alberto Torres (Figura 103) em Recife data de 1935 e foi fruto da iniciativa pioneira do arquiteto Luiz Nunes – a criação da Diretoria de Arquitetura e Urbanismo (D.A.U.) – e envolveu o engenheiro Joaquim Cardozo, responsável pelo cálculo estrutural.

Neste estudo de caso faz-se uma análise do projeto estrutural da Escola Rural Alberto Torres buscando mostrar elementos de criatividade do projetista para equilibrar a estrutura. Faz-se uma análise numérica da solução estrutural utilizando ferramentas computacionais – programa SAP

2000 v20. As análises buscam compreender os esforços aos quais a estrutura está sujeita, e verificar o protagonismo da solução estrutural, inovadora para a época, no resultado estético arquitetônico que se alinha com os preceitos do modernismo.

A Escola Rural Alberto Torres fica situada no bairro de Tejipió, em Recife-PE, foi inaugurada em 1936 e recebeu seu nome em homenagem ao governador abolicionista do Rio de Janeiro, Alberto Seixas Martins Torres, nascido em 1865 e notório modernista.

Figura 103 – Escola Rural Alberto Torres Recife (PE), projeto do Arq. Luiz Nunes, construído em 1935-36.



Fonte: Escola Alberto Torres (escolalbertotorres.wixsite.com)

Arquitetura

A Escola foi construída em 1936 para abrigar um programa de cunho social que previa a capacitação de professores que atuariam nas cidades do interior com o intuito de fixar a população no campo.

O programa arquitetônico corresponde a oito salas de aula e um conjunto de sanitários, dispostos em um bloco único de dois pavimentos, em um primeiro volume central estão as salas de aula – quatro em cada andar e, em um segundo volume, ligado ao primeiro e destacado desse lateralmente, estão os sanitários. O grande destaque formal, que compõe a fachada do edifício, está no conjunto de rampas suspensas por tirantes, que são fixados em três arcos. Todos esses elementos das rampas são construídos em concreto armado e formam um sistema estrutural independente do corpo principal do prédio.

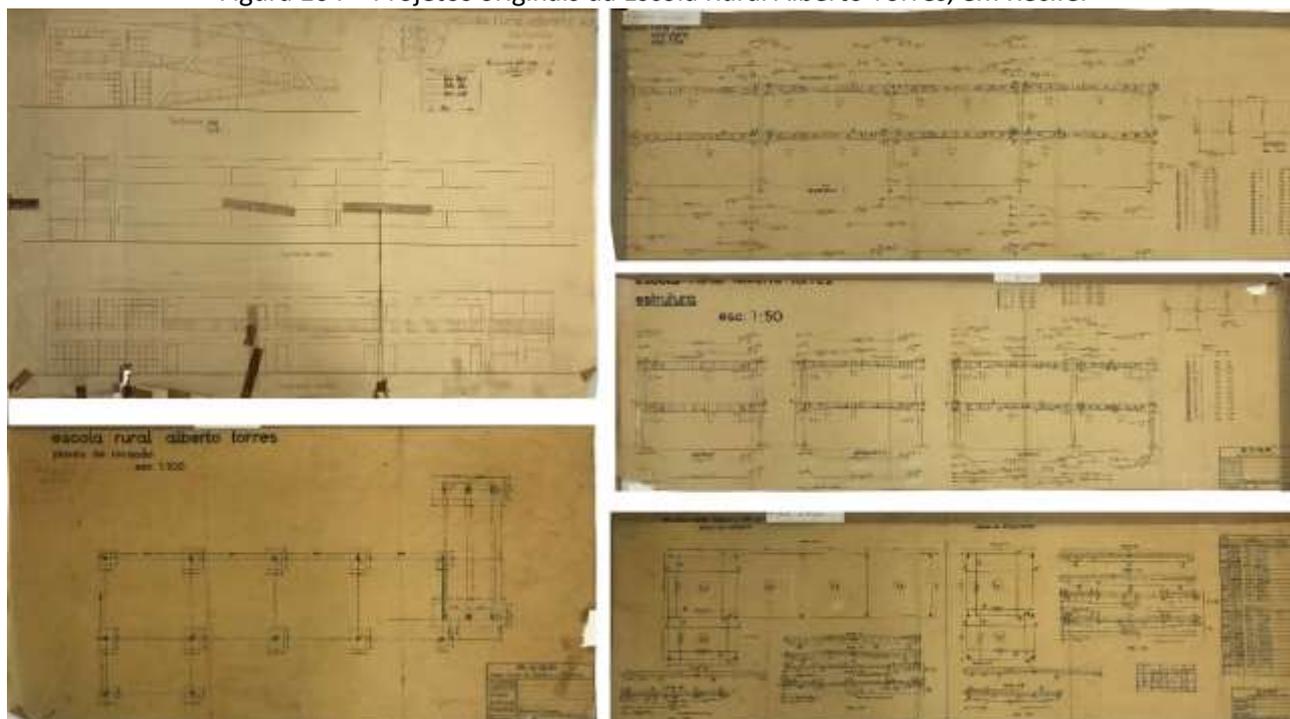
Estrutura

A estrutura da escola Rural Alberto Torres acompanha a descrição da arquitetura. No bloco principal das salas de aula, apesar da aparente simplicidade da volumetria, o projeto apresenta

soluções estruturais interessantes e inovadoras para a época. Estas soluções expressam a integração entre arquiteto em engenheiro ao conceberem os projetos, as soluções da engenharia acompanham fielmente os anseios formais da arquitetura. As vigas são arqueadas e as suas seções, próximas aos pilares, aumentam, forma estrutural adequada para suportar os esforços de maneira mais eficiente. Além disso, as lajes são recheadas com tijolos cerâmicos para diminuir o peso e baratear o custo da estrutura (MARQUES & NASLAVSKY, 2011). O elemento estrutural mais marcante está na fachada, três arcos sustentando as rampas por meio de tirantes de concreto armado.

Tomando como base os projetos originais disponíveis no acervo do Arquivo Público de Pernambuco Jordão Emerenciano (Figura 104), foi possível descrever com precisão a estrutura do edifício estudado. É interessante notar que os projetos de arquitetura e de estruturas possuem divergências entre eles – um está espelhado em relação ao outro, sendo que a posição construída é a representada no projeto de arquitetura. Esse fato não prejudicou o levantamento, já que as dimensões são idênticas.

Figura 104 – Projetos originais da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.



Fonte: Arquivo Público de Pernambuco Jordão Emerenciano, fotos de Paulo M. V. Ribeiro.

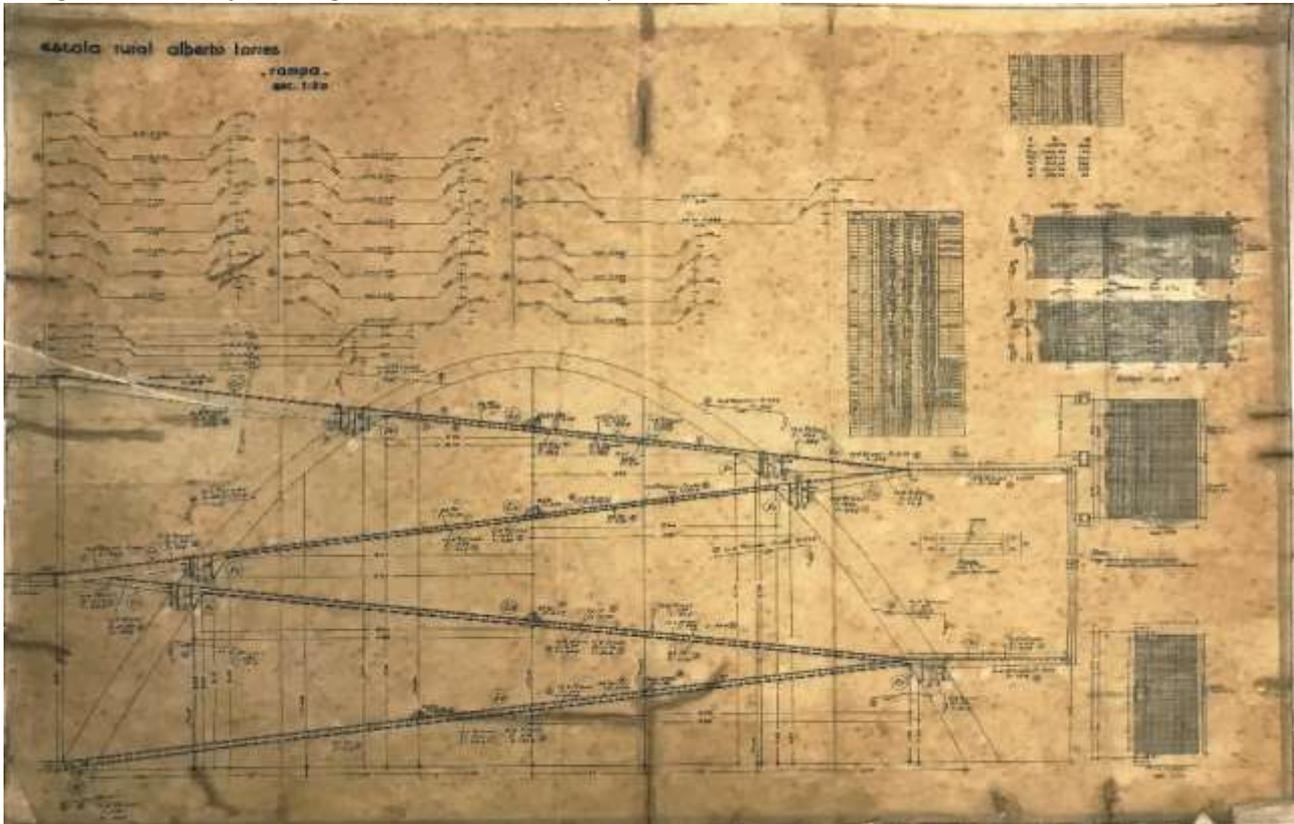
O sistema estrutural do bloco das salas é formado por quatro módulos de 8,60mx8,60m o que permite o uso racional de vigas com as mesmas dimensões nos dois sentidos. São vigas arqueadas, cuja altura da secção varia entre 43 e 64cm, com base de 30cm. As vigas menores, também arqueadas, encontradas no volume transversal que abriga os sanitários possuem vão de 5,75m e as vigas possuem a mesma secção com altura variando entre 43 e 64 cm e base de 30cm, acompanhando a arquitetura sugerida pelo desenho estrutural.

Os 12 pilares do bloco principal também possuem as mesmas dimensões entre eles e, a exemplo das vigas possuem secção variável. Na base dos pilares a secção quadrada mede 30x30cm, chegando a 38x38cm no topo do nível térreo e a 45x45cm no topo do segundo pavimento.

As lajes são nervuradas nas duas direções e, conforme mencionado, preenchidas com tijolos cerâmicos. A espessura total das lajes é de 17cm, com 5cm de capa.

O acesso ao segundo pavimento se dá por meio de rampas sustentadas em um conjunto de três arcos de concreto armado (Figura 105). Esses arcos possuem um vão de 13,30m e altura de 6,55m. As secções dos arcos são diferentes entre eles, enquanto os arcos externos às rampas têm secção que varia entre 30x50cm na base até 30x24cm no topo do arco, o arco central tem secção que varia entre 50x50cm na base até 50x24cm.

Figura 105 – Projetos originais da estrutura rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.



Fonte: Arquivo Público de Pernambuco Jordão Emerenciano, foto de Paulo M. V. Ribeiro

Os tirantes construídos são em concreto armado e possuem secção quadrada de 10x10cm, medidos no local, já que o projeto previa tirantes metálicos que não foram dimensionados nem executados.

As lajes que formam os pisos e as coberturas das rampas são divididos em 13 placas. O primeiro lance (L4) está todo contido dentro dos arcos e tem espessura de 10cm, o patamar entre o primeiro e segundo lances (C6) tem espessura que varia entre 15 e 10cm, posicionados fora do arco, em balanço de 2,13m. Já o segundo lance (L3) tem parte dele dentro dos arcos, com espessura de 10cm e um trecho fora dos arcos (C3), com espessura de 15cm e o patamar de chegada ao

segundo pavimento (C2-3) tem espessura que varia entre 15 e 10cm. Esses dois últimos trechos formam um balanço e 4,40m.

Na sequência temos a cobertura do primeiro lance, a primeira parte, fora do arco (C2) tem espessura de 18cm, seguida pela parte contida dentro do arco (L2) com 8cm de espessura e novamente um trecho fora do arco (C5), com espessura que varia entre 19 e 12cm, medida da espessura do último trecho (C4-5), que cobre o patamar entre os dois primeiros lances com um balanço de 4,15m. Por último, a sequência que forma a cobertura do segundo lance da rampa, formada por um trecho externo ao arco (C4) de espessura entre 12 e 24cm, um trecho interno ao arco (L1) de 8cm de espessura e mais um trecho externo ao arco (C1) com espessura de 28 a 17cm seguido do último plano, que tem espessura variando entre 17 e 8cm (C0-1), encerrando com um balanço de 6,78m.

Por fim, além das lajes e tirantes descritos acima, os três arcos são interligados por sete vigas (V1 a V7) posicionadas nos pontos onde as lajes encontram os arcos, contribuindo para combater os efeitos de flambagem fora do plano dos arcos e suportando os esforços gerados pelos grandes balanços das lajes.

Análise Estrutural

As dimensões dos elementos foram coletadas dos projetos originais, sistematizados e organizados na Tabela 1 para serem inserido na modelagem, utilizando no software SAP2000 v20.

Para o modelo estudado (Figura 106) foram usados elementos barras (*frames*) – para os pilares, vigas arcos e tirantes e placas (*area shells*) para as lajes de piso e coberturas, resultando em um modelo composto por 251 frames, 10.674 *area shells*, 11.430 points e um total de 42.696 *area edges*.

Seguindo as orientações da norma NBR 6120/86, (ABNT, 1980) aplicou-se carregamento acidental (LIVE – L) de 300Kgf/m² nas lajes das salas de aula e nas circulações (rampas de acesso) onde há grande circulação de pessoas. Nas coberturas optou-se por aplicar carga de 100Kgf/m². Além do peso próprio de todas as peças estruturais (DEAD – D). Para as análises numérica a seguir foram utilizadas as seguintes combinações de cargas: 1,4D + 1,4L – Estado Limite Último (ELU) e 1,0D + 1,0L – Estado Limite de Serviço (ELS).

Nas análises do sistema estrutural do edifício da Escola Rural Alberto Torres foram verificados os esforços (Normais e de Flexão) e deslocamentos de toda a edificação. Foram gerados, a partir do software SAP2000, gráficos relativos ao deslocamento aos esforços normais, e momento fletor para os elementos da estrutura do bloco de salas e aula e das rampas de acesso.

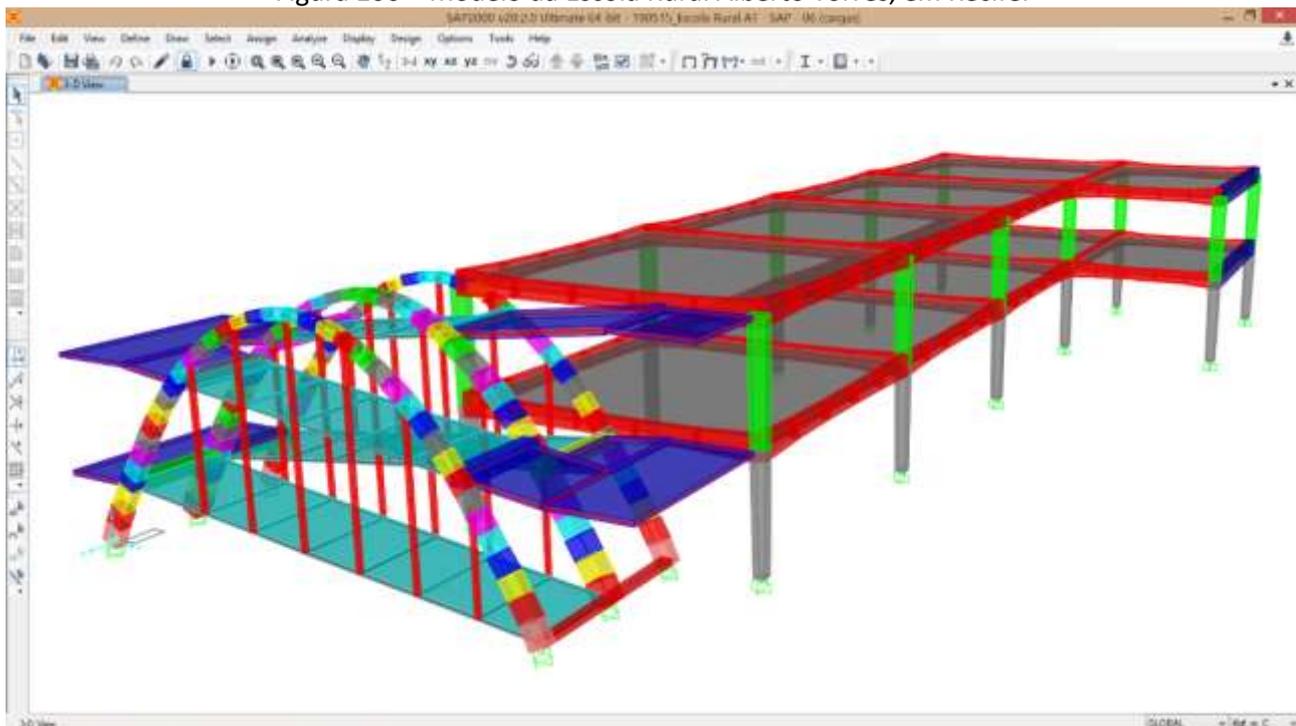
Tabela 1 - Dimensões da estrutura da Escola Rural Alberto Torres, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.

BLOCO PRINCIPAL			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
1 - Pilares Térro	0,30 a 0,38	0,30 a 0,38	
2 - Pilares 2º Pavimento	0,38 a 0,45	0,38 a 0,45	
3- Vigas Principais	0,30	0,43 a 0,64	
4- Vigas externas (Sanitários)	1,30 a 0,01	1,30 a 0,01	
5 - Lajes		0,17	
RAMPAS DE ACESSO			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
6 - Arcos externos	0,30	0,50 a 0,24	por trecho
7 - Arco interno	0,50	0,50 a 0,24	por trecho
8 - Tirantes	0,10	0,10	
9- Lajes Rampa			
9.1 - Primeiro Lance (L4)		0,100	
9.2 - Primeiro Patamar (C6)		0,15 a 0,10	
9.3 - Segundo Lance - trecho interno (L3)		0,10	
9.4 - Segundo Lance - trecho externo (C3)		0,15	
9.5 - Patamar de chegada ao 2º Pavimento (C2-3)		0,15 a 0,10	
9.6 - Cobertura do primeiro lance trecho externo (C2)		0,18	
9.7 - Cobertura do primeiro lance trecho interno (L2)		0,08	
9.8 - Cobertura do primeiro lance trecho externo (C5)		0,19 a 0,12	
9.9 - Cobertura do primeiro patamar (C4-5)		0,12	
9.10 - Cobertura do segundo lance trecho externo (C4)		0,12 a 0,24	
9.11 - Cobertura do segundo lance trecho interno (L1)		0,08	
9.12 - Cobertura do segundo lance trecho externo (C1)		0,28 a 0,17	
9.13 - Cobertura do segundo patamar (C0-1)		0,17 a 0,08	
10 - Viga - entre os arcos (V1)	0,15	0,30	
11 - Viga - entre os arcos (V2)	0,30	0,45	
12 - Viga - entre os arcos (V3)	0,40	0,44	
13 - Viga - entre os arcos (V4)	0,34	0,46	
14 - Viga - entre os arcos (V5)	0,41	0,43	
15 - Viga - entre os arcos (V6)	0,34	0,44	
16 - Viga - entre os arcos (V7)	0,35	0,48	

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

Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 106 – Modelo da Escola Rural Alberto Torres, em Recife.



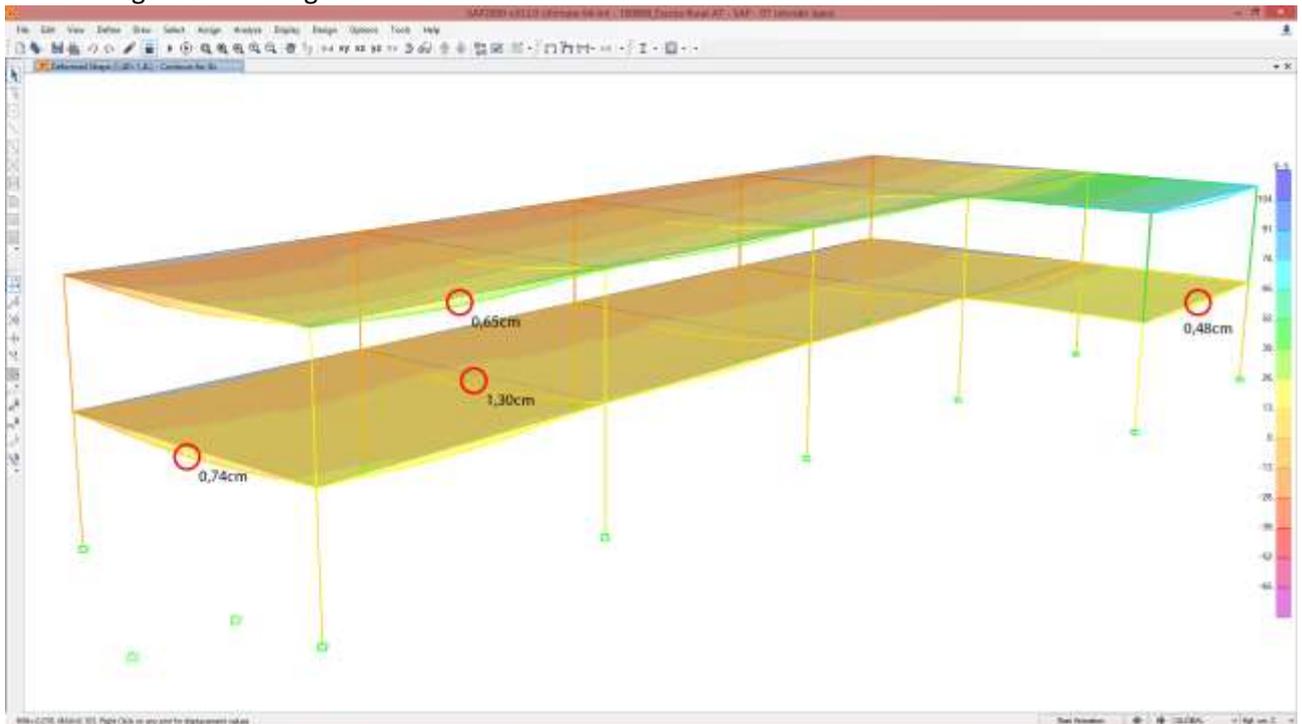
Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000.

- **Bloco de Salas de Aula**

O diagrama da Figura 107 mostra o deslocamento da estrutura do bloco das salas de aula da Escola Rural Alberto Torres. Notamos que os deslocamentos encontrados nas vigas estão dentro dos limites admissíveis da norma ABNT NBR 6118/2003 (Equação (1)) (ABNT, 2004). Vale ressaltar o fato da norma ter sido editada décadas depois da construção do edifício em questão.

$$F_{adm.} = \frac{l}{250} = \frac{8,6m}{250} = 0,0344m \text{ ou } 3,44cm \quad (1)$$

Figura 107 – Diagrama de deslocamentos do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.

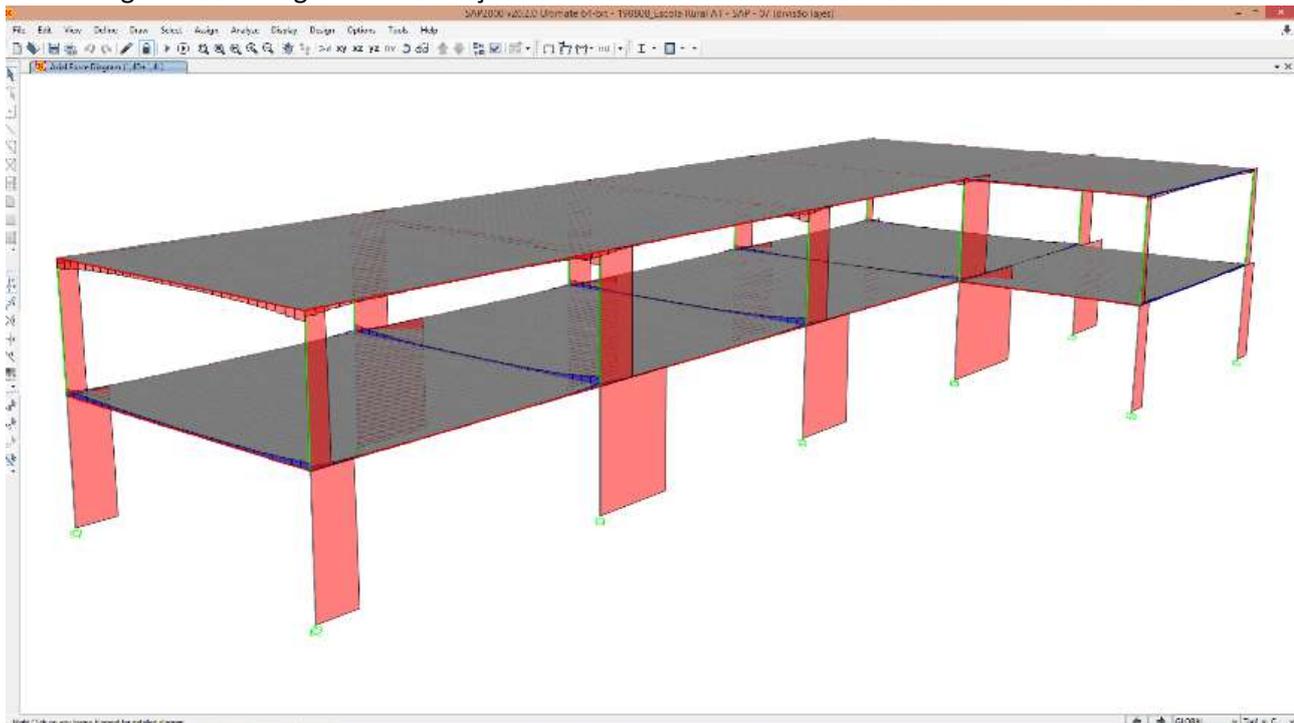


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

O deslocamento – flecha imediata – encontrado na viga do piso segundo pavimento, entre duas salas de aula – a viga com maior flecha do projeto, é de -1,30 cm – mostrada em detalhe mais adiante na Figura 110. Já na viga de borda do volume de sanitários – dentre as duas únicas vigas não arqueadas do projeto – a flecha é de -0,48cm. Os valores da flecha diferenciada não foram considerados nesse estudo.

A Figura 108 mostra as cargas nos pilares do bloco de salas. Podemos observar que cargas atuantes no pilar situado no canto entre o volume das salas e o volume dos sanitários, no pavimento térreo somam 129,48Tf. Como visto na Tabela 1, a menor área de seção dos pilares (30x30cm na base do térreo) é de 0,09m², sendo assim a tensão nesse ponto é de 14,38Mpa, abaixo da tensão admissível pelas normas atuais.

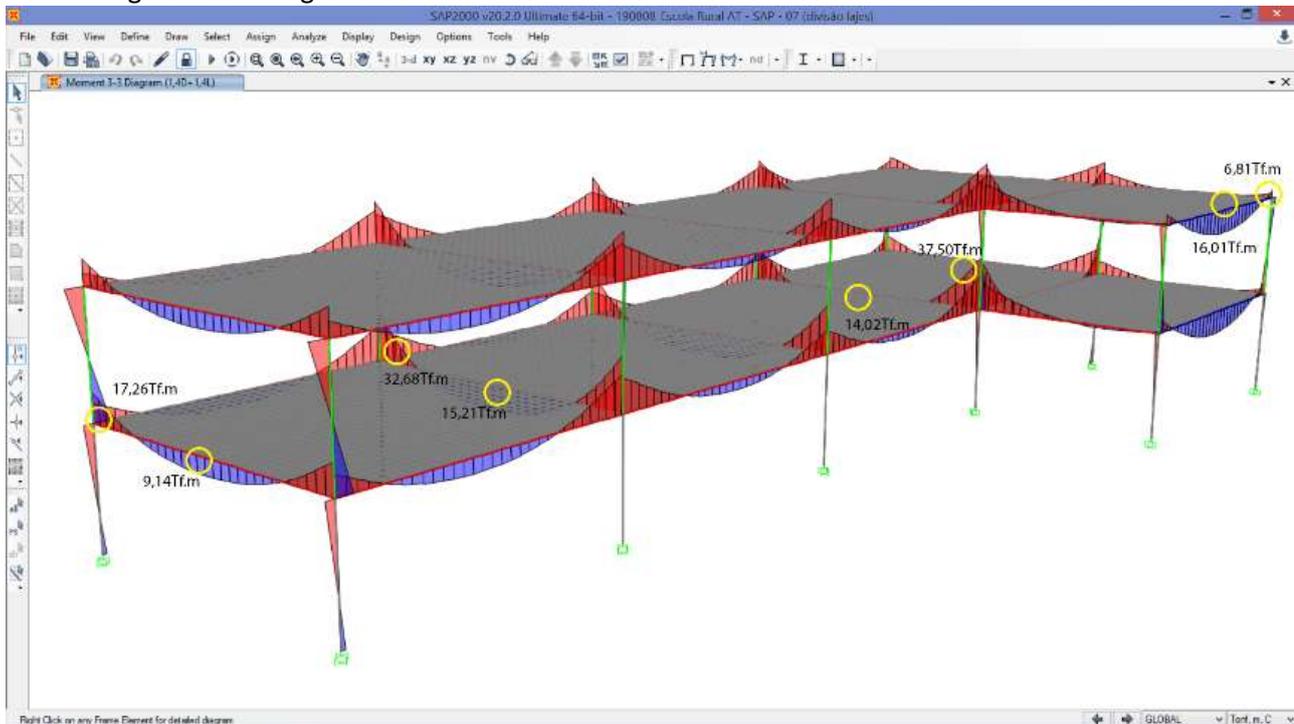
Figura 108 – Diagrama de esforços normais do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Já no gráfico de momentos fletores (Figura 109) vemos que a forma arqueada das vigas – aumentando a altura da secção próxima ao apoio nos pilares contribui para combater esses esforços nos pontos mais críticos, nesses pontos os momentos são de 371,67KN.m (ou 37,90 Tf.m), na viga entre as salas 3 e 4, ao fundo do bloco.

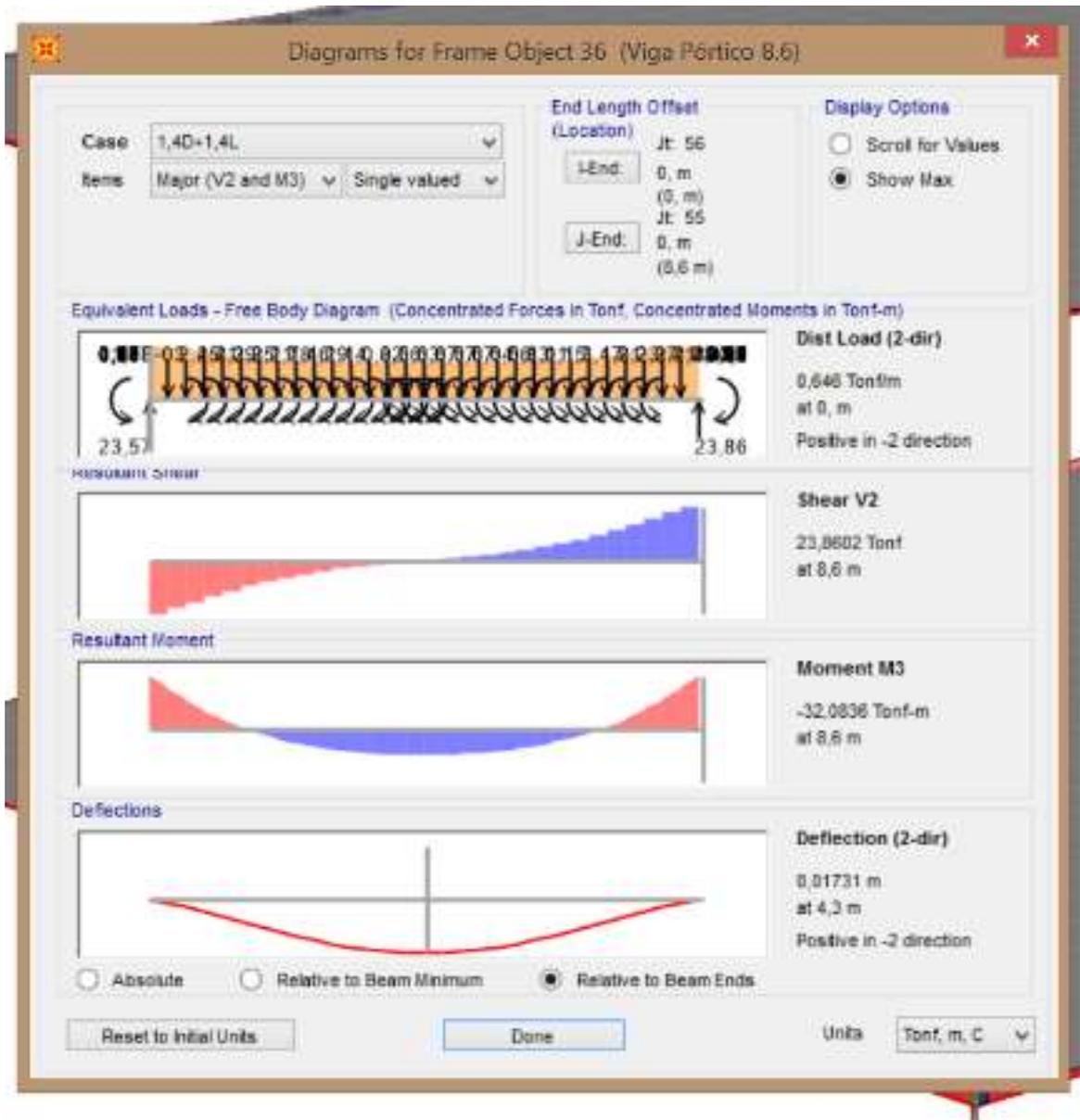
Figura 109 – Diagrama de momento fletor do bloco de salas da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Abaixo, na Figura 110 temos, em detalhe os gráficos de esforço cortante, momento fletor e deslocamentos para a viga posicionada entre as salas de aula 1 e 2, exemplo típico de viga desse projeto.

Figura 110 – Diagramas de esforços cortantes, momento fletor e deslocamento da viga entre salas 1 e 2 da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

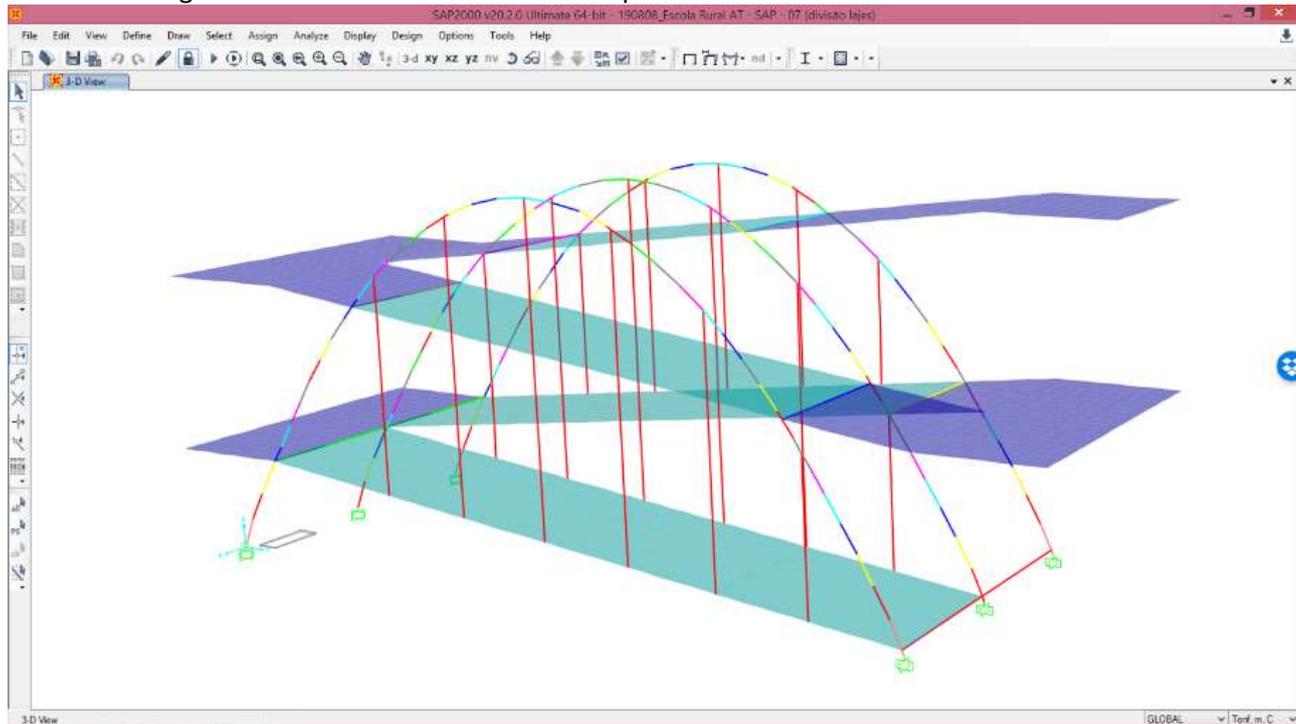
- **Rampas de Acesso**

As rampas de acesso para o segundo pavimento do bloco de salas têm um sistema estrutural independente do bloco principal. Apesar de estarem fazendo uma ao outro, os dois conjuntos funcionam estruturalmente independentes entre si. É interessante destacar esse fato, já que visualmente a cobertura da rampa, que apresenta um balanço de 6,78m, poderia estar apoiado no prédio principal. Porém, preservando o conceito inovador e arrojado do projeto estrutural e seu

caráter experimental para a época, Joaquim Cardozo optou por deixar a estrutura monumental da rampa isolada.

A Figura 111 mostra o modelo da estrutura da rampa no programa SAP2000 v20. Para os elementos que formam os arcos foram utilizados segmentos de barras (*frames*) de secções variáveis, conforme projeto estrutural. Os tirantes também são modelados utilizando frames. Já as lajes são elementos tipo *area shell*.

Figura 111 – Modelo estrutural da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.

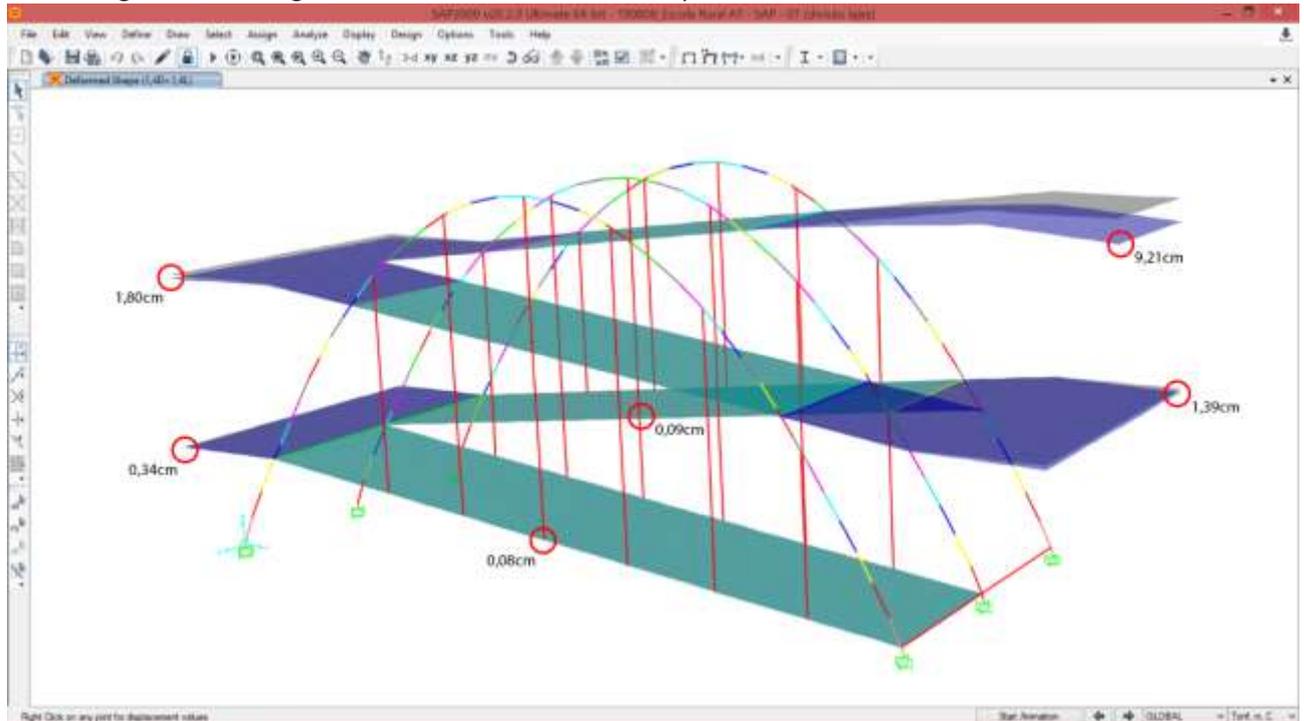


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

No diagrama de deslocamentos (Figura 112) é fácil notar o grande deslocamento da cobertura do último patamar da rampa – na chegada ao segundo pavimento – -9,21cm. Esse deslocamento excessivo não seria admitido pelas normas atuais e revela o caráter inovador e experimental citado anteriormente, haja vista que na época da construção do edifício (1935) a primeira norma brasileira de concreto – NB1 – ainda estava sendo preparada. A laje nesse trecho da estrutura tem espessura de apenas 8cm na extremidade final, criando um efeito de leveza que merece destaque. O diagrama também mostra que os deslocamentos nos trechos contidos dentro dos arcos, sustentados não só por esses, mas também pelos tirantes de concreto, apresentam deslocamentos inexpressivos, da ordem de -0,13 cm.

É importante observar também que, como a cobertura acompanha a inclinação da rampa, ao atravessar o limite dos arcos, o desenho na prática funciona como uma “contra-flecha”, ou seja, diminui a expectativa do observador na percepção da flecha, no conjunto da estrutura.

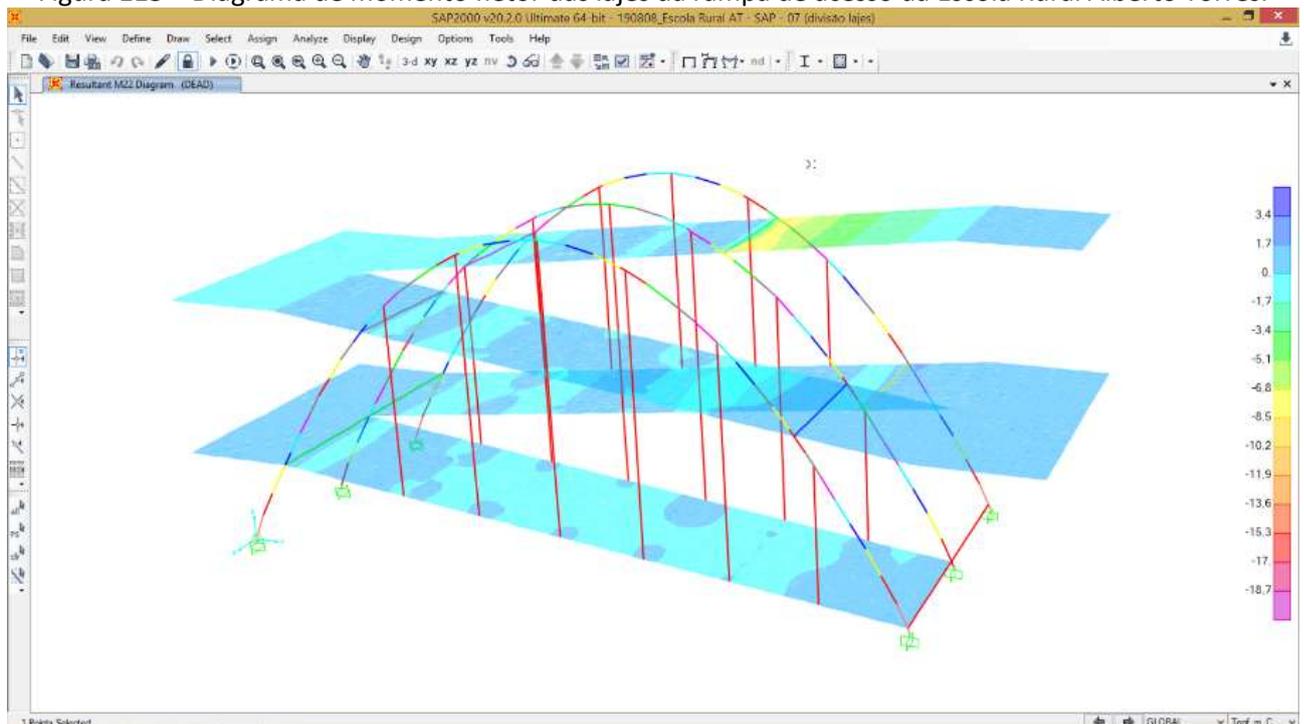
Figura 112 – Diagrama de deslocamentos da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

O diagrama de momento fletor nas lajes que formam as rampas de acesso (Figura 113) mostram que os esforços de momento negativo estão concentrados no ponto de apoio do último balanço, chegando a $-116,7\text{KN.m}$ ($-11,9Tf.m$). Além disso notamos que o momento fletor nos demais trechos apresentam valores bem menores, entre $-16,67\text{KN.m}$ e $16,67\text{KN.m}$ –, $-1,7Tf.m$ e $1,7Tf.m$ respectivamente.

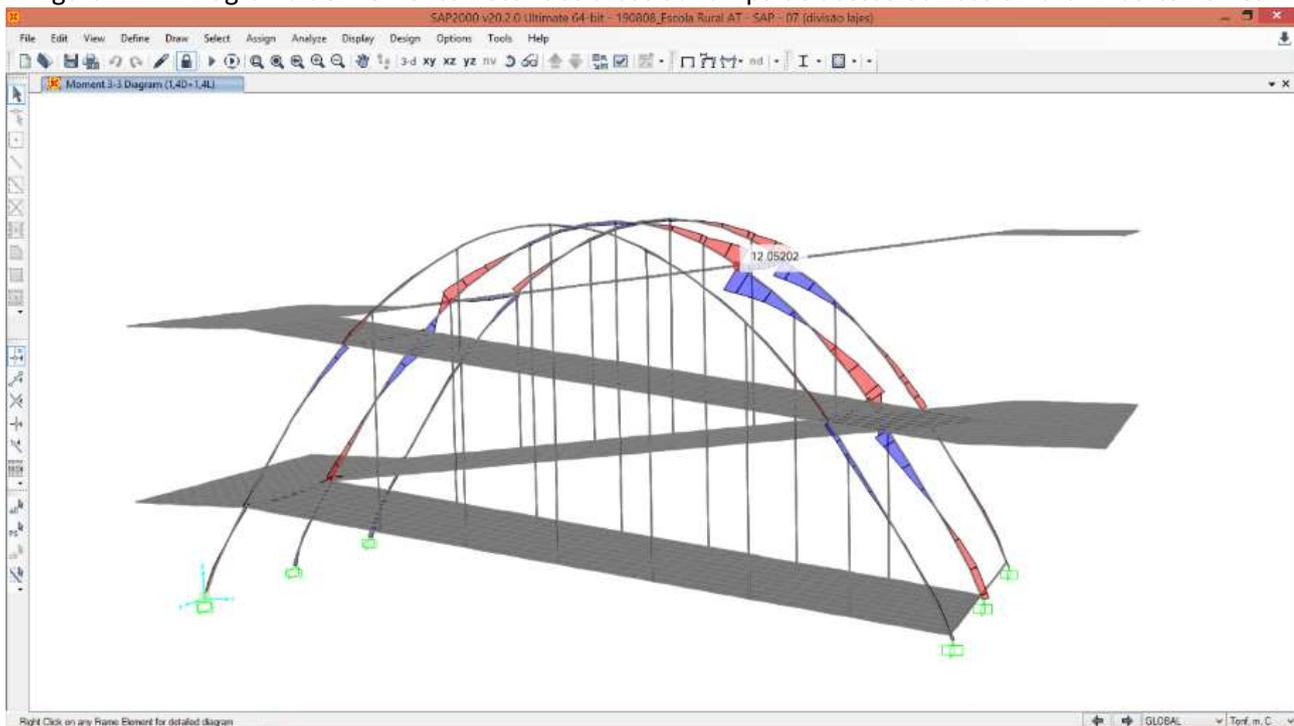
Figura 113 – Diagrama de momento fletor das lajes da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

O funcionamento funicular de um arco define que este, em pleno equilíbrio, deve sofrer apenas esforços de compressão simples, que são descarregadas nas fundações (REBELLO, 2000). O diagrama de momento fletor dos arcos da rampa de acesso (Figura 114) nos mostra que esse equilíbrio sofre distúrbios em alguns pontos, principalmente onde se apoiam os balanços, chegando a apresentar um momento de 118,17KN.m, ou 12.05Tf.m, no ponto de apoio do maior balanço (cobertura do patamar de chegada) no arco central. As demais cargas apoiadas nos arcos, inclusive as dos tirantes e balanços menores, não provocam variações muito grandes de momento fletor.

Figura 114 – Diagrama de momento fletor dos arcos da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.

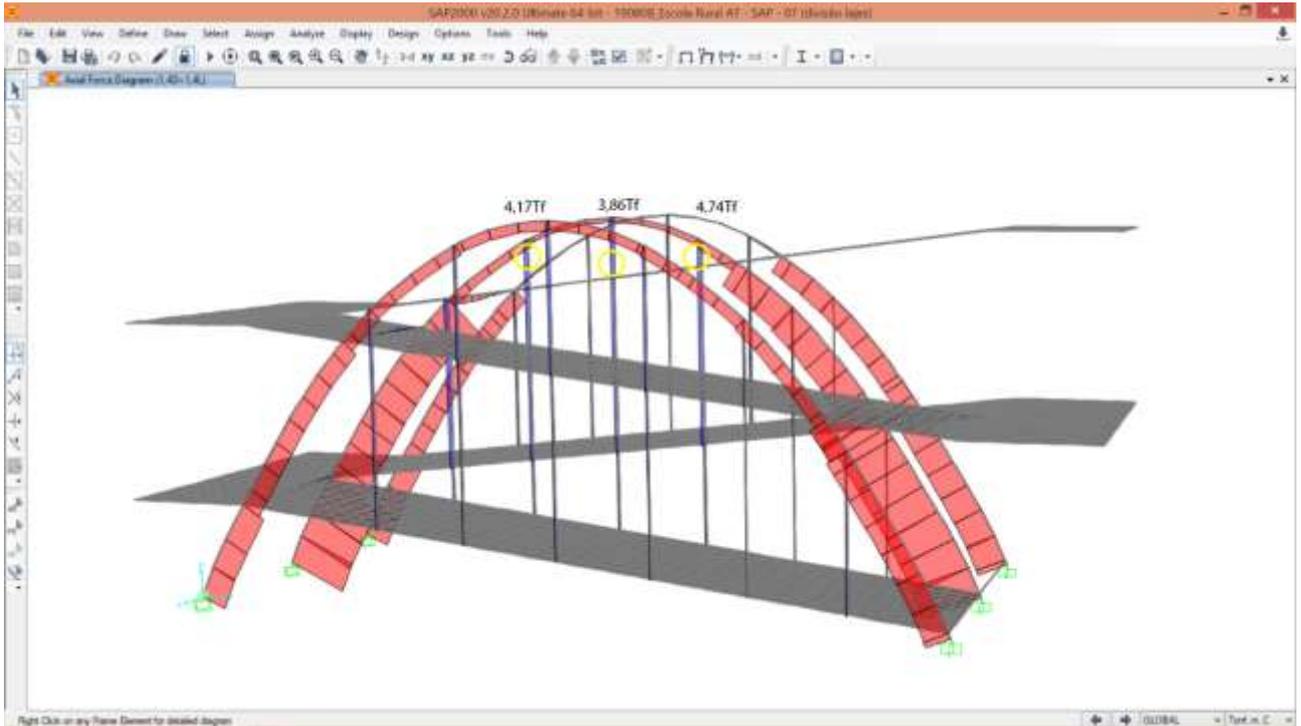


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Analisando os gráficos de esforços normais nos arcos e tirantes (Figura 115) notamos os esforços de compressão nos arcos (em vermelho) e de tração nos tirantes (em azul). Podemos perceber também que os valores dos esforços de tração aos quais os tirantes estão submetidos são maiores nos tirantes do arco central e são relativamente baixos – 3,86 Tf no tirante central e 4,17Tf e 4,74Tf nos dois tirantes que chegam até a parte mais alta do arco.

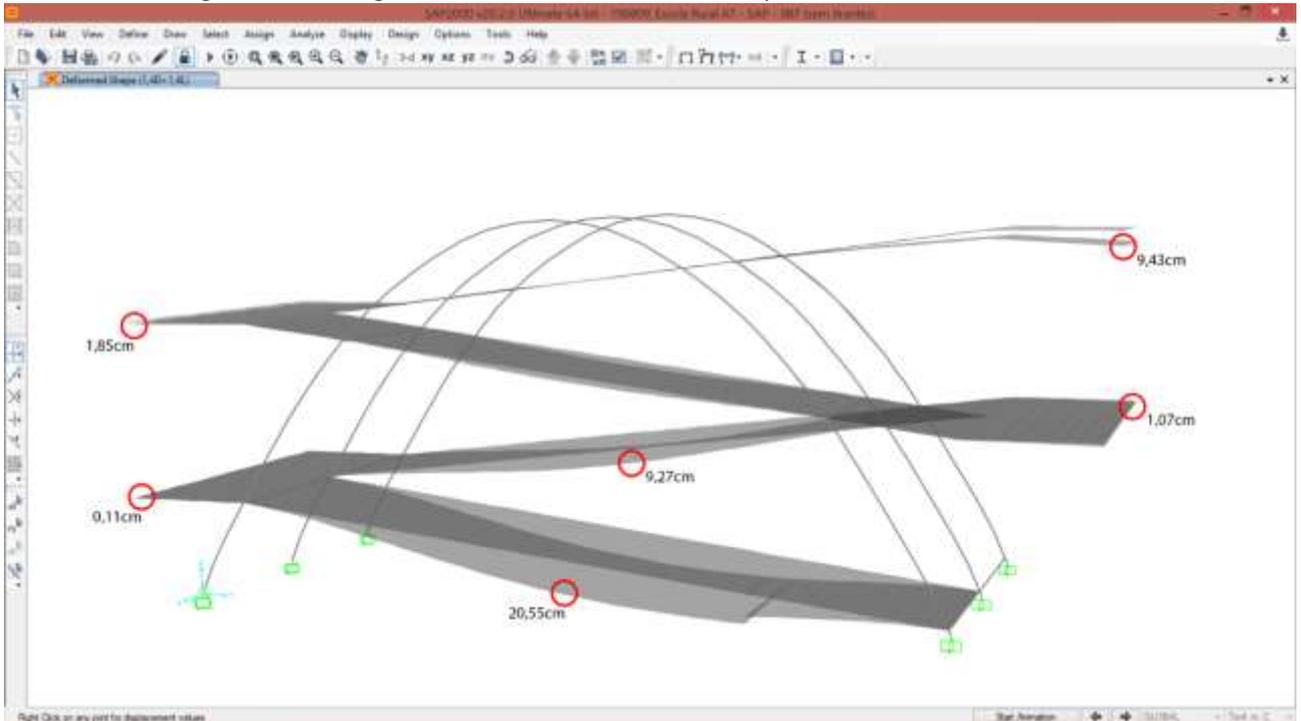
As análises podem sugerir que os tirantes utilizados nesse sistema têm pouca importância estrutural, podendo ter sido projetados mais como uma opção estética do que tecnicamente necessária. Assim nas Figura 116 aFigura 119 são mostrados respectivamente os diagramas de deslocamento, momento fletor nas lajes, momento fletor nos arcos e esforços normais nos arcos para uma simulação da mesma estrutura sem os tirantes.

Figura 115 – Diagrama de esforços normais nos arcos e tirantes da rampa de acesso da Escola Rural Alberto Torres.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Figura 116 – Diagrama de deslocamentos da rampa de acesso, sem os tirantes.

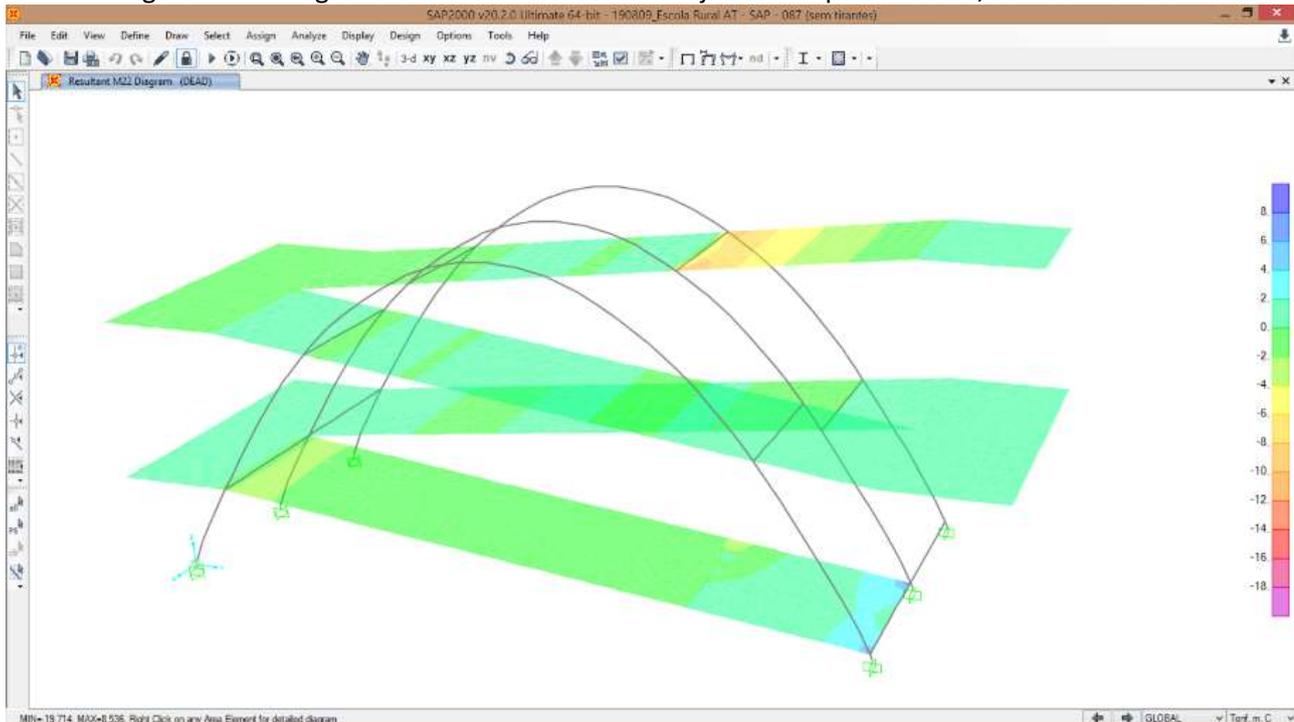


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Os deslocamentos nos pontos em balanço nessa simulação possuem valores muito próximos aos encontrados na versão original do sistema estrutural na maior parte da estrutura, porém, nos vãos internos aos arcos, mais especificamente nos trechos de piso do primeiro e segundo lance da rampa, os deslocamentos são excessivos, chegando a 20,55cm.

O gráfico de momento fletor (Figura 117) mostra que os momentos fletores nas lajes não sofrem grandes mudanças com a retirada dos tirantes. No início do primeiro lance de rampa podemos observar momentos positivos da faixa de 39,23KN.m (4Tf.m). O momento fletor no ponto de apoio do último balanço permaneceu com a mesma ordem de grandeza, porém um pouco menor – 99,14KN.m (10,11Tf.m). E nos demais trechos variando entre -19,61 e 19,61KN.m (-2,00 e 2,00Tf.m).

Figura 117 – Diagrama de momento fletor das lajes da rampa de acesso, sem os tirantes.



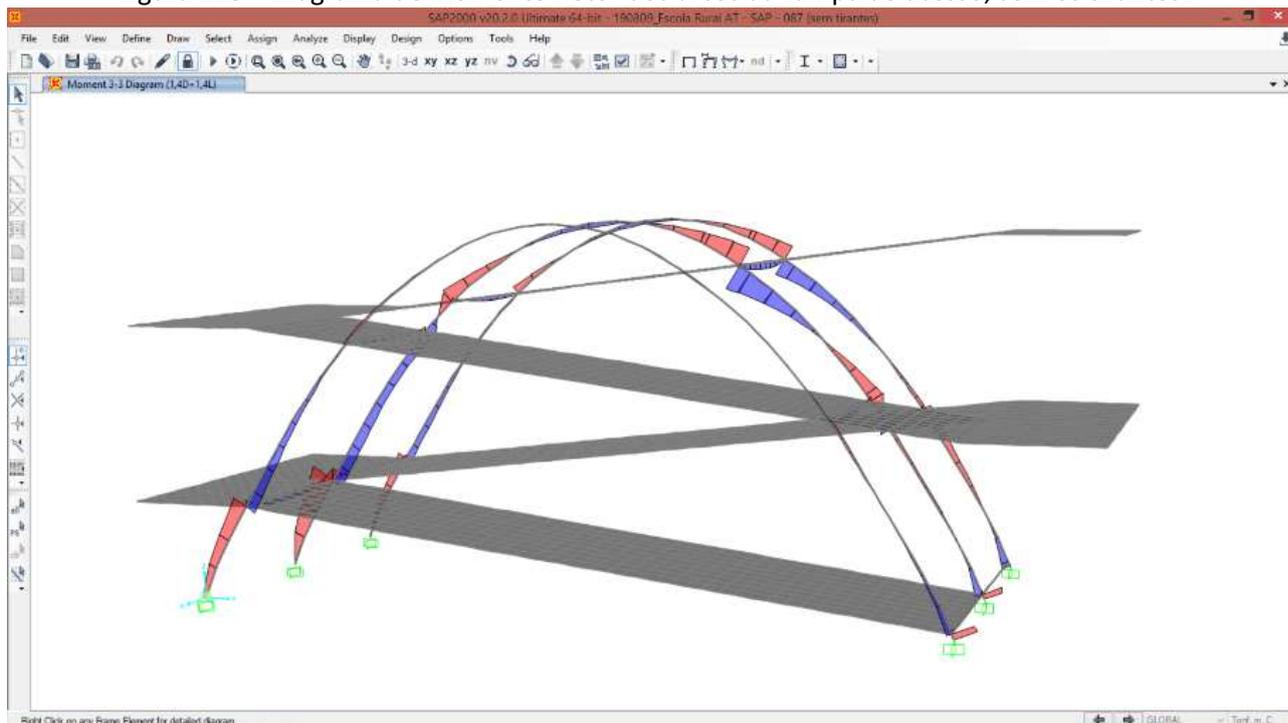
Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

O momento fletor nos arcos para a opção sem tirantes (Figura 118) também apresenta pouca variação, há, porém, um aumento do momento fletor próximo ao primeiro patamar.

E por fim, vemos no gráfico de esforços normais a aparição de esforços de tração na parte superior dos arcos (Figura 119). Esses esforços não são ideais para o sistema de arcos, ainda mais sendo estes de concreto.

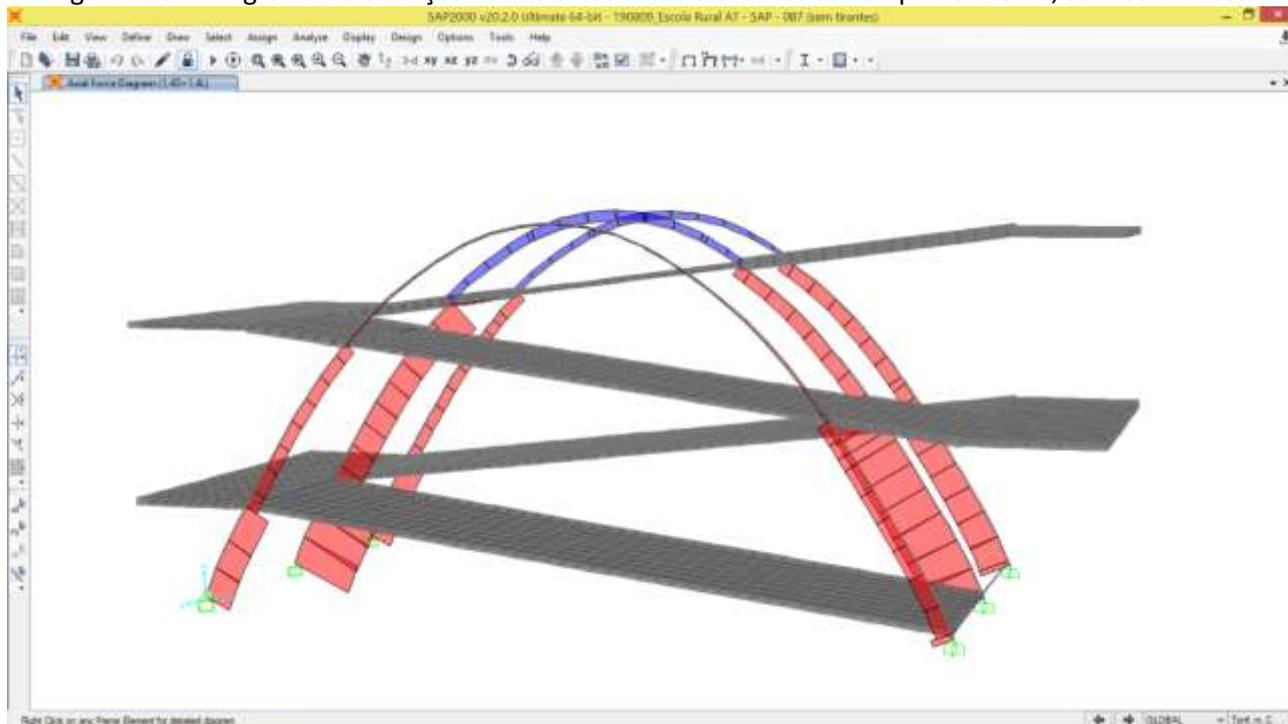
Notamos que, apesar da aparência, a presença dos tirantes não é apenas um recurso estético. Os tirantes são importantes estruturalmente para distribuir as cargas das rampas pelos arcos respeitando o funicular das cargas e sustentando os dois primeiros lances da rampa, permitindo a espessura de apenas 10cm, que traz a leveza às lajes da rampa, buscada pelo arquiteto.

Figura 118 – Diagrama de momento fletor dos arcos da rampa de acesso, sem os tirantes.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Figura 119 – Diagrama de esforços normais nos arcos e tirantes da rampa de acesso, sem os tirantes.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000

Obra que marca esse momento, a Escola Rural Alberto Torres em Recife mostra as diversas experiências formais, incorporando características modernistas e estruturais. O uso do arco parabólico para sustentar, através de tirantes de concreto, uma rampa com lajes muito finas mostra soluções pioneiras, explorando de forma inédita o potencial do material – concreto armado. Através

das análises computacionais foi possível identificar essas soluções e sua relação com a arquitetura pretendida pelo arquiteto.

As obras de Luiz Nunes e Joaquim Cardozo em Recife, por meio da D.A.U. são grandes exemplos da integração entre a arquitetura e o sistema estrutural, trazendo grandes avanços para a arquitetura moderna brasileira em poucos anos de muita produção. O projeto da Escola Rural Alberto Torres em Recife é inovador para a época – 1935 – e apresenta diversas experiências tanto do ponto de vista formal, incorporando características do modernismo europeu quanto estruturais, com soluções que se adequam à realidade regional.

4.2 2º Momento: Pampulha

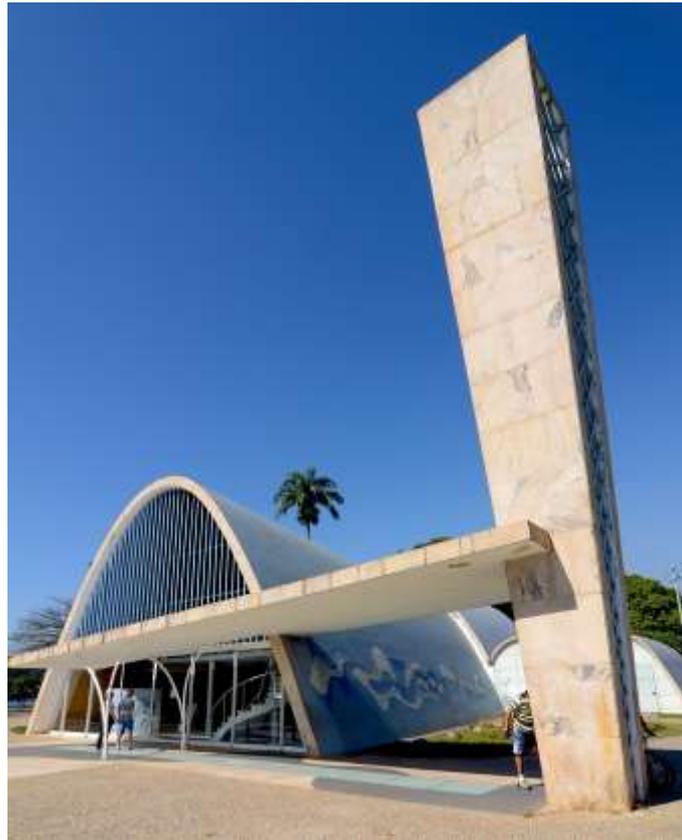
4.2.1 Igreja S. Francisco de Assis (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)

A construção do conjunto de edifícios da Pampulha marca o primeiro encontro entre o arquiteto Oscar Niemeyer e o engenheiro Joaquim Cardozo. Essa relação que duraria por muitos anos chega a sua consagração e tem seu reconhecimento registrado na construção de Brasília. Mas foi já nas obras em torno da Lagoa da Pampulha que a sintonia entre arquiteto e engenheiro começaram a ter como resultado projetos inovadores, formal e tecnicamente.

A Igreja São Francisco de Assis (Figura 120), projetada em 1943 e finalizada em 1945, é o edifício mais conhecido entre os que compõe o Conjunto da Pampulha, formado pelo Cassino, a Casa de Baile e o late Clube. O projeto da Igreja se destaca pela forma característica proporcionada pela abóboda parabólica que forma a nave principal, ladeada por mais quatro abóbodas menores que abrigam o restante do programa arquitetônico.

Esse estudo de caso apresenta a descrição dos projetos de arquitetura e de estrutura da Igreja, obtidos através de pesquisas bibliográficas e do material disponível no IPHAN-MG e traz uma análise do seu sistema estrutural utilizando o software SAP 2000, apresentados originalmente na dissertação de mestrado de Nathalia Coelho Pereira, apresentada à Universidade de Brasília em 2012.

Figura 120 – Igreja São Francisco de Assis, Pampulha, Belo Horizonte - MG, projeto do Arq. Oscar Niemeyer, construído em 1943.



Fonte: Foto de Prandrade (commons.wikimedia.org/wiki/File:Igrejinha_de_São_Francisco_de_Assis_6.jpeg)

Arquitetura

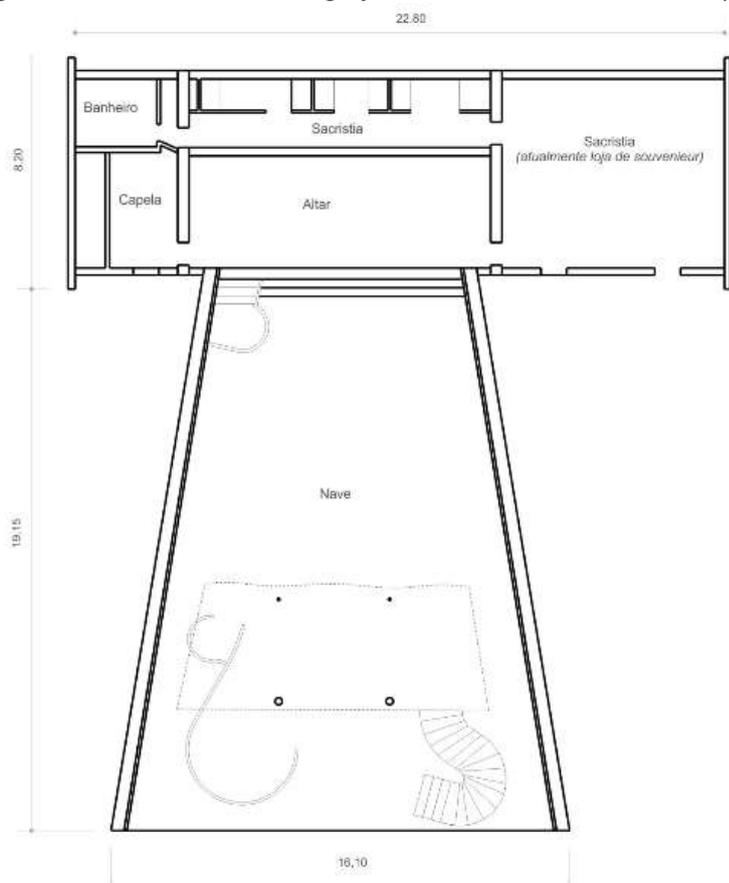
O programa arquitetônico da Igreja São Francisco de Assis é distribuído sob cinco abóbodas de concreto armado. A nave principal, abrigada sob a abóboda parabólica, de maior dimensão, tem a planta trapezoidal com 19 metros de comprimento e varia de 8,8 a 16 metros de largura e é revestida externamente com pastilhas em tons de azul que formam um mosaico criado por Cândido Portinari. No interior a abóboda principal é revestida por um forro de madeira. Nesse espaço está localizado o coro, em um mezanino sobre a nave principal pelo qual se tem acesso por uma escada helicoidal em concreto.

Um segundo volume, formado por quatro abóbodas menores tem 7,8 por 24,1 metros em planta e abriga, na casca que se sobressai às outras três, o altar, à esquerda desta, o banheiro e uma capela e à direita a sacristia que hoje divide o espaço com uma loja de lembranças (Figura 121). As duas extremidades das abóbodas menores chegam até o chão, situação conveniente estruturalmente e que dá harmonia na relação destas com a abóboda principal, que também se apoia no chão.

A fachada da nave principal é fechada com painéis de vidro e lâminas de alumínio, enquanto que a fachada dos fundos, recebeu um painel de azulejos pintados por Cândido Portinari.

Além do volume principal da Igreja, formado pelo conjunto de abóbodas, a entrada é marcada por uma marquise retangular de concreto, apoiada de um lado por esbeltos pilares metálicos em “Y” e na própria casca principal e inclinando-se até encontrar apoio no campanário. O campanário é outro elemento marcante na composição, com 14,6 metros de altura com duas faces opacas contrastando com a fachada transparente da Igreja e duas translúcidas, formadas por treliças de ferro. O campanário possui seção quadrada na base com 1,20 metro de lado, menor que no topo, com 2,35 metros, formando um tronco de pirâmide invertido, criando um marco na entrada da igreja (Figura 122).

Figura 121 – Planta baixa da Igreja São Francisco de Assis, Pampulha.



Fonte: Desenhado de Nathalia Coelho Pereira, no software AutoCad (PEREIRA, 2012).

Estrutura

A estrutura da Igreja São Francisco de Assis é formada por cinco elementos principais. Uma casca de concreto armado forma a cobertura da nave principal em forma de abóboda parabólica, apoiada sobre uma laje radier. Essa casca possui espessura de 33cm, altura variável entre aproximadamente 8,5 e 15,5 metros ao longo de 19,9 metros de comprimento. Essa variação na altura se dá pela diminuição constante de seção dos arcos que compõem a cúpula maior da capela.

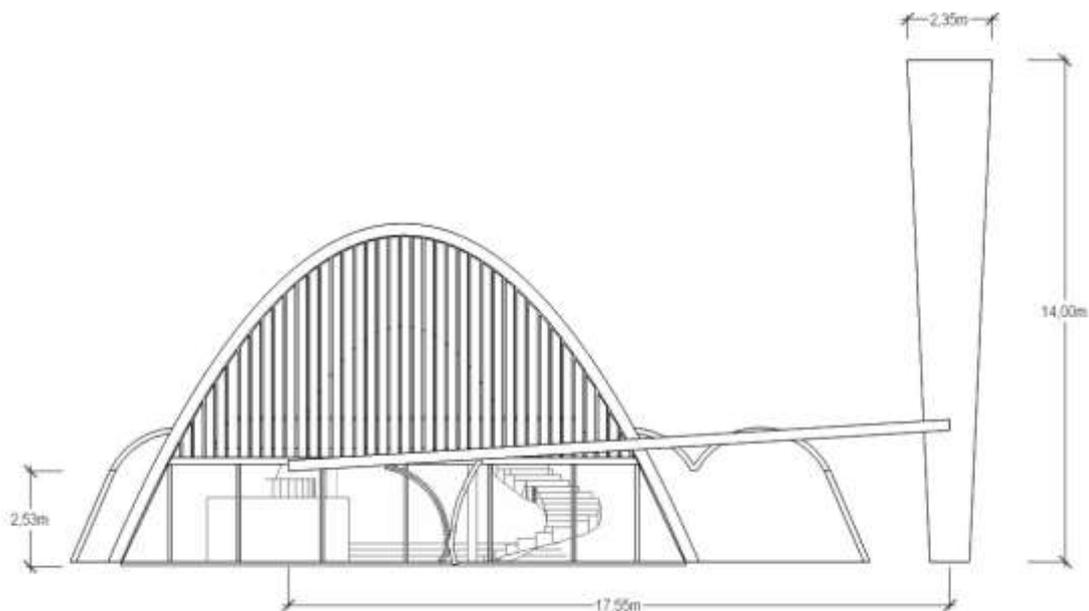
O segundo elemento pode ser descrito como uma outra casca de concreto que forma um conjunto de três arcos e uma parábola, esta com altura constante e 7,2 metros. As dimensões dessa casca se contrasta com os três arcos laterais.

No interior da igreja, o mezanino que abriga o coro é uma laje 3 metros de largura por 13,6 metros de comprimento (na linha média). Essa laje tem 35cm de espessura e encosta em suas extremidades na casca da abóboda e se apoia também sobre um par de pilares, formando 3 vãos, um central de 5 metros e dois laterais de 4,2 metros (VASCONCELLOS, 2004).

Externamente a marquise de entrada forma o quarto elemento, medindo 17,55 metros de comprimento e largura variável, possui laje com espessura de 5 centímetros e três vigas de seções que variam entre 20x25 centímetros e 70x25 centímetros. Aparentando visualmente uma espessura contínua de 25 centímetros.

O último elemento dessa composição estrutural é a torre do campanário, com 14,6 metros de altura é formada por um pórtico de concreto armado com duas placas verticais de 36 centímetros de espessura e de largura variável entre 1,20 e 2,35 metros e duas vigas horizontais travando o pórtico na parte superior de seções de 36 por 36 centímetros.

Figura 122 – Vista Frontal da Igreja São Francisco de Assis, Pampulha.



Fonte: Desenhado de Nathalia Coelho Pereira, no software SketchUp (PEREIRA, 2012).

Análise Estrutural

A análise estrutural da Igreja São Francisco de Assis foi feita a través da modelagem do sistema estrutural no software SAP 2000 de PEREIRA (2012). Para essa modelagem foram utilizados dados coletados por PEREIRA (2012) a partir de cópias de desenhos encontrados no IPHAN-MG (Figura 123) complementados por dados levantados na bibliografia a respeito da construção da igreja, já que os arquivos do IPHAN não traziam todas as informações acerca do projeto estrutural, além de medições no local (PEREIRA, 2012). Esta modelagem levou em consideração a forma como a estrutura foi construída em 1945, não incluindo portanto as alterações das reformas que

adicionaram, por exemplo, juntas de dilatação na casca da nave principal, que já haviam sido previstas por Joaquim Cardozo nos estudo iniciais para a estrutura.

Figura 123 – Cópias de parte do material levantado junto ao IPHAN-MG.



Fonte: Foto de Nathalia Coelho Pereira (PEREIRA, 2012).

As dimensões dos elementos estruturais da edificação foram organizadas e sistematizadas conforme mostrado na Tabela 2. O modelo mostrado na Figura 124 foi executado no programa SAP 2000 respeitando os dados da tabela.

As análises desse estudo de caso levaram em consideração as cargas referentes ao Peso Próprio (DEAD-D) e Cargas Acidentais (LIVE-L) e Vento (V). Para a casca de cobertura foi considerada sobrecarga de 200 Kgf/m² na direção da gravidade e para o vento, foi considerada a carga de 90kgf/m² na direção horizontal na face lateral da estrutura. As análises levaram em consideração as combinações $1,4D + 1,4L + 0,84V$ – Estado Limite Último (ELU) e $1,0G + 1,0Q + 1,0V$ – Estado Limite de Serviço.

As análises do sistema estrutural da Igreja da Pampulha foram divididas entre o corpo principal, o campanário e o conjunto de arcos e abóboda do altar e sacristia. Assim, a partir de gráficos gerados pelo programa SAP 2000, foram verificados os esforços normais e deslocamentos

da edificação de modo a identificar a função dos elementos estruturais que formam a arquitetura da Igreja.

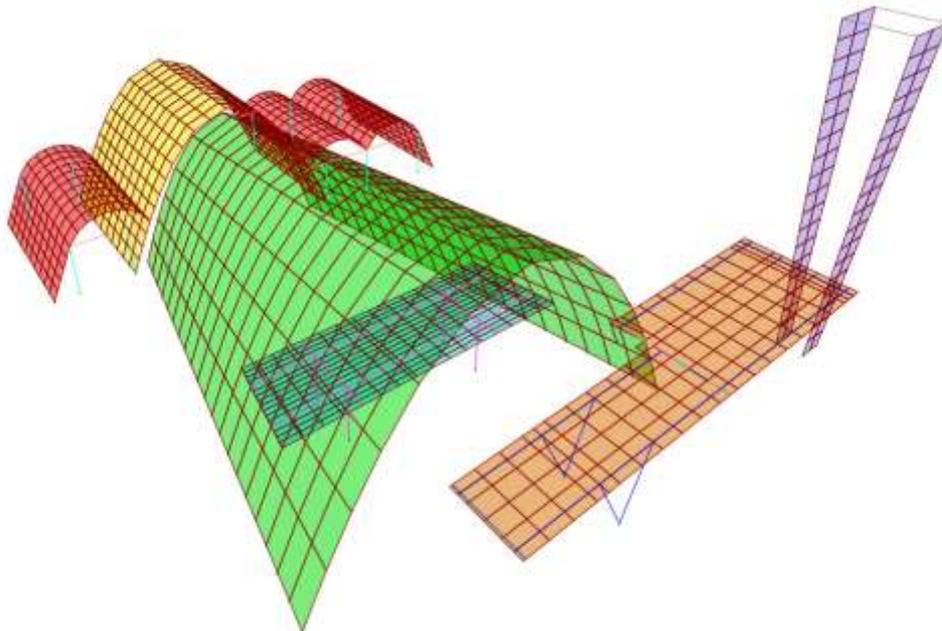
Tabela 2 - Dimensões da estrutura da São Francisco de Assim, Pampulha, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.

Elemento	A (m)	B (m)	Cor
1. Abóboda Principal	0,33	-	Verde
2. Abóboda Altar	0,20	-	Amarelo
3. Arcos	0,15	-	Vermelho
4. Pilares da sacristia (sustentam os arcos)	0,20	0,30	Azul
5. Vigas Sacristia	0,20	0,40	Azul
6. Mezanino	0,35	-	Azul Claro
6.1 Vigas do Mezanino	0,35	0,35	Magenta
7. Pilares do Mezanino 1	D= 0,28	-	Magenta
8. Pilares do Mezanino 2	D=0,08	-	Magenta
9. Marquise	0,05	-	Laranja
9.1 Viga 1 Marquise	0,70	0,25	Azul
9.1 Viga 2 Marquise	0,20	0,25	Azul
9.1 Viga 3 Marquise	varia	0,25	Azul
10. Pilares Marquise	D=0,064	-	Azul
11. Campanário (placas)	0,36	-	Cinza
12. Vigas Campanário	0,36	0,36	Verde

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

Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2012.

Figura 124 – Modelo da estrutura da Igreja São Francisco de Assis.



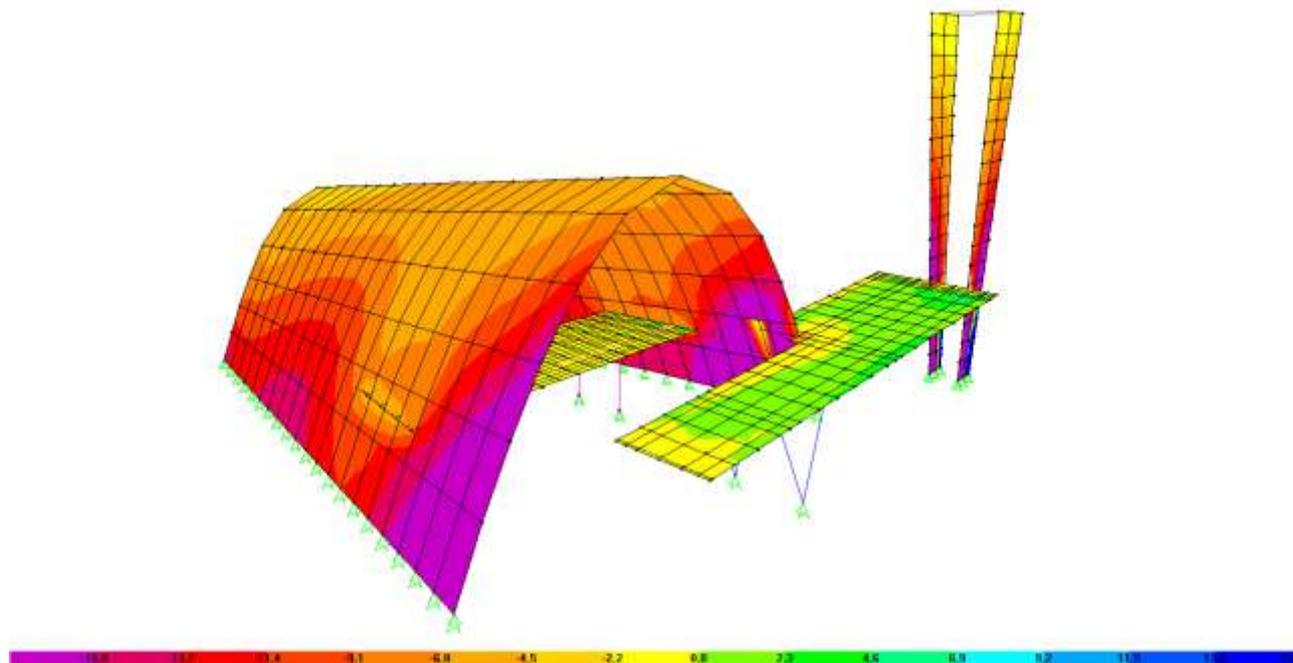
Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

- **Corpo Principal**

O diagrama de forças normais do corpo principal (Figura 125) mostra que a casca principal está submetida apenas a compressão, situação adequada ao sistema estrutural análogo ao arco. Os valores dos esforços estão entre -6,8 Tonf e -16,8 Tonf. A diminuição constante de seção dos arcos que compõem a cúpula ajuda na prevenção das chamadas “perturbações de borda”, que poderiam gerar esforços de flexão na estrutura (VASCONCELLOS, 2004).

No mesmo gráfico, observamos também que o mezanino apresenta predominantemente esforços de compressão com valores abaixo de -2,2 Tonf e esforços de tração em alguns pontos, próximos aos apoios.

Figura 125 – Diagrama de Forças Normais para combinação de carga 1 da Igreja São Francisco de Assis.

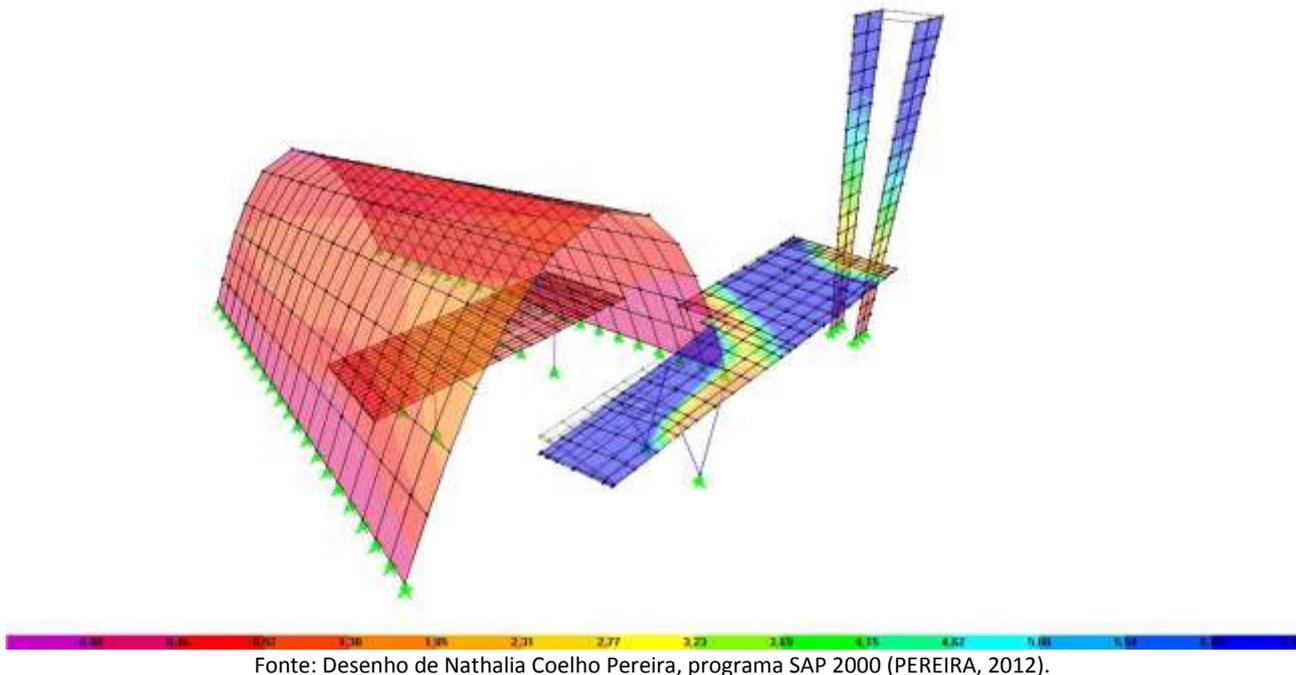


Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

Já na marquise, mostrada também na Figura 125, aparecem esforços de tração no encontro da marquise com as cascas e ao longo do corpo da casca, nas áreas onde a laje, de apenas 5 centímetros de espessura, se apoia nas vigas da marquise.

Ao observarmos o diagrama de deslocamentos para o corpo principal (Figura 126) podemos verificar que, conforme esperado, as abóbodas são estruturas com muita rigidez e apresentam deslocamentos bem pequenos, ainda mais se comparados com a laje da marquise da fachada frontal que apresenta deslocamentos de 0,5 a 0,68 centímetros, enquanto na casca da abóboda os deslocamentos variam entre 0 e 0,03 centímetros.

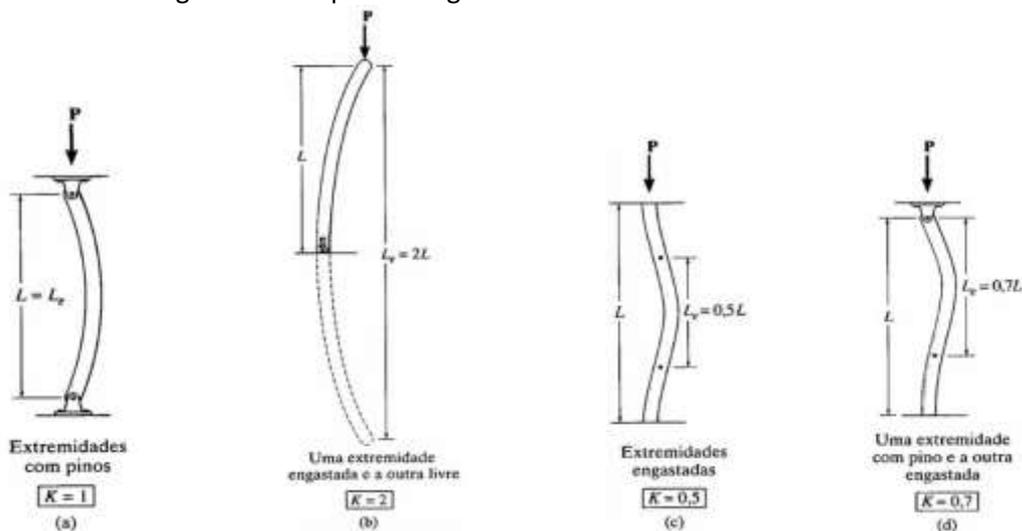
Figura 126 – Diagrama de Deformação para combinação de carga 1, com a escala de cores em metros. da Igreja São Francisco de Assis.



- **Campanário**

Podemos observar a estrutura do Campanário como uma haste engastada na base, livre na extremidade superior e submetida à ação de cargas, como o peso do sino e as cargas devidas ao vento. Uma haste dessa forma apresenta a condição de flambagem mais grave dos tipos possíveis de condições de apoio (Figura 127), pois como não há fixação em uma de suas extremidades, a haste sofre diretamente com a força axial deformando-a inteiramente logo após a sua extremidade engastada (CASTELLI & NASCIMENTO, 2016). Além disso esse sistema estrutural cria uma concentração de esforços de flexão na base engastada, situação agravada pela diminuição da secção da estrutura no encontro com a fundação.

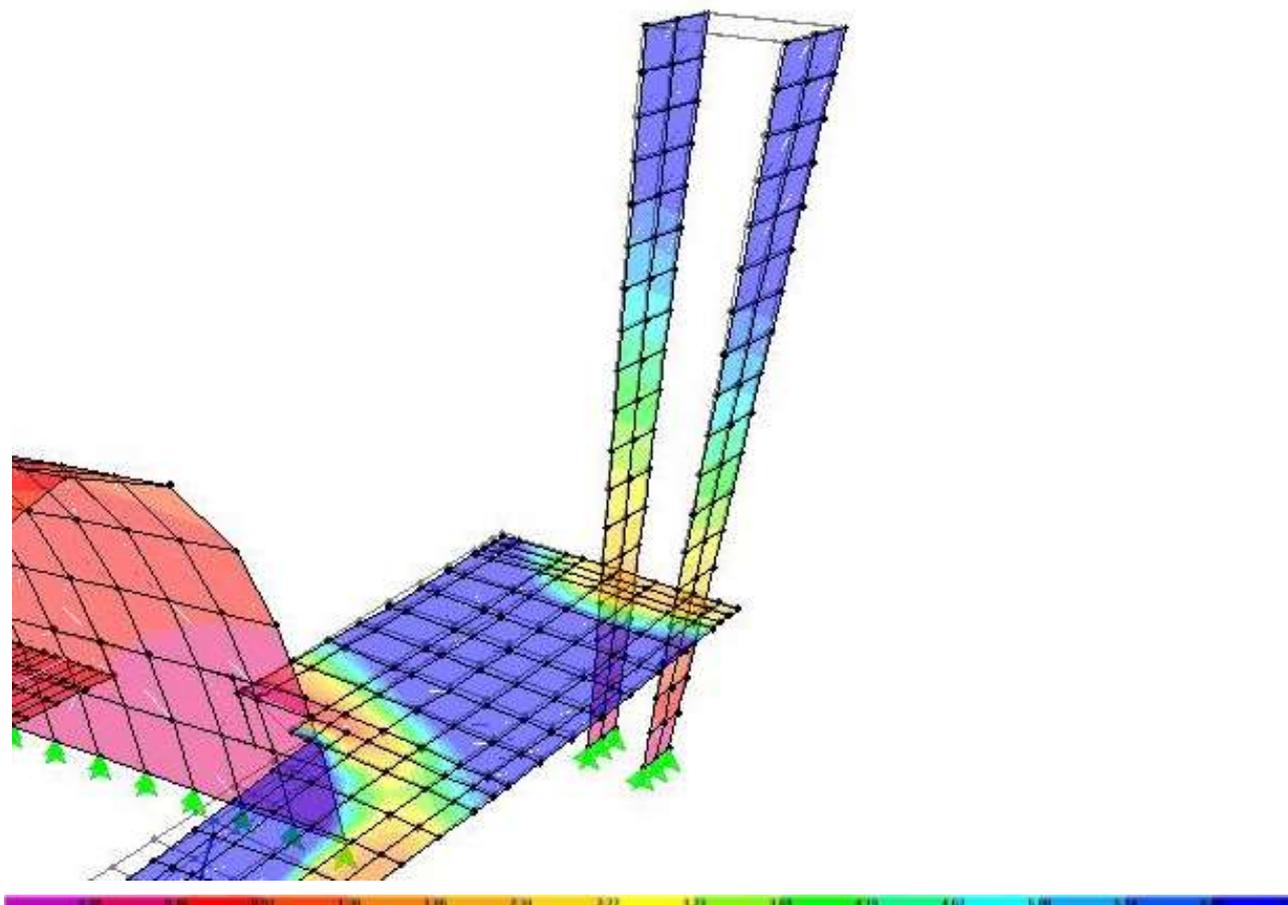
Figura 127 – Tipos de engaste nas extremidades das hastes.



Fonte: CASTELLI & NASCIMENTO, 2016.

O gráfico de deformações mostrado em detalhe para o campanário, na Figura 128, mostra que o deslocamento na extremidade superior do campanário é de aproximadamente de 70mm.

Figura 128 – Diagrama de Deformação para combinação de carga 1 na torre do campanário da Igreja São Francisco de Assis.



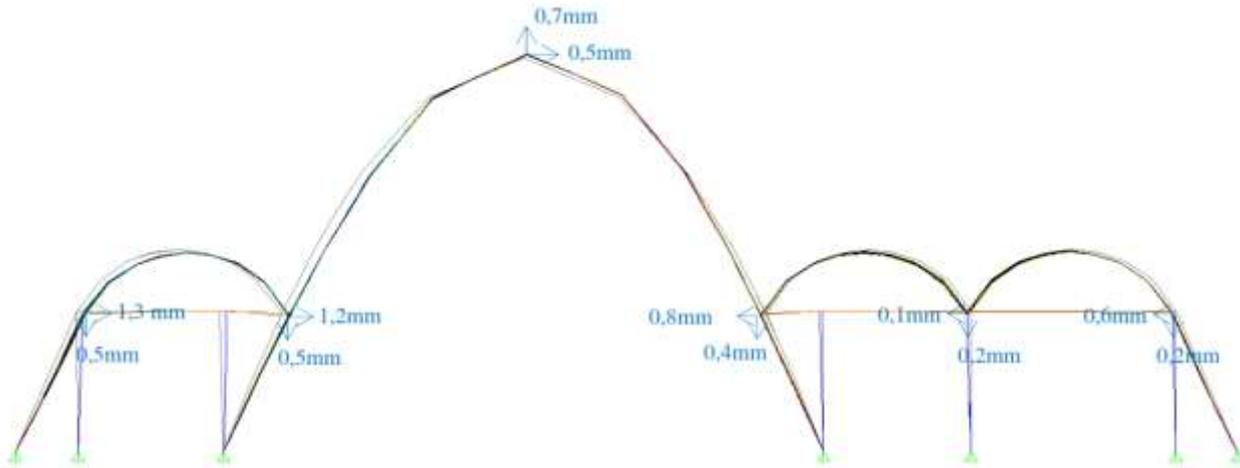
Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2012.

- **Conjunto de arcos e abóboda parabólica**

Observando o sistema estrutural que forma esse último trecho da estrutura notamos que foram utilizadas vigas e pilares sustentando os arcos das extremidades do conjunto. Esses elementos estruturais foram “escondidos” nas paredes da fachada posterior da igreja. Para efeito de comparação e para verificar a motivação do uso desse artifício foi feita uma simulação com e sem pilares e vigas na região das cascas menores (PEREIRA, 2012).

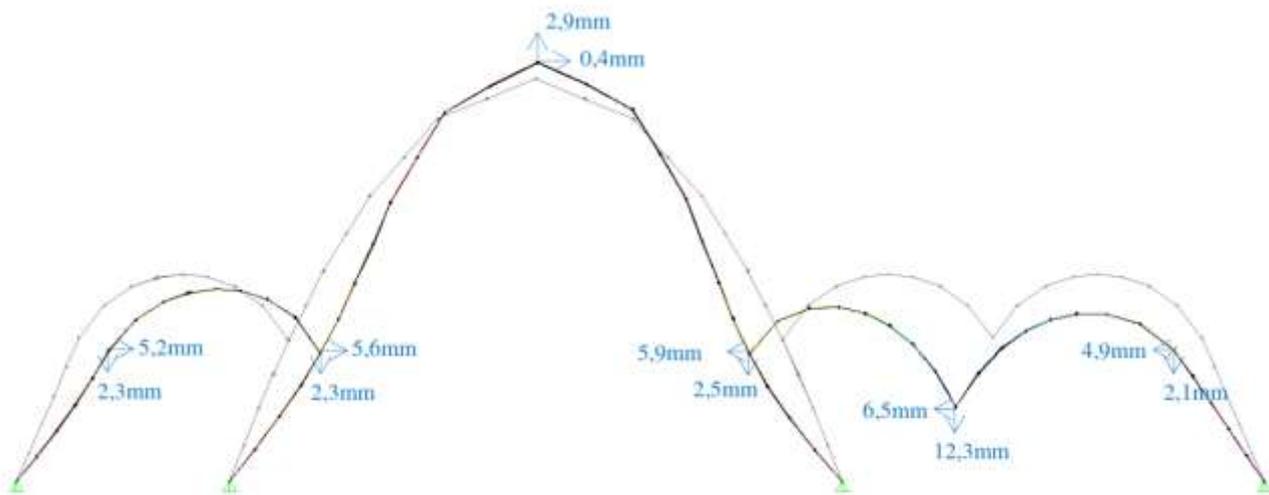
As Figura 129 e Figura 130 mostram os diagramas de deslocamentos das duas situações e notamos que, conforme esperado a situação com os apoios das vigas e pilares apresenta maior rigidez do que na simulação sem os apoios. O deslocamento máximo nessa região aumenta de 2mm para 14mm.

Figura 129 – Deformação para a combinação de serviço, com pilares e vigas conforme construído.



Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

Figura 130 – Deformação para a combinação de serviço, sem pilares e vigas.

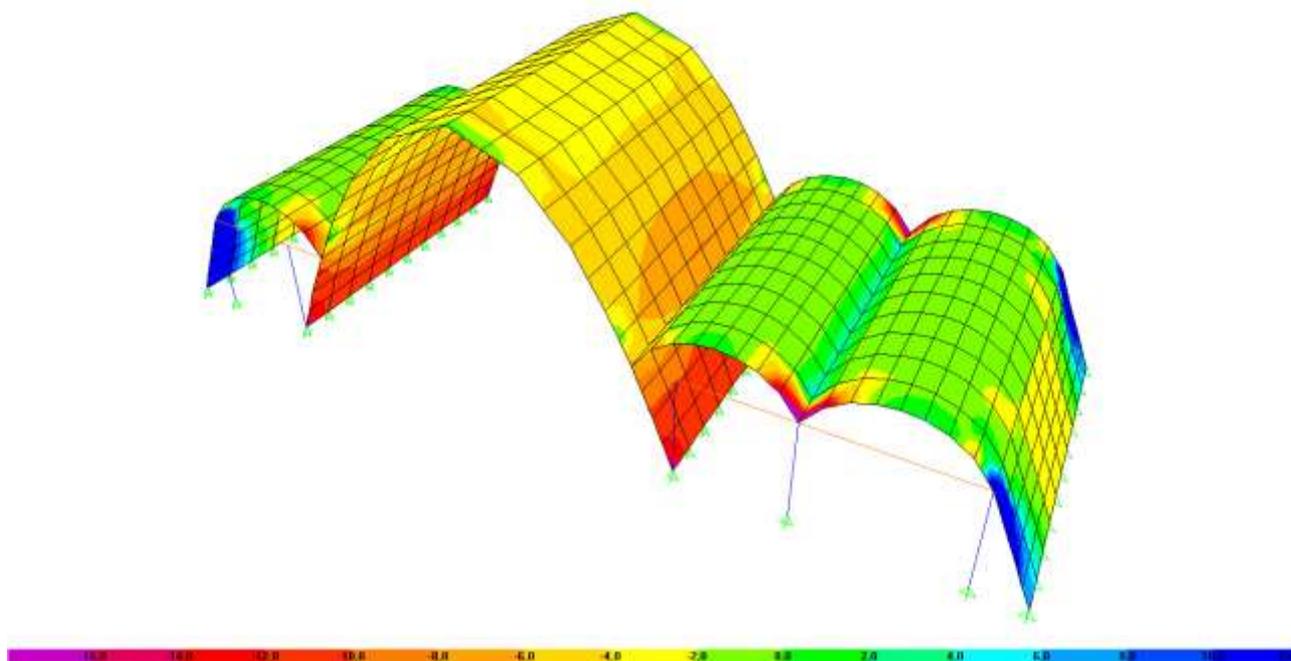


Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

Observando a mesma comparação nos gráficos de esforços normais para o conjunto de arcos e abóboda da sacristia e altar da Igreja da Pampulha (Figura 131 e Figura 132) percebemos que sem os apoios, os arcos funcionam apenas com esforços de compressão, a exemplo da abóboda principal. Com os apoios das vigas e pilares os valores de compressão em geral diminuem e apareceram esforços de tração nas bordas das paredes laterais e no encontro entre dois arcos.

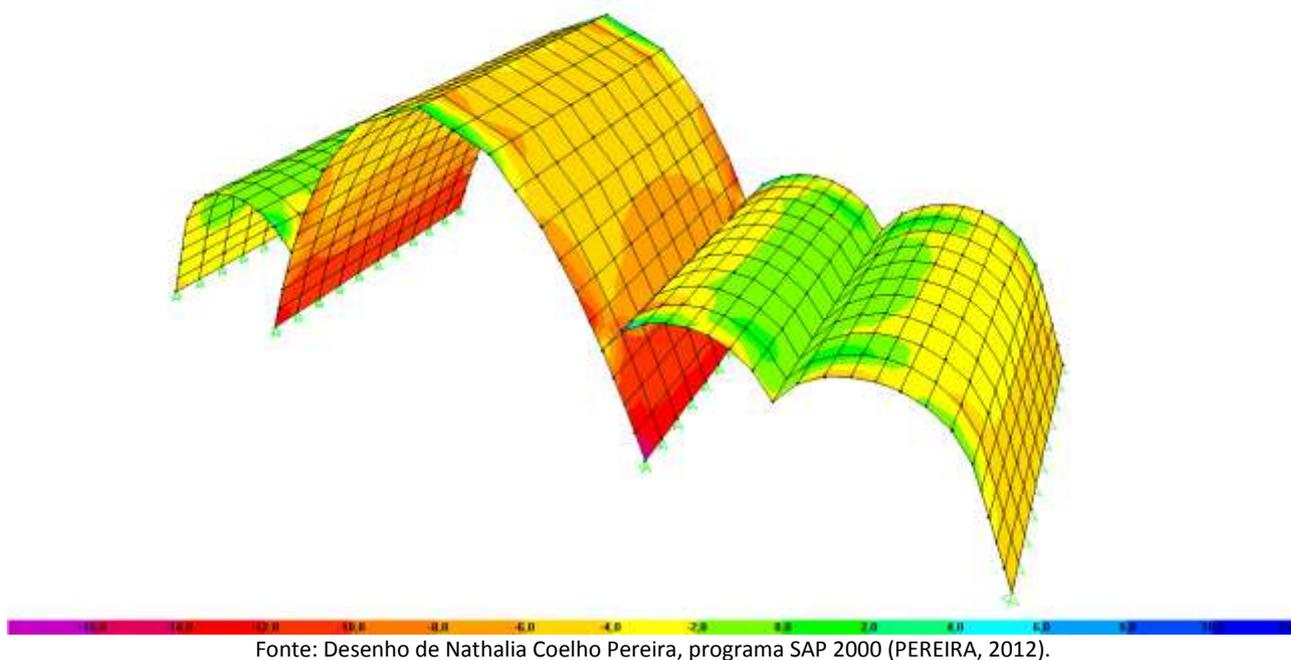
As análises mostram que a estrutura da igreja conforme construída é mais estável que na simulação sem os pilares e vigas na região da sacristia, porém não foi possível afirmar que este ganho na rigidez tenha sido uma das razões para que esses elementos tenham sido utilizados, pois a simulação sem os pilares indicou valores de deformação ainda baixos, dentro dos limites previstos pela norma atual (ABNT, 2004). PEREIRA (2012) sugere que o uso desses elementos possa estar relacionado ao processo de construção da edificação ou à ligação entre as cascas, já que não se tem informações de como essas ligações foram executadas.

Figura 131 – Forças Normais para combinação 1, com pilares e vigas conforme construído.



Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

Figura 132 – Forças Normais para combinação 1, sem pilares e vigas.

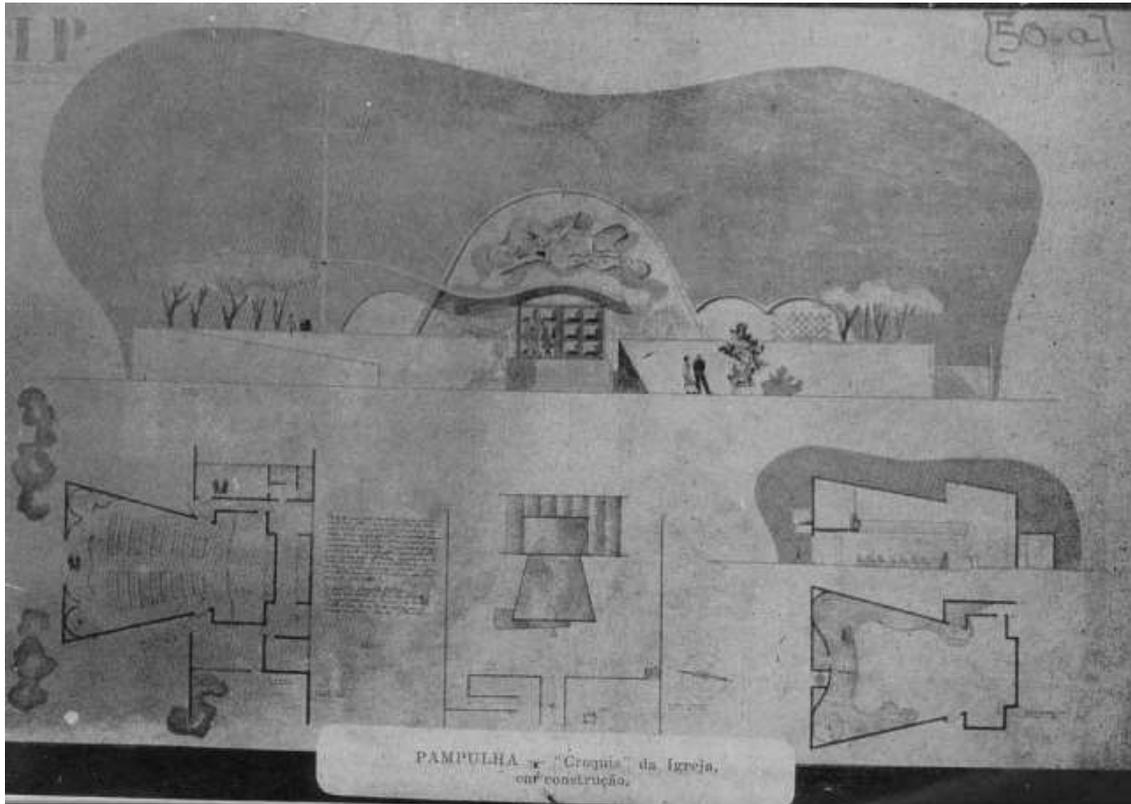


Fonte: Desenho de Nathalia Coelho Pereira, programa SAP 2000 (PEREIRA, 2012).

A geometria da Igreja de São Francisco de Assis sugere uma simplicidade e pureza estrutural que, na realidade oculta uma série de expedientes para torná-la viável (MACEDO & SILVA, 2016). O fato das abóbodas menores que abrigam a sacristia não serem parabólicas como as duas maiores e sim arcos circulares apoiados em vigas e pilares, ou o apoio do mezanino na casca principal que para sustentá-lo precisou de reforços pontuais que não aparecem no resultado final, sugerem uma participação direta e importante do engenheiro Joaquim Cardozo nas decisões de projeto.

MACEDO & SILVA (2016) sugerem que, por ter projetado o arco parabólico da rampa de acesso na Escola Rural Alberto Torres alguns anos antes, Joaquim Cardozo pode ter influenciado Niemeyer na escolha da forma da cúpula da Igreja da Pampulha já que em desenhos iniciais (Figura 133) a forma dos arcos era mais rígida, tendo essa escolha contribuído para o rompimento definitivo da arquitetura de Niemeyer com a rigidez formal da arquitetura moderna internacional.

Figura 133 – Croquis da Igreja da Pampulha encontrados no relatório de gestão 1941-1942 do prefeito de Belo Horizonte, Juscelino Kubtischek.



Fonte: Relatório de Gestão 1941-1942 em PEREIRA, 2012.

A aparente simplicidade e pureza estrutural, com a qual Niemeyer rompia de vez com a geometria rígida do modernismo internacional, é conseguida através de diversas soluções técnicas que reafirmam a importante participação do engenheiro Joaquim Cardozo nas decisões de projeto. As análises destacam a maturidade dos projetistas ao utilizarem as cascas de concreto em forma de arcos nas cúpulas menores e a leveza formal dada ao uso da casca em forma parabólica para a casca principal, além do uso preciso dos elementos estruturais que formam a marquise e o campanário da igreja.

Nesse momento da arquitetura moderna, Niemeyer e Cardozo já tinham trabalhado em importantes experiências nacionais com o uso do concreto armado e os conceitos do modernismo. Ambos já traziam certa bagagem intelectual e experiência. Juntos, conseguiram unir o novo vocabulário formal trazido por Niemeyer, que rompia com a geometria rígida do modernismo vigente internacional, acrescentando a esse a leveza das formas curvas e o comprometimento de

Joaquim Cardozo ao buscar o equilíbrio estático das estruturas contribuindo para a preservação das formas. Inicia-se aí umas das mais importantes e bem-sucedidas relações entre arquiteto e engenheiro da arquitetura moderna brasileira.

4.2.2 MAM - Rio de Janeiro (Affonso Reidy e Arthur Eugenio Jermann)

Na década de 1950, com a criação do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM, se deu uma mudança definitiva de direção na importância dos museus (FRASER, 2003). O MAM inicialmente ocupava, de forma temporária, o último piso do banco Boavista (do barão de Saavedra, em edifício na Avenida Rio Branco); depois passou a ocupar parte do andar térreo do Edifício do Ministério da Educação, projetado em 1936 pela equipe liderada por Lúcio Costa. Em 1958 foi inaugurada a sede definitiva do museu (Figura 134), projeto de Affonso Reidy entre 1952 e 1953, situado no aterro do Flamengo, ao lado da Enseada da Glória.

Figura 134 – Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro - MAM, 1958 de Affonso Eduardo Reidy.



Fonte: Foto de JP Brasil em www.archdaily.com.br.

O Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro é um marco arquitetônico e histórico para o Brasil. Sua importância não se resume apenas a sua função, como todo importante museu, sua relevância extrapola os limites da simples finalidade e torna-se um ícone de uma época e do Rio de Janeiro. O MAM é símbolo tanto da evolução dos Museus no Brasil quanto representante principal da escola carioca da arquitetura moderna.

A construção do museu ocorreu, por razões de orçamento, em 3 etapas. O conjunto da obra é formado por 3 blocos. O Bloco Escola, primeiro a ser inaugurado em 1953; o Corpo Principal, onde está a galeria de exposições que 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. Além das etapas de construção, o Museu passou por duas grandes reformas, a primeira delas, em 1978 após um incêndio ter destruído parte de seu acervo, foi considerada malsucedida (SERAPIÃO, 2007), outra, mais minuciosa foi feita em 1999.

O local onde é situado o MAM é um enorme aterro a beira mar – Aterro do Flamengo (Figura 135) – projetado também por Affonso Reidy, que 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.

Figura 135 – Aterro do Flamengo, Rio de Janeiro. Projeto de Affonso Eduardo Reidy.



Fonte: Foto de Nelson Kon em www.archdaily.com.br.

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.

Arquitetura

Primeira etapa concluída do projeto, o bloco-escola, assim conhecido por abrigar além da administração do Museu, uma escola de artes, é um edifício de dois pavimentos e 12 mil metros quadrados, possui estrutura reticular que forma uma malha estrutural de vão de 7 por 6,7 metros (VASCONCELLOS, 2004). As fachadas Oeste e Norte são protegidas por brises de alumínio e o terraço na cobertura por uma pérgola de concreto armado apoiadas em tubos metálicos que chamam a atenção pela esbeltes (Figura 136).

Figura 136 – Bloco Escola do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, 1958, pergolado do terraço.



Fonte: VASCONCELLOS, 2004 (p. 259).

O Teatro do MAM (Figura 137) foi construído entre 2005 e 2006 e aberto ao público no início de 2007. Essa construção é motivo de muita polêmica, pois o projeto original de Reidy não foi obedecido, apesar de estar tombado em três estâncias – municipal, estadual e federal (SEGRE et al, 2007). A forma proposta para o teatro acompanhava a proposta do museu, seria o volume de maior destaque do conjunto. Segundo o projeto de Affonso Reidy o teatro contaria com um grande palco preparado para grandes apresentações cênicas e sinfônicas, o projeto, no entanto contava com a mesma transparência e leveza do restante do conjunto.

A recente construção do teatro modificou diversos fatores do original, um dos principais foi a mudança da função do edifício, agora utilizado para receber não só atrações cênicas, mas eventos musicais, empresariais e sociais. Essa mudança acarretou diversas adaptações na forma principalmente interna do teatro. Além disso, foram empregadas técnicas e materiais diferentes dos previstos por Reidy, dando ao teatro uma aparência falsa e diferente do restante do conjunto.

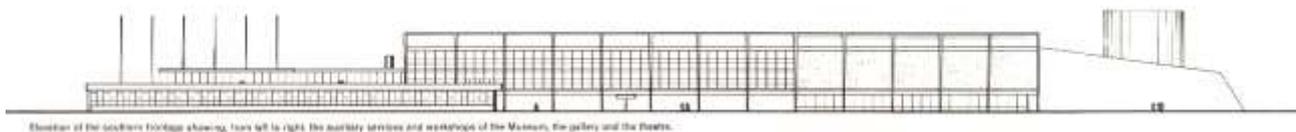
Figura 137 – Panorama do Museu com a construção do teatro.



Fonte: Fotografia de Thiago Leitão em SEGRE, 2007. p. 5.

O corpo principal do Museu (Figura 138) abriga a área de exposição. É um bloco longilíneo, de 130 metros de comprimento e 16 metros de largura, com dois 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. Na cobertura, o arquiteto usou cascas curvas, marquises e planos inclinados para distribuir a entrada de luz natural ao longo dos espaços internos.

Figura 138 – Elevação Sul, a esquerda o bloco-escola, ao centro o corpo principal e a direita o teatro.

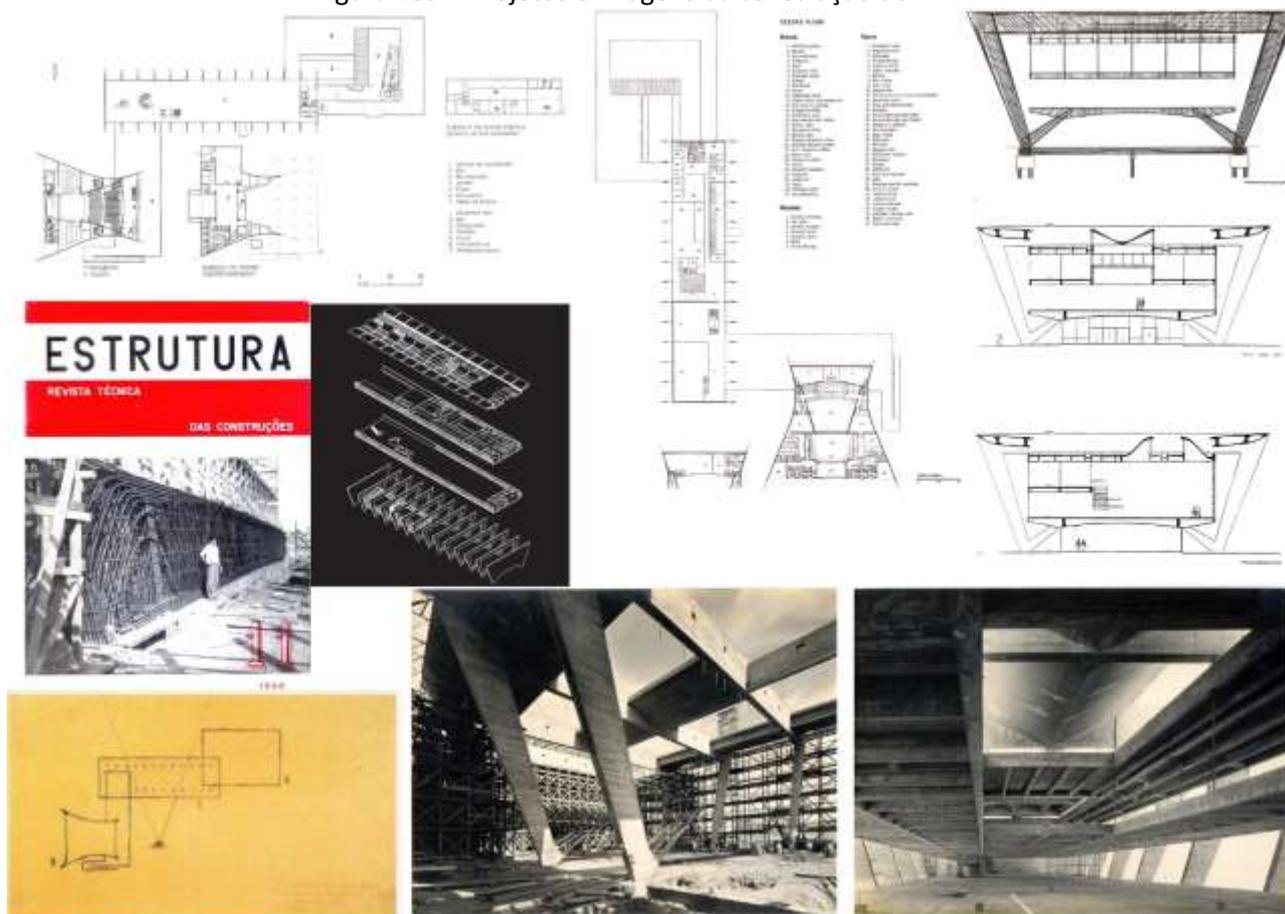


Fonte: BONDUKI, 2000.

Estrutura

A partir de uma pesquisa bibliográfica sobre o projeto, arquitetônico e estrutural, foi descrever com precisão a estrutura do do MAM. O levantamento levou em consideração fotos da construção e imagens dos projetos de Affonso Reidy disponíveis no Centro de Documentação e Pesquisa do MAM além de importantes informações de levantamentos realizados por outros autores e pesquisadores, como BONDUKI (2000), FISCHMANN (2003), OBIOL (2003), VASCONCELLOS (2004) e SEGRE et al (2007) (Figura 139).

Figura 139 – Projetos e imagens da construção do MAM.



Fontes: Centro de Documentação e Pesquisa do MAM e BONDUKI (2000), FISCHMANN (2003), OBIOL (2003), VASCONCELLOS (2004) e SEGRE et al (2007).

O bloco principal, foco deste estudo de caso é estruturado por 12 pórticos em concreto armado e 2 empenas de concreto nas extremidades com o mesmo formato dos pórticos, espaçados de aproximadamente 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.

Esses pórticos de concreto armado podem ser descritos como duplos e biarticulados, formados por um quadro maior que possui dois pilares externos inclinados para fora da estrutura e a viga principal de 41 m de comprimento – vão útil de 38,75m, onde se penduram as lajes da cobertura e do segundo pavimento. O quadro menor também possui dois pilares inclinados, dessa vez para dentro da estrutura e sustentam a laje do primeiro pavimento. Os dois quadros têm apoio comum por meio de articulações formadas por placas de chumbo, sobre blocos de concreto armado sustentados por estacas Franki de 23 m de comprimento (MATTA, 1959 e CARNEIRO & VALLE, 1959 apud OBIOL, 2003).

Ao tocarem o solo, os pilares do pórtico formam o famoso “V” (Figura 140) que gerou inveja até mesmo em Le Corbusier, segundo citação atribuída a ele em SERAPIÃO, 2007: “Ora veja: eu quis

fazer esta coluna, mas não tinha armação desse tipo”. Na parte interna e menor do “V” está apoiada a laje do primeiro piso.

Tendo em vista o empuxo lateral exercidos nas fundações pelos pórticos, tanto a porção externa, que sustenta a viga superior quanto a interna que sustenta a viga do primeiro pavimento os projetistas previram um tirante em cada um dos pórticos, o que permitiu que essas forças fossem absorvidas e que elas não viessem a ser transmitidas para a fundação (OBIOL, 2003). Assim, abaixo da linha do solo, os blocos de apoio são ligados transversalmente por esses tirantes de concreto protendido que absorve um empuxo horizontal de 200t.

Figura 140 – Museu de Arte Moderna. Detalhe do Pilar em “V”.



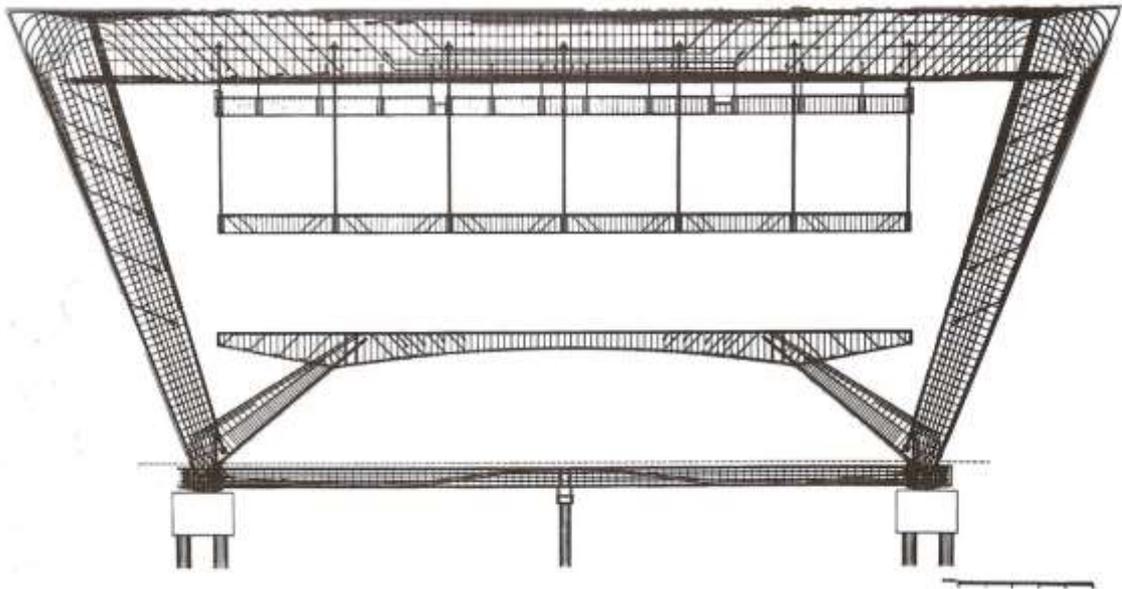
Fonte: Fotografia: Meindert Versteeg, 2007 em SEGRE, 2007. p. 6.

O contraventamento entre os pórticos é feito por uma viga longitudinal que os conecta no nível do primeiro pavimento. No topo dos pórticos existem marquises de laje dupla, nervurada, com comprimento de aproximadamente 8,00m. Além disso foram acrescentados elementos na cobertura, como lajes inclinadas e lanternins em curva que além de clara função plástica e de controle da entrada de luz natural cumprem também papel estrutural ao contribuírem para o contraventamento.

O segundo piso, ou mezanino, assim como a laje da cobertura são suspensos 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). A Figura 141 mostra o corte transversal do pórtico mostrando suas armaduras, o mezanino e a cobertura pendurados nele pelos tirantes.

Figura 141 – Corte do pórtico, armaduras.



Fonte: VASCONCELLOS, 2004 (p.256).

Análise Estrutural

As dimensões dos elementos foram coletadas da pesquisa bibliográfica e sistematizadas e organizadas na Tabela 3. Os dados da Tabela 3 foram então usados para a modelagem dos elementos estruturais no software SAP-2000, v20 conforme imagens mostradas na Figura 142, na qual foram usados elementos barras (*frames*) – para os pórticos, vigas e tirantes, placas (*area shells*) para as lajes de piso e coberturas que foram discretizadas em elementos de até 30cm, resultando em um modelo composto por 1974 *frames*, 103.688 *area shells*, 106.332 *points* e um total de 414.470 *area edges*.

Seguindo as orientações da norma NBR 6120/86, (ABNT, 1980) aplicou-se carregamento acidental (LIVE – L) de 500Kgf/m² nas lajes das áreas de exposição e museu e 100Kgf/m² na cobertura, além do peso próprio de todas as peças estruturais (DEAD – D). Para as análises numéricas a foram utilizadas as seguintes combinações de cargas: 1,4D + 1,4L – Estado Limite Último (ELU) e 1,0D + 1,0L – Estado Limite de Serviço (ELS).

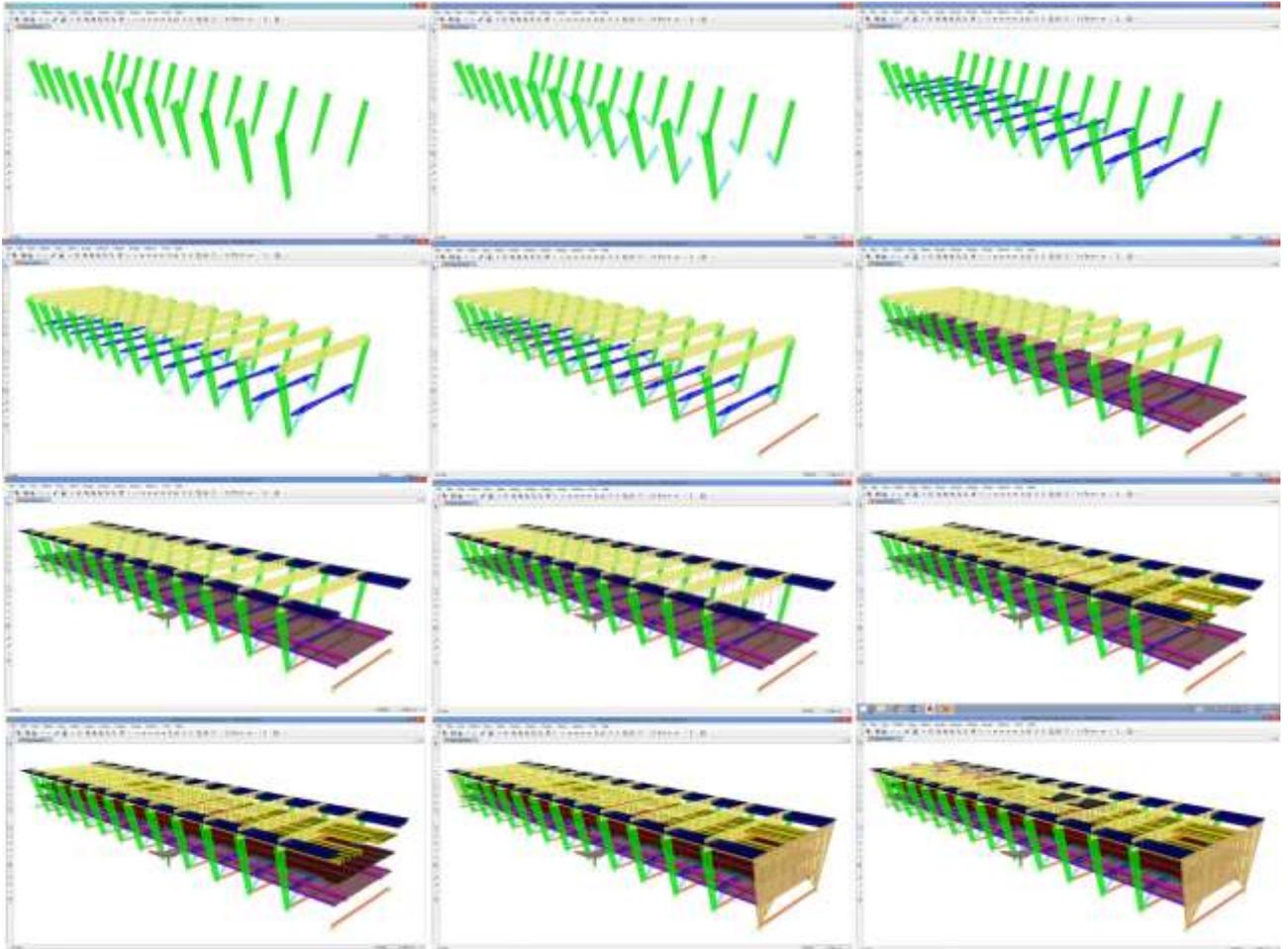
O diagrama de deslocamentos para o Estado Limite de Serviço do modelo (Figura 143) mostra que a estrutura completa é rígida, apresentando deslocamentos verticais abaixo dos limites da norma atual. Os deslocamentos máximos nas vigas superiores de alguns pórticos e na são de -14,1 cm. Já na laje do segundo pavimento o deslocamento é de -5,93cm e próximo ao centro do vão da viga transversal do primeiro pavimento é de -2,8cm.

Tabela 3 - Dimensões da estrutura do bloco principal do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM-RJ, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.

PÓRTICO			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
1 - Pilares Externos	0,30	1,40 a 2,75	
2 - Pilares Internos	0,30	1,50 a 0,75	
3 - Vigas Superiores	0,30	2,60	
4 - Vigas Transversais 1º Pavimento	0,35	0,48 a 1,30	
5 - Tirante de travamento	0,30	0,50	
6 - Empenas	0,30		
1º PAVIMENTO			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
7 - Vigas Longitudinais	0,35	1,15	
8 - Vigas de Borda	0,15	0,50	
9 - Lajes	0,15		
2º PAVIMENTO			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
10 - Vigas Longitudinais	0,20	0,70	
11 - Vigas Transversais	0,10	0,70	
12 - Tirantes	0,07		
13 - Lajes	0,15		
COBERTURA			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
14 - Vigas Longitudinais	0,30	0,70	
15 - Vigas Transversais	0,10	0,70	
16 - Vigas Longitudinais (contraventamento)	0,30	2,00	
17 - Tirantes	0,07		
18 - Lajes	0,15		
19 - Marquise Nervurada (contraventamento) - Perfil	8,00 (aprox.)	1,00 (aprox.)	
20 - Lanternins (casca de concreto)	0,15 a 0,30		
21 - Lajes inclinadas (contraventamento)	0,20		

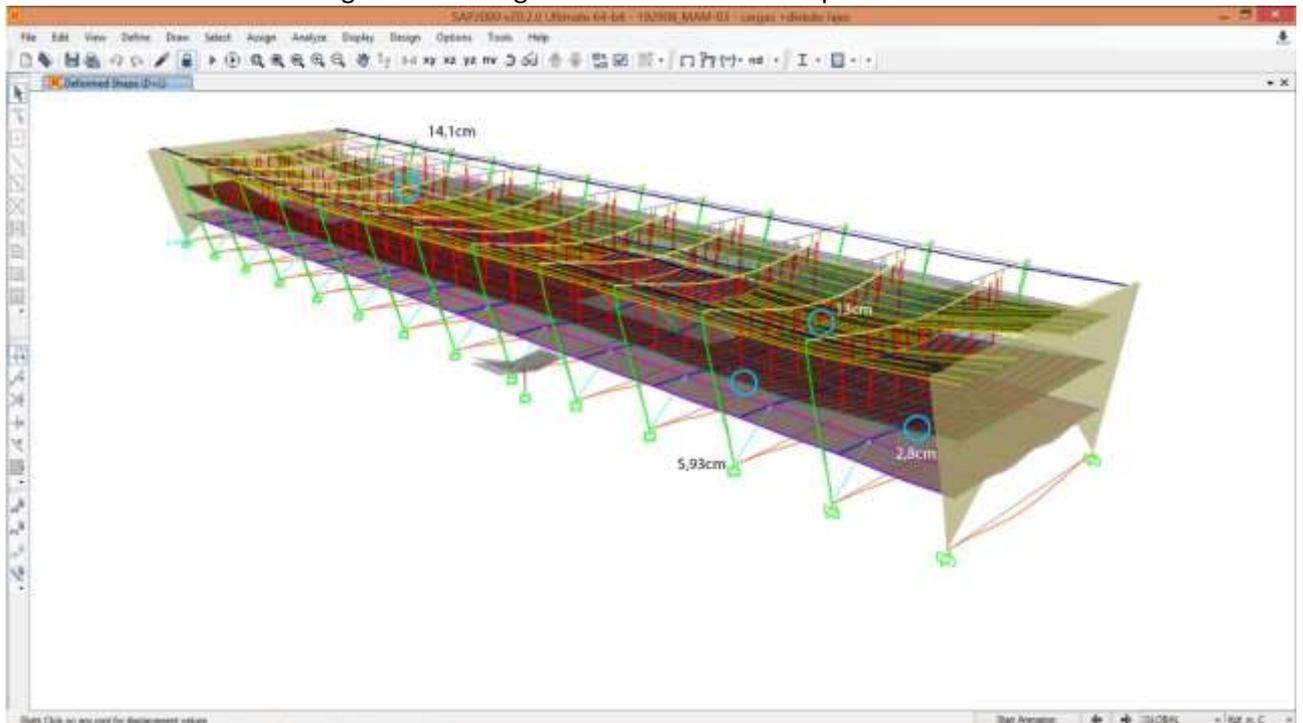
A: Base (vigas) ou Lado A (pilares) ou Espessura (paredes e cascas) B: Altura (vigas e lajes) ou Lado B (pilares)
 Fonte: Produzido pelo Autor.

Figura 142 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do MAM.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Figura 143 – Diagrama de deslocamentos para o MAM.

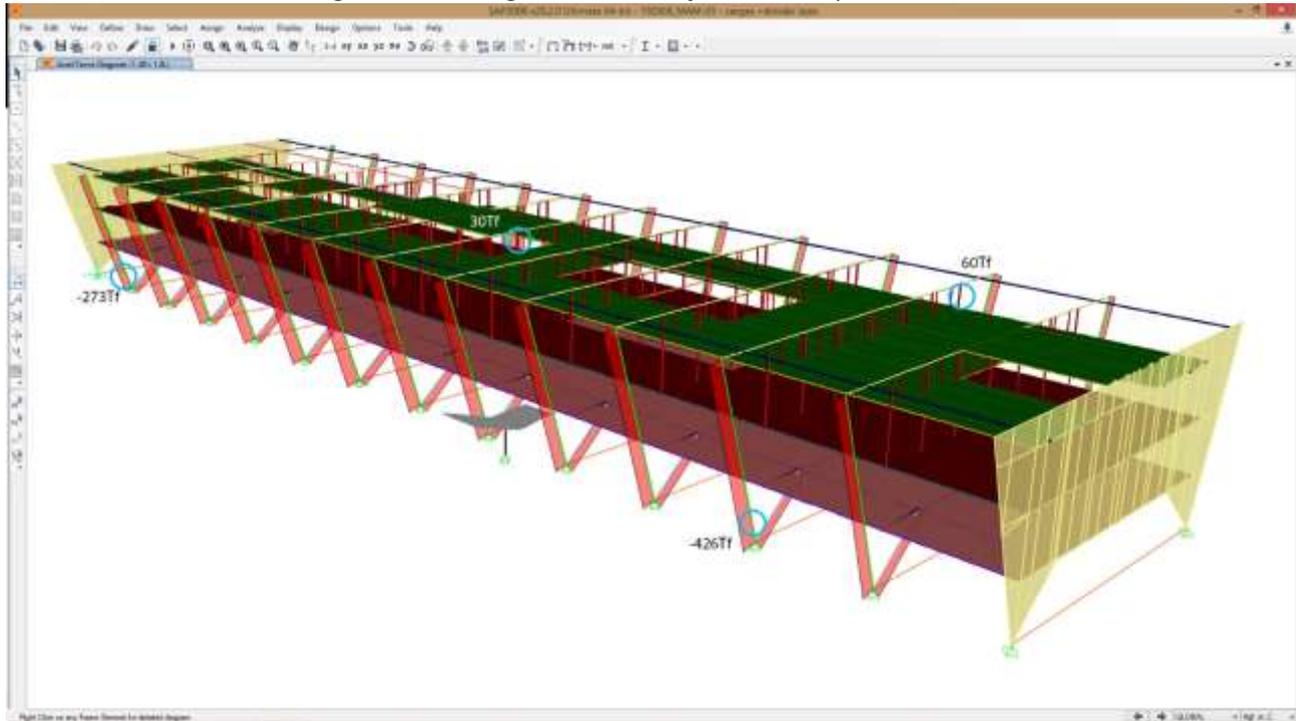


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

A Figura 144 mostra o diagrama de esforços normais, onde notamos que as maiores cargas de compressão se concentram nos pilares externos dos pórticos, variando entre $-274Tf$ e $-428Tf$

entre os pórticos. Entre os tirantes que sustentam as lajes do segundo pavimento as maiores cargas de tração somam 60Tf e os tirantes que sustentam a cobertura, sustentam cargas de até 32Tf.

Figura 144 – Diagrama de esforços normais para o MAM.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

- **Pórticos**

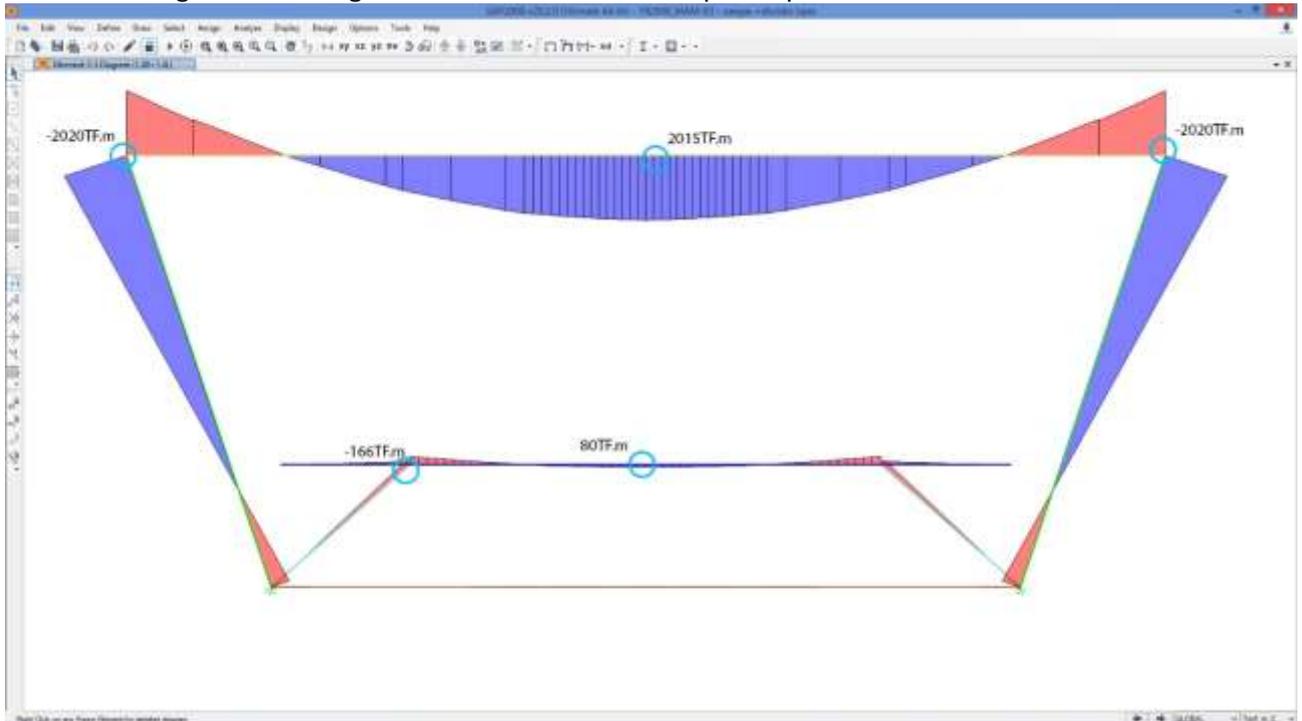
O elemento mais marcante em toda a arquitetura do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro e o mais comentado na obra de Affonso Reidy é a estrutura do pórtico, apoiado nos pilares em “V”, que possibilitaram que o arquiteto alcançasse o resultado arquitetônico desejado na sua forma estrutural mais pura.

A Figura 145 mostra de forma isolada o diagrama de momentos fletores em um dos pórticos. Nesse diagrama podemos notar a concentração de esforços de flexão – momento positivo – nas grandes vigas superiores dos pórticos, atingindo o valor de 19.760,4KN.m (2.015TF.m) no centro do vão. O momento fletor é bem inferior nas vigas do segundo pavimento – 784,53KN.m (80TF.m).

O levantamento dos elementos que compõe a estrutura do MAM apontou para a presença de tirantes de concreto armado, que não aparecem na estrutura por estarem enterrados, e travam a base dos pórticos.

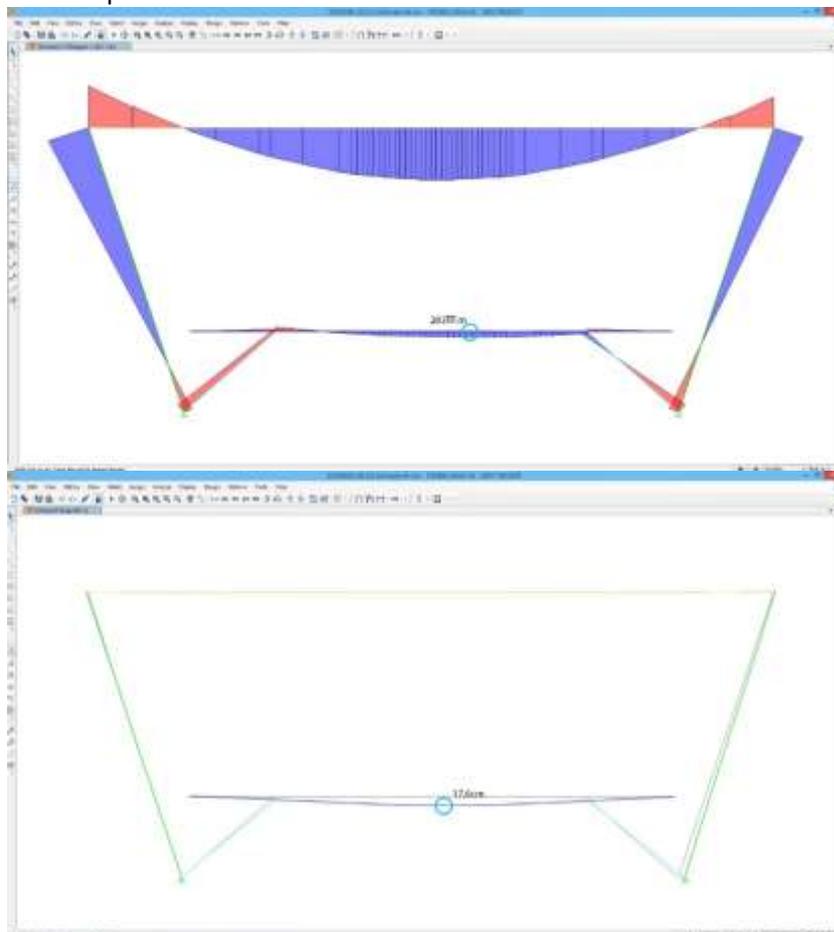
A Figura 146 mostra uma simulação computacional do modelo estrutural do pórtico, sem a presença do tirante de travamento, nota-se que o momento fletor na viga do primeiro piso é de 2.333,98 KN.m (238 TF.m) nessa condição em relação ao projeto construído, com o tirante, 3,5 vezes maior. O deslocamento também é muito maior nesse trecho, 17,6cm, ao invés de 2,8cm na situação real.

Figura 145 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico da estrutura do MAM.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

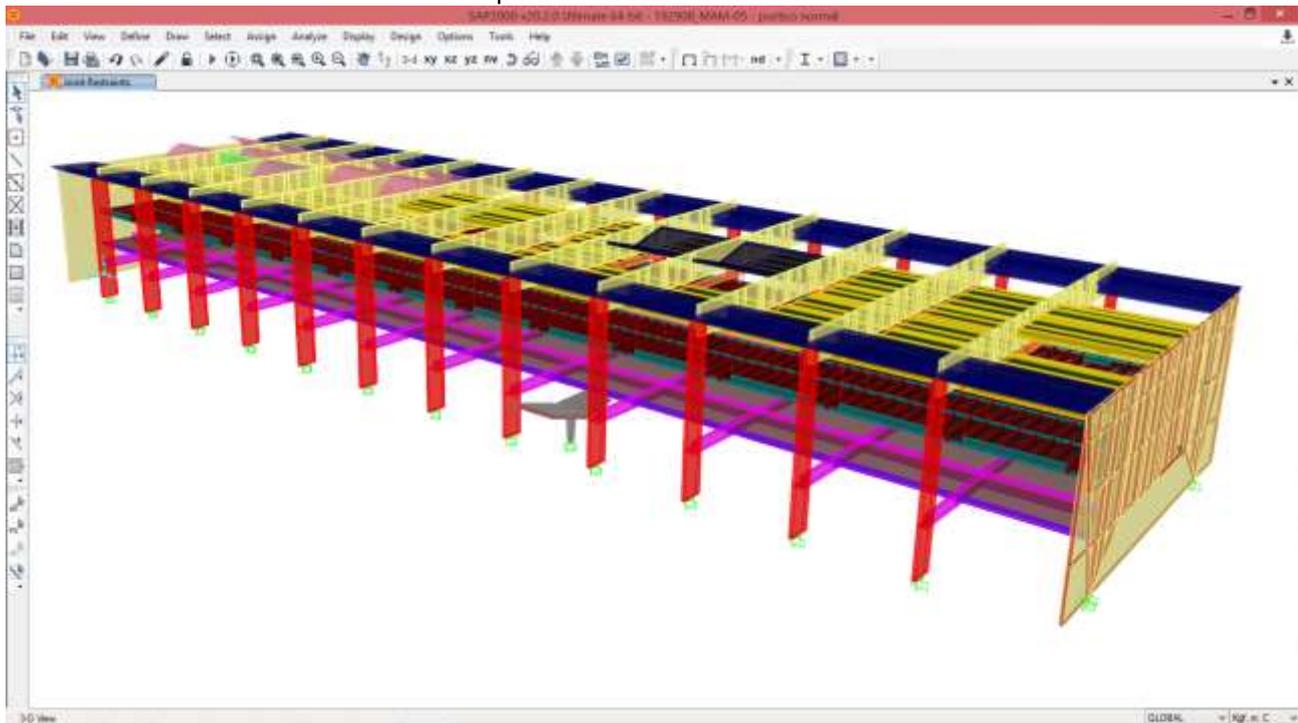
Figura 146 – Diagramas de momentos fletores e deslocamentos para modelo computacional de simulação dos pórticos do MAM sem os tirantes de travamento da base.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Outra característica marcante da estrutura do Museu é a forma dos pilares, em “V”. A princípio essa forma pode parecer meramente estética. Analisemos então, usando o modelo computacional, uma simulação do mesmo pórtico utilizando a forma tradicional de pórtico, apoiando o primeiro pavimento diretamente nos pilares e mantendo suspenso por tirantes a cobertura e o segundo pavimento e as demais características do edifício (Figura 147).

Figura 147 – Modelo computacional do sistema estrutural de pórticos simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM.

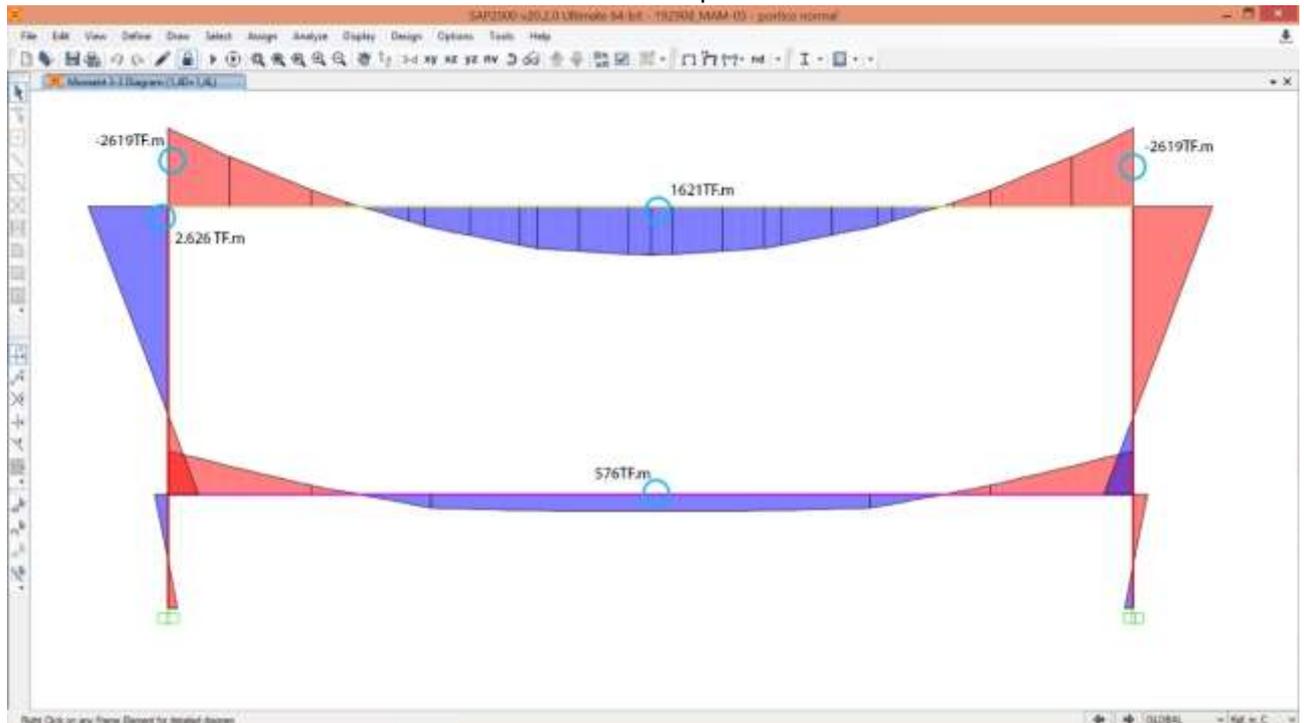


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

A Figura 148 mostra que um pórtico com uma forma tradicional apresentaria um momento fletor maior na viga do primeiro pavimento — 5.648,63KN.m ou 576TF.m, mais de sete vezes o valor encontrado na mesma viga no modelo conforme construído. Os momentos fletores são maiores também nos outros elementos do pórtico (-25.752,26KN.m, ou -2.626TF.m — nos pilares), exceto na viga superior que apresentou um momento fletor positivo máximo de 15.896,58KN.m (1621TF.m), 80 % do valor no pórtico conforme projetado por Affonso Reidy, mas um valor não equilibrado com o valor do momento negativo.

Assim, podemos concluir que a decisão aparentemente visual de desenhar os pilares dos pórticos em “V” traz consigo a solução estrutural que permitiu uma laje mais fina e leve para o nível de exposições, apoiadas na parte menor do “V”, possibilitando ainda que o mezanino fosse suspenso por tirantes. A viga superior do pórtico, que apresenta maior momento na opção do projeto original, possui uma dimensão maior para suportar esse esforço e ainda suportar a carga do mezanino. Porém, fica claro no desenho arquitetônico que a viga mais alta também contribui para a composição arquitetônica do conjunto.

Figura 148 – Diagrama de momento fletor para Modelo computacionais do sistema estrutural de pórtico simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Ao analisar o projeto de Affonso Reidy por um ângulo estrutural, podemos explorar a importância dele não só na história e na arquitetura, mas também sua contribuição para a evolução técnica trazida neste momento da arquitetura moderna.

Nesse contexto se destaca a solução construtiva de Affonso Reidy para os pórticos do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro que, segundo MACIEL (2006): “reduz a seção dos pilares pela utilização da compensação entre momentos fletores na base do ‘V’”.

Ao adotar essa solução, Affonso Reidy que não só marca a arquitetura do museu como promove uma compensação entre momentos fletores que diminuem na laje do primeiro piso, permitindo vigas e lajes menores, vãos maiores e ausência de colunas internas na área de exposição, identificando o compromisso com a estrutura e o equilíbrio entre a forma arquitetônica o sistema estrutural.

Com as simulações computacionais podemos visualizar claramente como a estrutura dos pórticos do Museu de Arte Moderna do Rio e Janeiro contribuiu não só para a estética, funcionando de forma verdadeira e exposta, compondo harmoniosamente a arquitetura do edifício como também contribuiu para o desempenho estrutural da construção, permitindo vigas e lajes mais baixas, vãos maiores e ausência de colunas internas, gerando economia, funcionalidade e beleza a uma obra pública de grande importância social e simbólica para a cidade do Rio de Janeiro.

4.3 3º Momento: Brasília

4.3.1 Igrejinha N. S. de Fátima (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)

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.

A essa necessidade, de um templo religioso para os católicos que haviam ocupado a região, se juntou um desejo particular da família Kubitschek. E 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 em razão de uma doença rara que acometia Márcia Kubitschek, filha do casal Kubitschek (INOJOSA, 2010).

Segundo a promessa, 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. Ao invés de um grande templo para 800 pessoas, optou-se por uma obra mais rápida, que pudesse ser construída em 100 dias.

A obra da Igrejinha ficou a cargo da construtora Ibira, sob a supervisão da Novacap e 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 (Figura 149).

Figura 149 – Imagem aérea da Igrejinha ainda em construção.



Fonte: TAMARIMI, 1997.

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 – foram 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.

A Arquitetura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima é muito simples, consiste em apenas três elementos básicos, mostrados na Figura 150 – 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. Essa simplicidade é observada por ARAKAKI (2012) na quantidade de desenhos usados no projeto arquitetônico da Igrejinha – cinco desenhos.

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

A parede 2 separa a pequena nave da sacristia e uma 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.

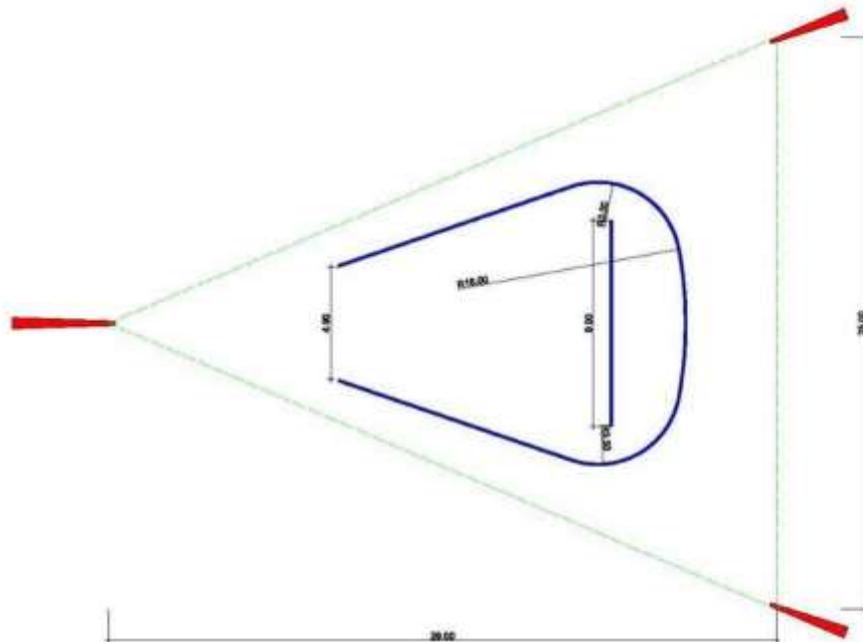
Externamente, três pilares sustentam a cobertura curva da igreja (Figura 151). Os dois pilares posteriores são iguais e um pouco menores que o pilar frontal. Os pilares têm formas que destacam a arquitetura da cobertura, pois tem a base muito larga e, em curva, vão diminuindo até encontrarem com as pontas da cobertura.

A cobertura da Igrejinha é o elemento que dá a ela toda sua plástica. Trata-se de uma laje triangular em curva, que à 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 cinco 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 centímetros, 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.

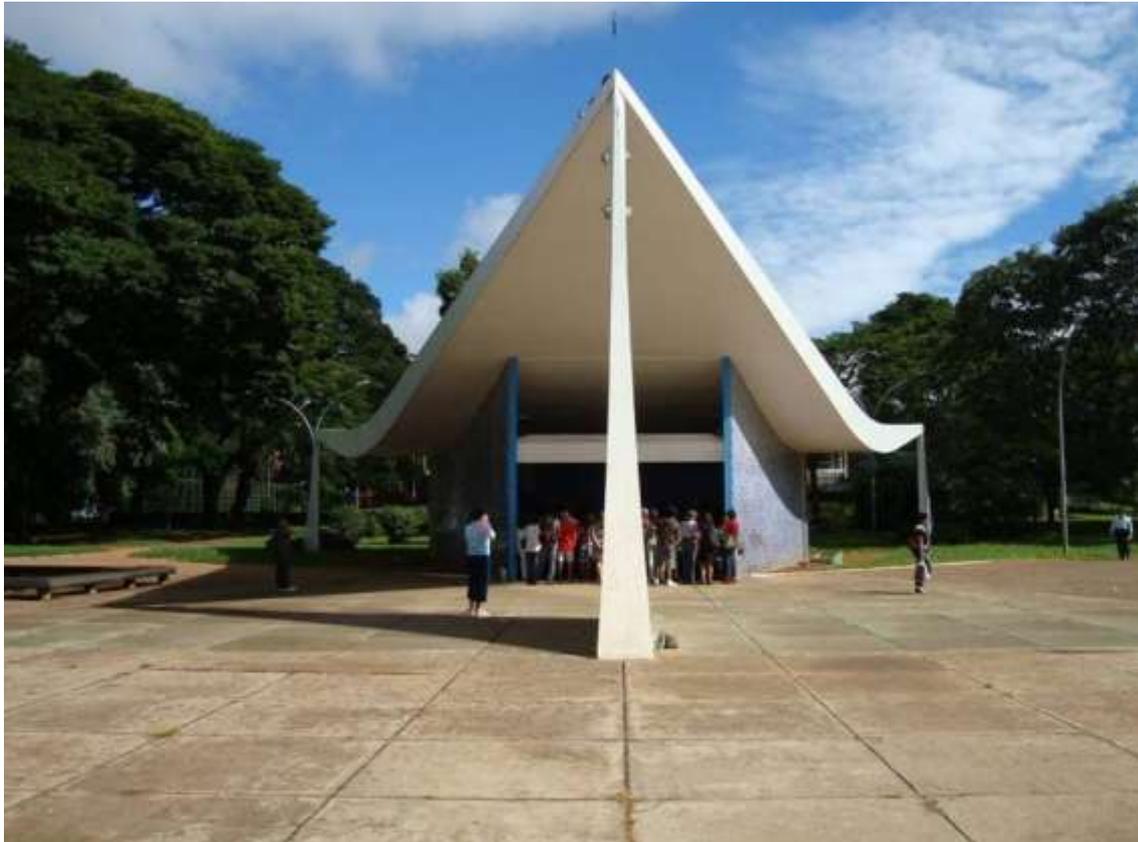
As vigas das laterais externas são responsáveis pelo desenho marcante da cobertura, que com a espessura de 90 centímetros na porção mais central da viga cria a sensação peculiar de leveza, à medida que diminui para as duas extremidades.

Figura 150 – Planta da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.



Fonte: Desenho do Autor – adaptado de planta original cedida pelo IPHAN-DF.

Figura 151 – Vista frontal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.



Fonte: 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.

Os painéis (Figura 152) 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 152 – Painel de azulejo na lateral da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima e detalhes dos azulejos.



Fonte: Fotos do Autor.

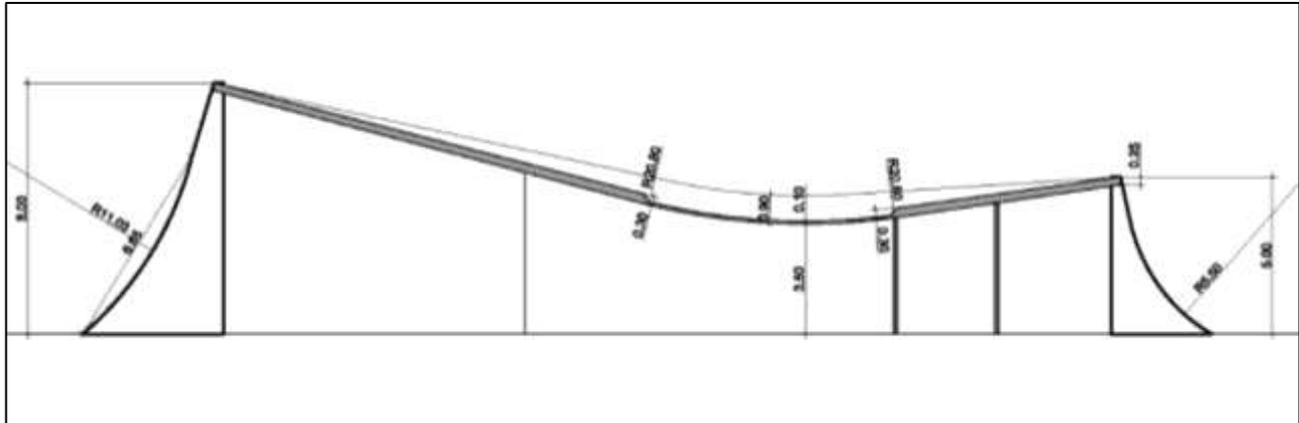
Estrutura

A estrutura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima acompanha a simplicidade de sua arquitetura já que os elementos que compõem o sistema estrutural – pilares, vigas e lajes, além das paredes estruturais são os mesmos que compõem sua arquitetura. A inventividade do Engenheiro Joaquim Cardozo está na forma como foram utilizados esses elementos (INOJOSA, 2010). Percebe-se a relação entre a arquitetura e a estrutura nos desenhos esbeltos para pilares e plano de cobertura, sugeridos por Niemeyer e acompanhados por Cardozo, resultando em pilares engastados na base e rotulado nas ligações com as vigas (ARAKAKI, 2012).

A estrutura, feita toda em concreto armado, é formada por uma cobertura triangular com efeito visual de casca, de espessura variável, sustentada por cinco vigas, curvas e com alturas variadas, apoiadas em três pilares de base larga e com a extremidade muito esbelta, além de duas paredes estruturais, a primeira em curva e a segunda transversal às vigas da cobertura. O corte

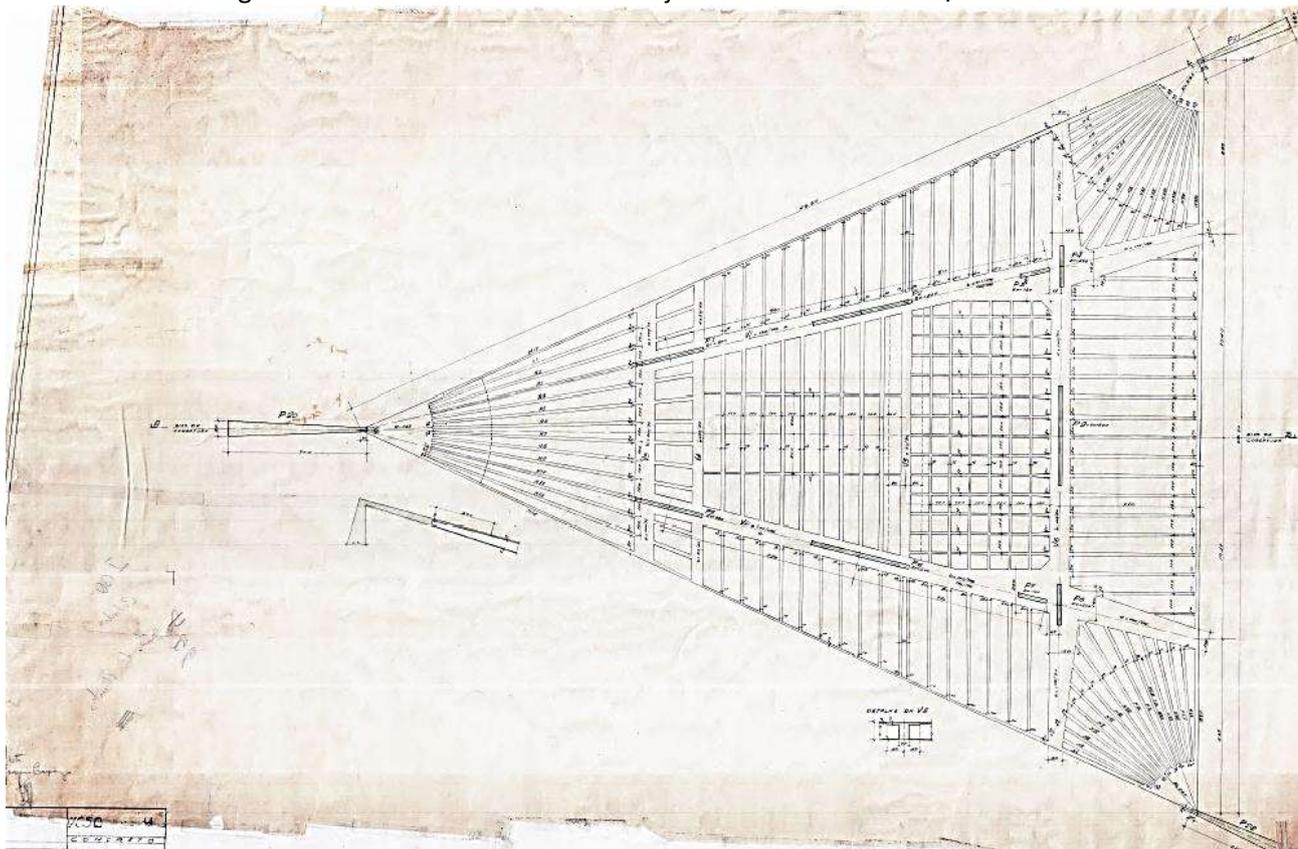
transversal da Figura 153, ilustra todos esses elementos estruturais. Na Figura 154, temos a planta de forma da cobertura, que mostra o emprego de nervuras e vigas faixa na laje e a presença das vigas.

Figura 153 – Corte Longitudinal da Igrejainha Nossa Senhora de Fátima.



Fonte: Desenho do autor – adaptado de planta original (IPHAN).

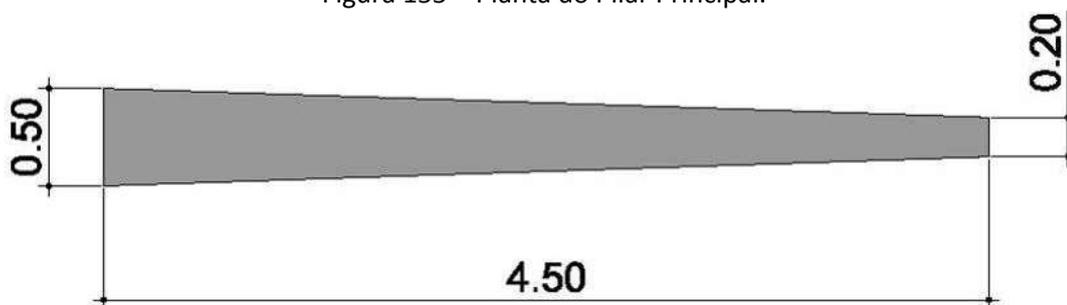
Figura 154 – Fôrma da cobertura. Projeto de Estruturas. DAU/NOVACAP.



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal – em ARAKAKI, 2012 (pag. 94).

O pilar principal, que fica no centro da fachada da Igreja possui uma seção de 4,5 metros por 0,5 a 0,2 metros na base, como mostra a Figura 155 e 8 metros de altura. No ponto mais alto, onde o pilar encontra a ponta da cobertura ele tem a seção de 0,3 metros por 0,2 metros (Figura 156).

Figura 155 – Planta do Pilar Principal.



Fonte: Desenho do autor – adaptado de planta original (IPHAN).

Figura 156 – Detalhe do encontro do Pilar principal com a cobertura.



Fonte: 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 as 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 153 que a laje de cobertura pode ser dividida em 3 partes distintas.

A primeira se apoia 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 apoia na parede estrutural interna.

Da mesma forma, a ponta da laje, que se apoia no pilar principal possui espessura de 25 centímetros nesse ponto e inclina-se até chegar aos 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 apoiam 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 aparente 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 157).

Figura 157 – Vista posterior da Igrejinha – não se nota a presença de vigas na cobertura.



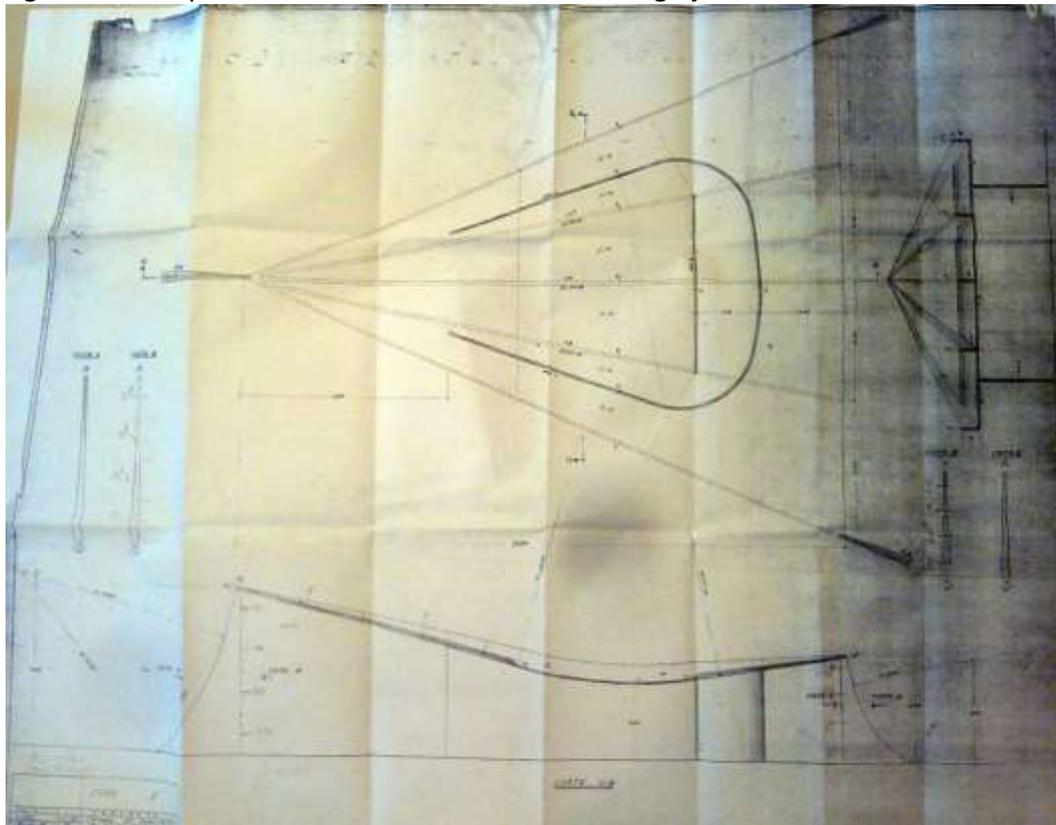
Fonte: Foto do Autor.

Análise Estrutural

A análise estrutural do sistema da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima foi feita pelo autor como parte da dissertação de Mestrado apresentada à Universidade de Brasília em 2010. Para essa análise foram utilizados os dados coletados a partir de cópias de desenhos originais da construção (Figura 158) cedidas pelo Iphan/ DF – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional do

Distrito Federal. As dimensões dos elementos estruturais da edificação foram organizadas e sistematizadas conforme Tabela 4.

Figura 158 – Cópia da Planta e Cortes da Estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima.



Fonte: IPHAN/DF. Foto do Autor.

Tabela 4 - Dimensões da estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000 v20.

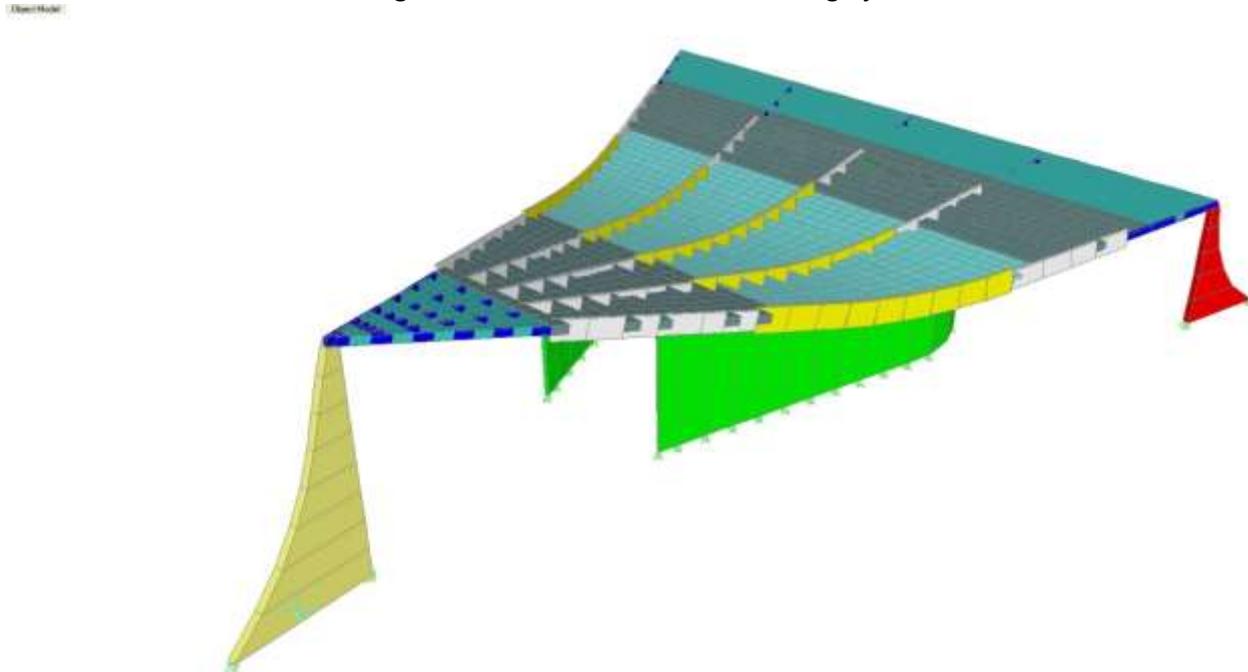
Elemento	A (m)	B (m)	Cor
1.1. Pilar Frontal (trecho 1)	3,30	0,45	Amarelo
1.2. Pilar Frontal (trecho 2)	1,80	0,30	Laranja
1.3. Pilar Frontal (trecho 3)	1,00	0,25	Vermelho
1.4. Pilar Frontal (trecho 4)	0,50	0,20	Magenta
2.1. Pilares Posteriores (trecho 1)	2,30	0,45	Amarelo
2.2. Pilares Posteriores (trecho 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	Branco
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)

Fonte: INOJOSA, 2010.

Ao colocar os dados da Tabela 4 no programa SAP 2000 temos o sistema estrutural representado na perspectiva abaixo (Figura 159). Para esse estudo de caso, em que se prioriza a análise do sistema estrutural, será considerado apenas o peso próprio da estrutura.

Figura 159 – Modelo da estrutura da Igrejinha.

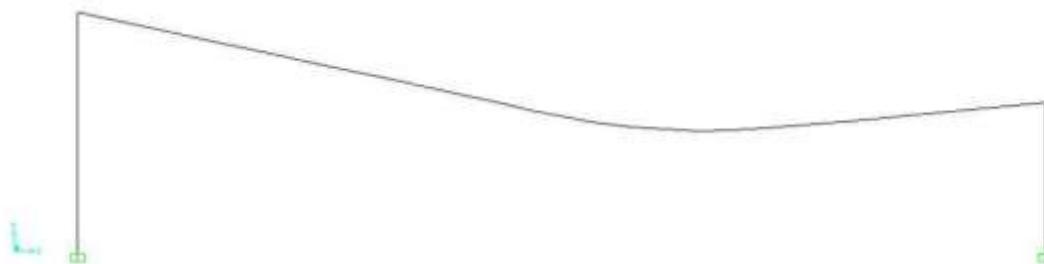


Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

- **As Vigas da Cobertura**

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 160).

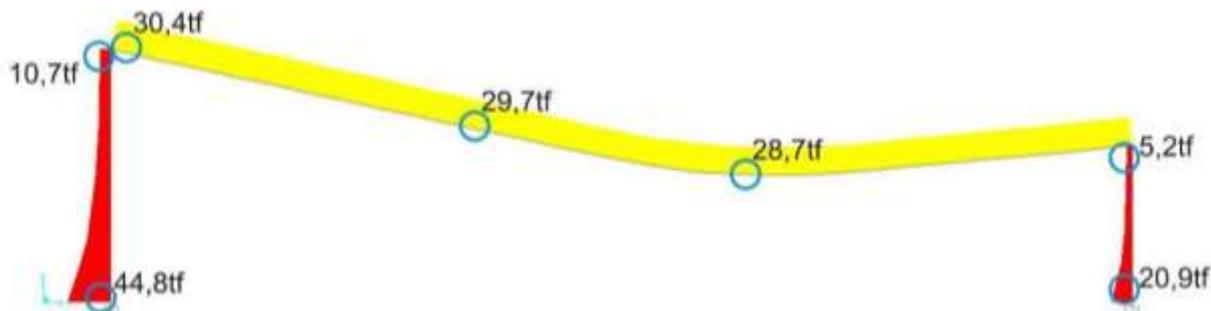
Figura 160 – Corte do sistema – viga-pilar – simplificado.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Na Figura 161 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 161 – Diagrama de Forças Normais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Observando o diagrama de momentos fletores (Figura 162) podemos observar que o momento é maior no centro do vão, parte onde a viga apresenta maior altura (90cm).

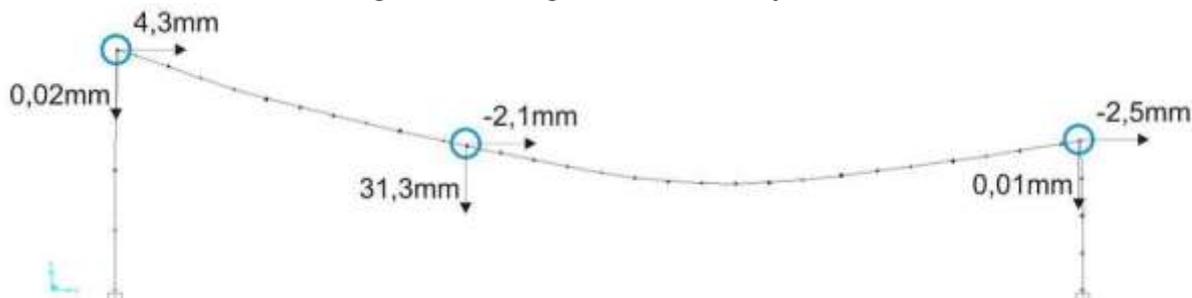
Já o Diagrama de Deformações (Figura 163) mostra que o maior deslocamento está no centro do vão, onde a deformação aponta 31,3mm na direção vertical.

Figura 162 – Diagrama de Momentos Fletores.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000.

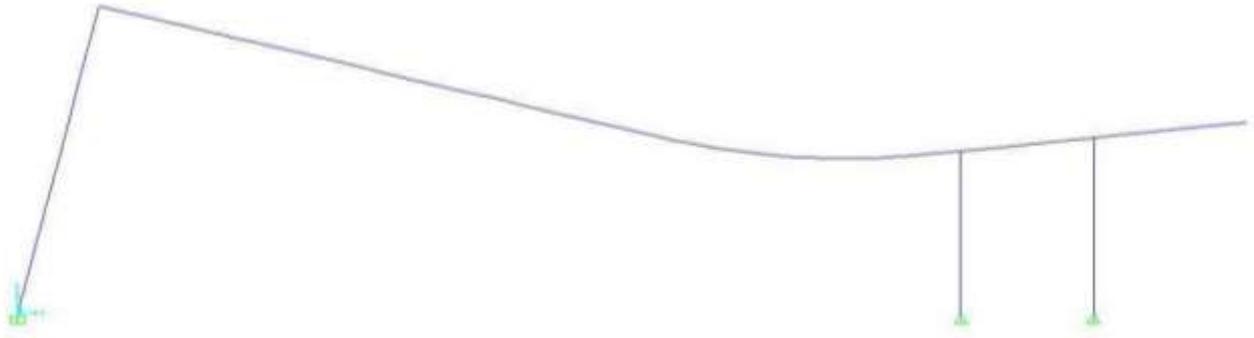
Figura 163 – Diagrama de Deformações.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

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 164). Nessa parte da estrutura a viga central fica em balanço na parte posterior da cobertura.

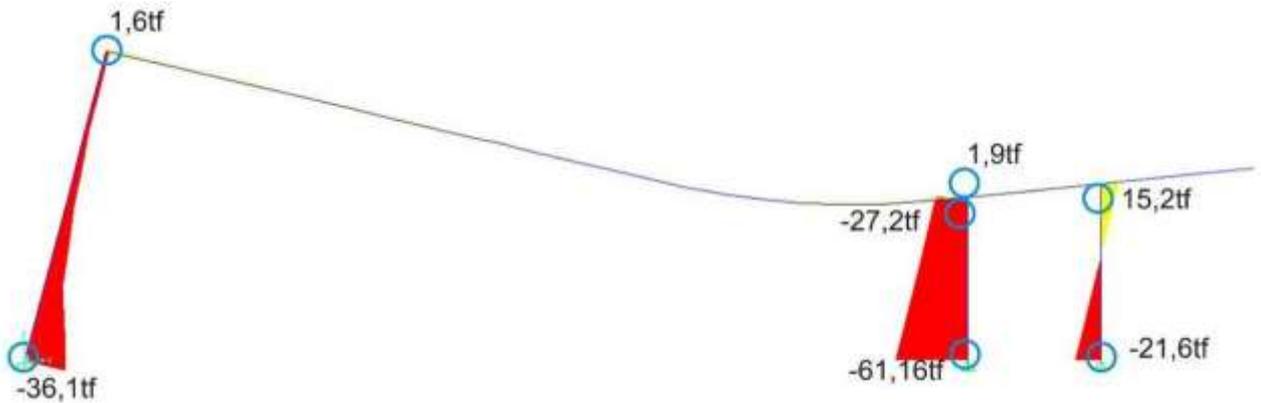
Figura 164 – Corte do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

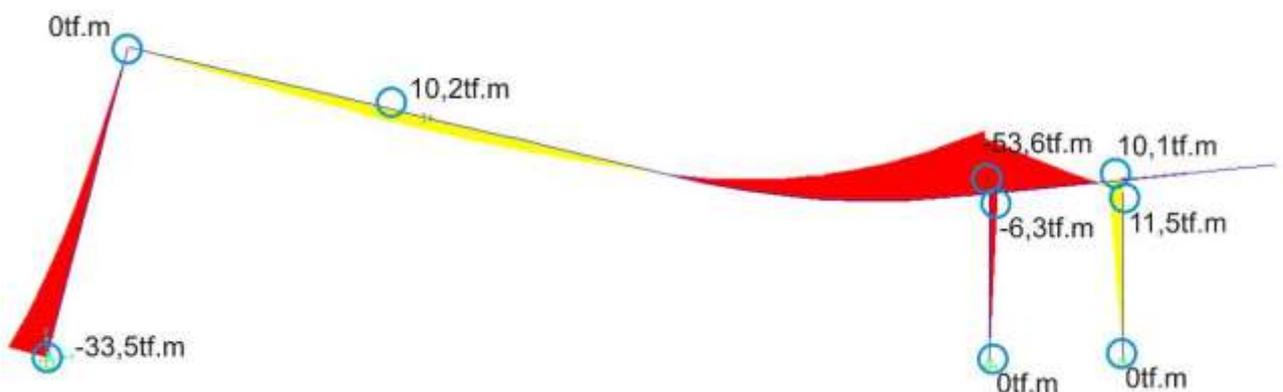
Podemos observar que, assim como no caso anterior, existe uma maior concentração de forças de compressão na base dos apoios – pilar e paredes, porém na viga central existe uma força constante muito menor, mas ainda praticamente constante (Figura 165). Já o Diagrama de Momento Fletor (Figura 166) nos mostra valores maiores de momento negativo nos encontros da viga central com as paredes estruturais – principalmente na parede 2 (525,64KN.m ou 53,6Tf.m).

Figura 165 – Diagrama de Forças Normais do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

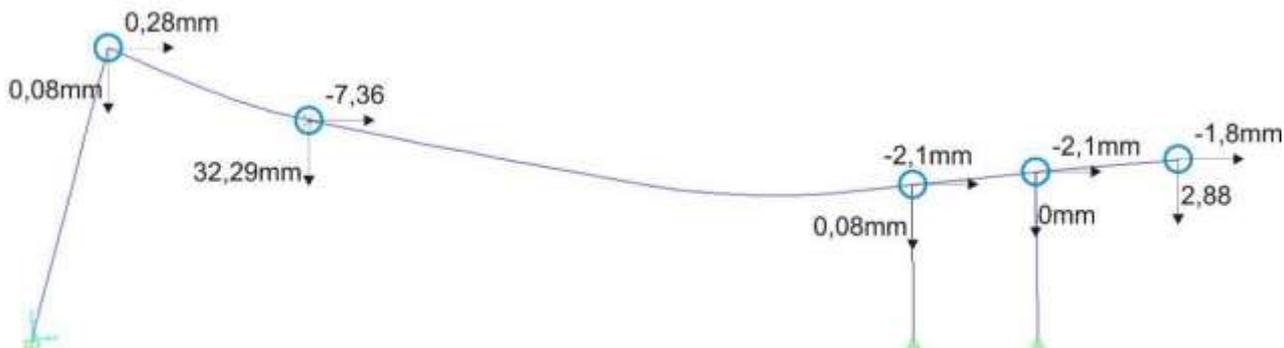
Figura 166 – Diagrama de Momentos Fletores do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

O Diagrama de deformações (Figura 167) 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), o que nos mostra o equilíbrio do sistema projetado.

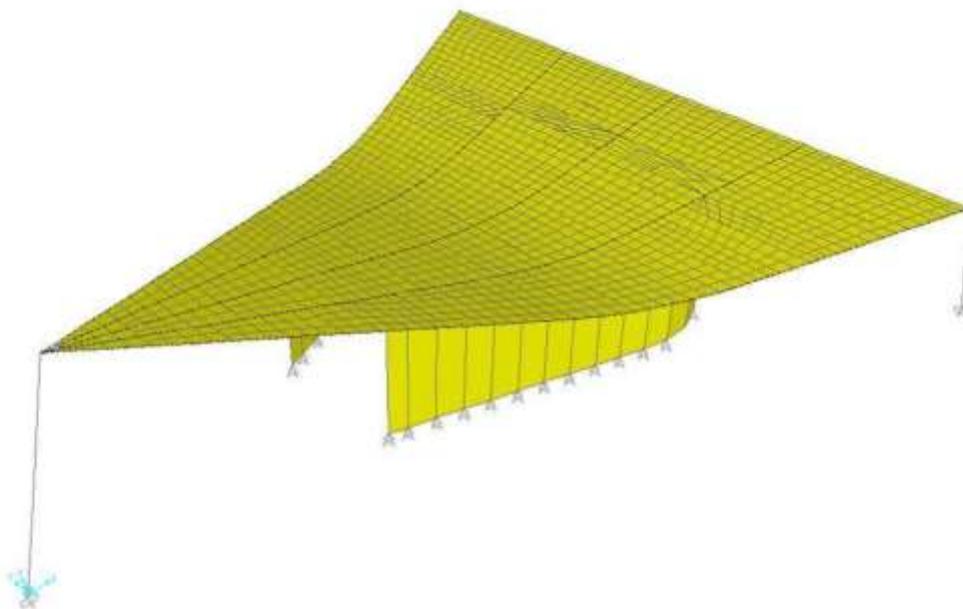
Figura 167 – Diagrama de Deformações do conjunto formado pelo pilar frontal, viga central e paredes estruturais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Utilizando o programa SAP 2000 para analisarmos o sistema estrutural completo da Igreja (Figura 168), podemos observar claramente as relações do sistema estrutural com a forma adotada para a arquitetura da Igreja Nossa Senhora de Fátima.

Figura 168 – Sistema Estrutural da Igreja Nossa Senhora de Fátima.

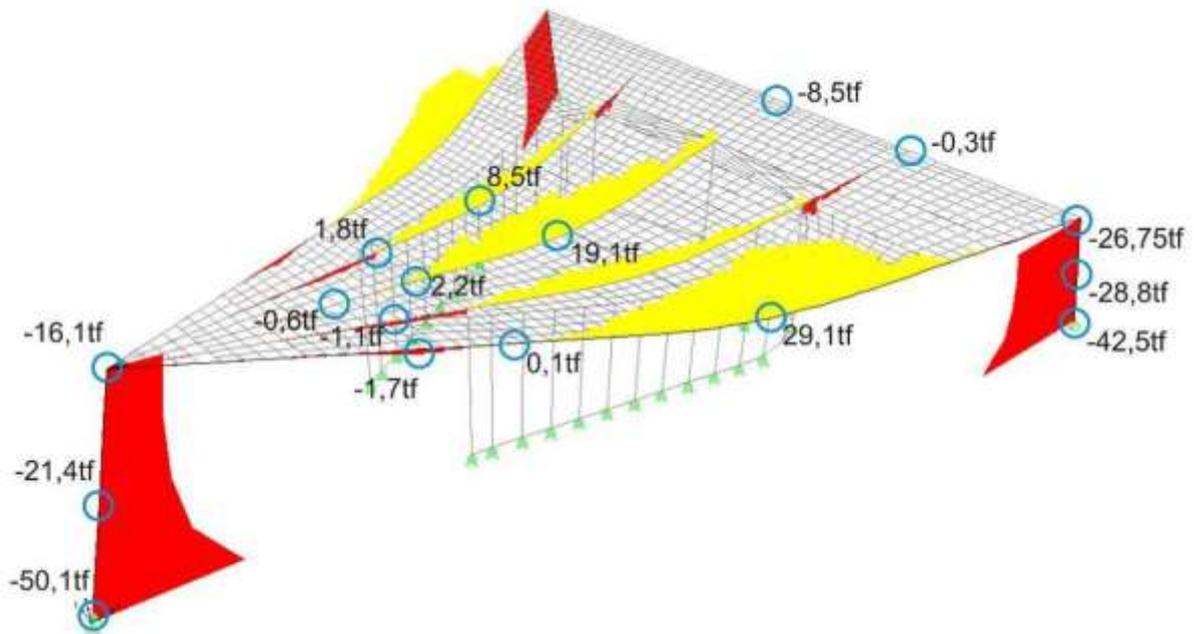


Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Na Figura 169 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

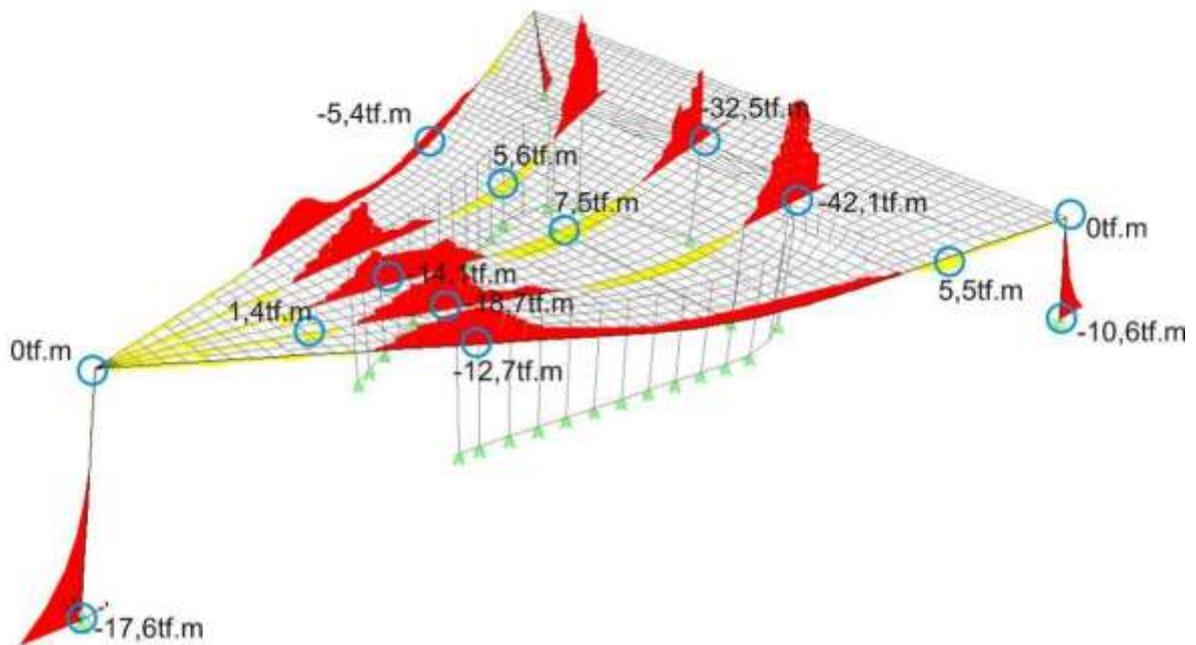
a parede estrutural. Notamos também nesse diagrama que nos trechos onde as vigas centrais estão em balanço ocorre uma força de compressão próxima ao apoio na parede estrutural.

Figura 169 – Diagrama de Forças Normais.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Figura 170 – Diagrama de Momentos Fletores.



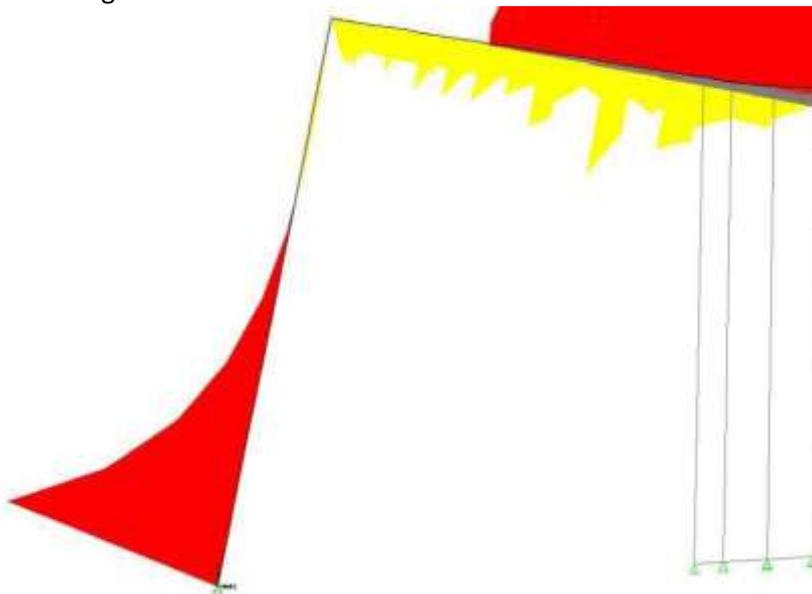
Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

- **Os Pilares**

Observando os Diagramas de Momento Fletores desse sistema estrutural (Figura 170) podemos constatar que a forma da Igrejinha está relacionada diretamente com seu sistema estrutural. O gráfico mostra 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. Basta notarmos como o

desenho do diagrama de Momentos Fletores no pilar se assemelha com a forma que o arquiteto utilizou nesse elemento (Figura 171 e Figura 172).

Figura 171 – Diagrama de Momentos Fletores – detalhe do Pilar Frontal.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Figura 172 – Pilar Frontal da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.

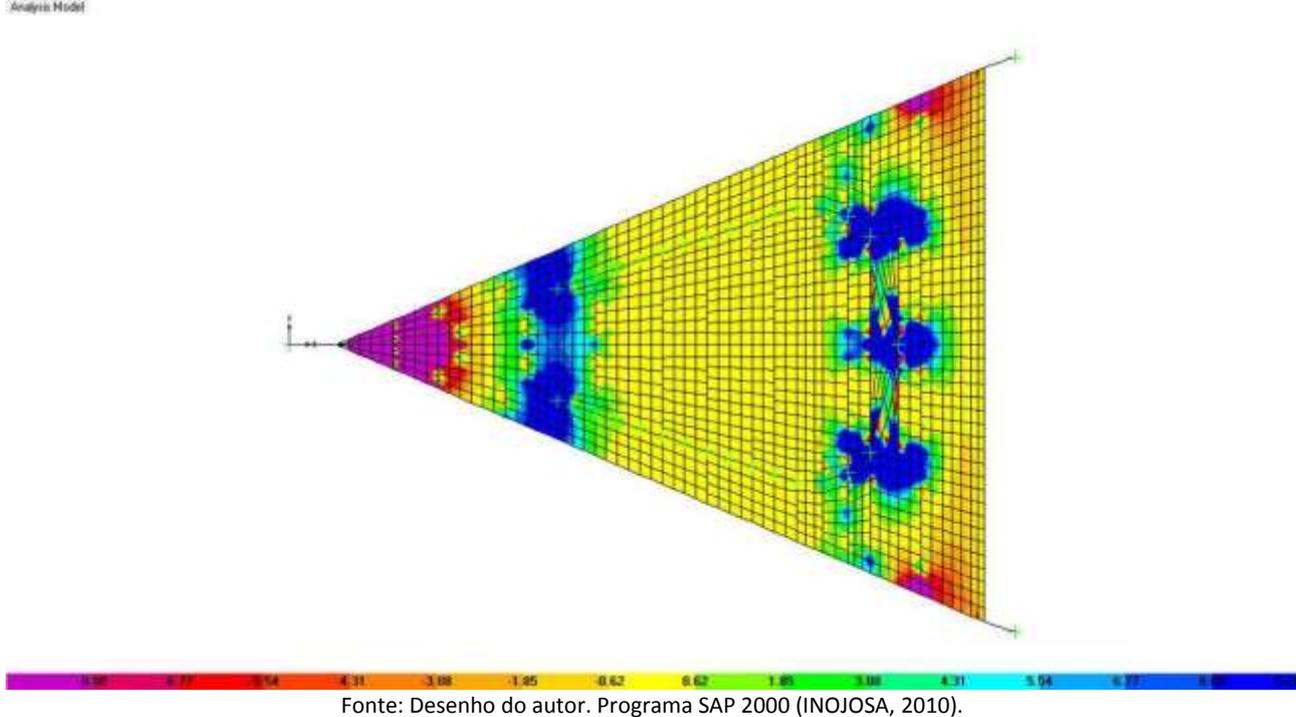


Fonte: Foto do Autor.

- **As Lajes da Cobertura**

O diagrama abaixo (Figura 173) mostra 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.

Figura 173 – Diagrama de Momentos Fletores na direção “y” na laje da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima.

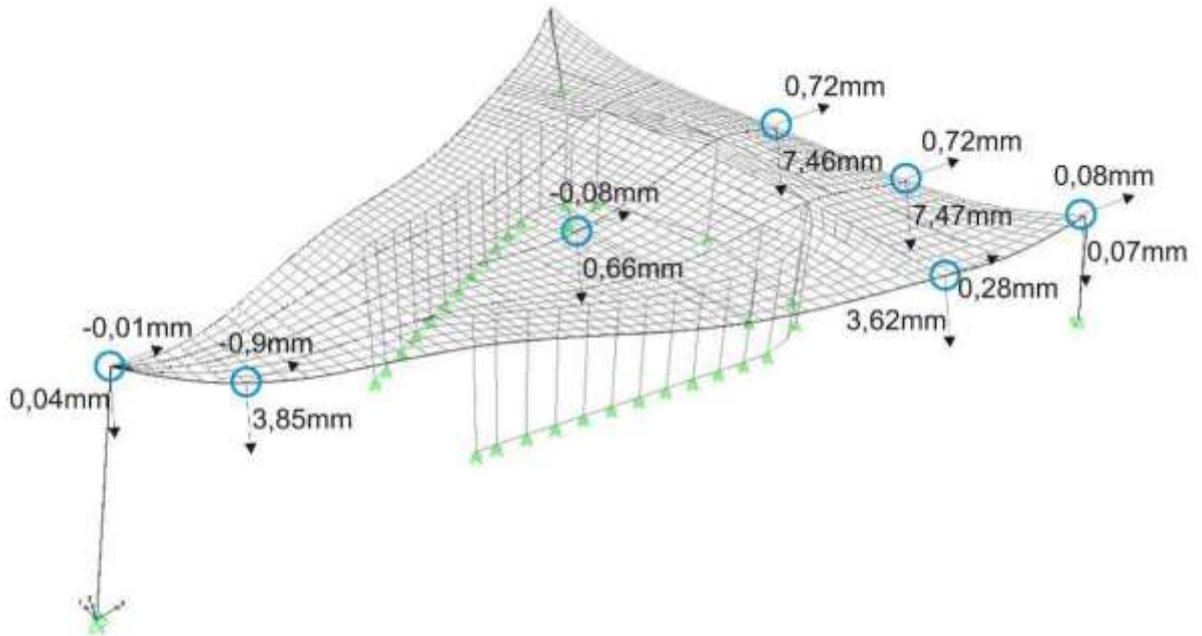


O Diagrama de Deformações (Figura 174) mostra que os deslocamentos nesse sistema são mínimos, o que pode nos indicar que a estrutura da Igrejinha esteja superdimensionada, a favor da segurança estrutural e do resultado estético.

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. A presença definidora do sistema estrutural sempre acompanhou seus trabalhos, que exploram com simplicidade e experiência os limites e as possibilidades do concreto armado. A “Igrejinha” Nossa Senhora de Fátima, em Brasília, construída em 1958 é um exemplo disso.

Na estrutura da Igrejinha, composta de poucos elementos, que definem por completo a arquitetura da pequena capela, podemos destacar, com o auxílio das análises feitas no programa computacional, a função estrutural de cada elemento que visualmente tem grande função estética (INOJOSA, 2010). É possível concluir, que, tanto nos pilares quanto na espessura variável da cobertura, o sistema estrutural é o elemento que define a forma final da Igrejinha.

Figura 174 – Diagrama de Deformações.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

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.

4.3.2 Câmara dos Deputados (Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo)

É notório que a relação com a estrutura sempre marcou o trabalho de Oscar Niemeyer, ele sempre exigiu muito de seus calculistas, desenvolvendo a cada projeto novas formas para a estrutura (OHTAKE, 1987). Nos edifícios monumentais de Brasília a utilização do potencial técnico do concreto armado e a sintonia do arquiteto com o engenheiro Joaquim Cardozo permitiram a criação de grandes edifícios que pousam levemente sobre o solo.

Dentre as obras de Oscar Niemeyer que marcaram esse momento de Brasília, podemos destacar a Cúpula invertida que forma o plenário da Câmara dos Deputados no Palácio Nereu Ramos (Figura 175), mais conhecido como Congresso Nacional. Essa obra representou um desafio estrutural para Joaquim Cardozo, pois, além de cálculos extremamente complexos e sem referências na arquitetura vigente tinha prazos mínimos para ser resolvida, sendo necessárias investigações imediatas e as vezes até antecipadas (SANTANA, 1998).

Arquitetura

Na arquitetura do Congresso nacional Oscar Niemeyer optou por separar as duas casas – Câmara dos Deputados e Senado Federal – criando cinco volumes. Dois volumes verticais em 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, integrando o Congresso Nacional com a Praça dos Três Poderes, liberando a vista do horizonte e destacando os dois principais volumes do projeto: as cúpulas – demonstrando a hierarquia que Niemeyer queria imprimir ao conjunto (NIEMEYER, 2000).

Figura 175 – Congresso Nacional, em Brasília, 1960, de Oscar Niemeyer.



Fonte: Foto do Autor.

A cúpula do Senado, típica cúpula de cobertura que cobre um vão de 39 metros, retrata um local de reflexão, serenidade, ponderação e equilíbrio.

A Cúpula da Câmara, virada para cima, representando um plenário aberto ao povo (MOREIRA, 2007). Ela tem 62 metros na cobertura e 30,70 metros na base que se apoia 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).

O Congresso Nacional é um dos monumentos de maior destaque dentre os edifícios de Brasília, não só pelo porte das torres ou pela localização, no centro visual do Eixo Monumental, mas principalmente pelo arrojado estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados. A inventividade nas formas das grandes cúpulas do Congresso Nacional impressionou grandes nomes da arquitetura mundial, como Le Corbusier, que ao subir a rampa do Congresso disse a Ítalo

Campofiorito: “Aqui há invenção! ” (NIEMEYER, 2000). O próprio Niemeyer destacava o caráter inovador da sua arquitetura:

“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).

Estrutura

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

A estrutura em concreto armado apresenta uma grande quantidade de aço, circulando a estrutura em forma de anéis (Figura 176). Esse sistema forma a primeira casca da cúpula, descrita por Joaquim Cardozo como sendo limitada pela superfície de uma “zona de elipsoide de revolução, abaixo do equador” (CARDOZO, 1965) e onde está apoiada a arquibancada da galeria do plenário.

Sobre essa primeira casca apoia-se uma segunda, uma superfície de um tronco de cone invertido, que por apoiar-se no ponto de tangência do elipsoide de revolução da primeira casca cria uma continuidade visual perfeita aparentando ser um só elemento estrutural (Figura 177). O que indica ser essa a “tangente” a qual se referia Joaquim Cardozo ao telefonar para Oscar Niemeyer.

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

Esse sistema – terceira casca, laje forro e laje superior – está interligado através de uma série de pilares e tirantes de concreto armado de seção quadrada 10x10cm, que apoiam a laje superior na terceira casca e sustentam nesta, como tirantes, a laje de forro. 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.

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. Esta laje, é formada por uma grande grelha de concreto armado e é sustentada por um conjunto de pilares visíveis nos salões do nível do plenário e, logo abaixo da cúpula da Câmara dos Deputados, por paredes de concreto que fazem o fechamento do plenário – cortinas de concreto. As vigas que formam a grelha de cobertura da esplanada possuem altura

variável, de 0,4 metros nas extremidades até 2 metros de altura na base onde se apoia o anel de compressão, permitindo um túnel de ligação entre a Câmara e o Senado.

Figura 176 – Foto da Construção da Cúpula da Câmara.



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal.

Figura 177 – O ponto de tangência entre a primeira e a segunda casca visto externamente e internamente.



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal e foto do Autor.

O corte na Figura 178 mostra os elementos descritos acima e identifica os elementos estruturais criados pelo engenheiro Joaquim Cardozo para viabilizar esse complexo sistema estrutural, numerados da seguinte forma:

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 apoia-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 elipsoide 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 apoia-se a estrutura de cobertura;
7. Segunda Casca, uma superfície de um tronco de cone invertido;
8. Laje Forro;
9. Tirantes do Forro, sustentação da laje forro;
10. Terceira Casca, uma cúpula côncava formada por uma calota esférica;
11. Pilares Superiores, que apoiam 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 178 – Corte Transversal da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenho do autor no software AutoCad, baseado em material disponível nos arquivos da Câmara dos Deputados.

Análise Estrutural

As dimensões adotadas para a análise estrutural da Cúpula da Câmara dos Deputados estão na Tabela 5 e foram extraídas dos desenhos originais do acervo da Câmara (Figura 179) e de medidas tomadas no local pelo autor ao desenvolver os trabalhos de campo para a dissertação de mestrado (INOJOSA, 2010). Esses dados usados para modelar a estrutura no software SAP 2000, gerando o modelo conforme mostrado na Figura 180.

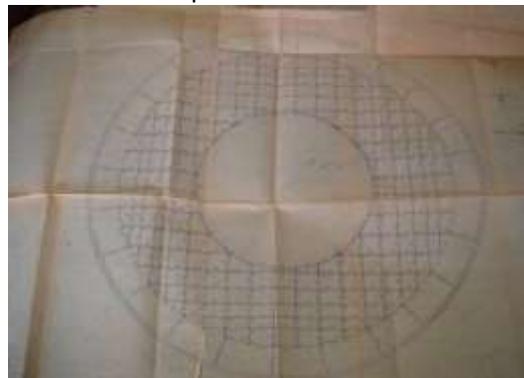
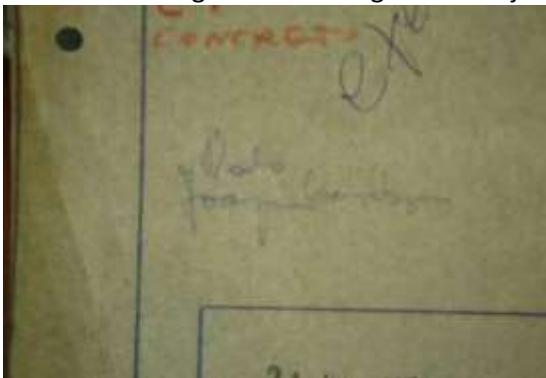
Tabela 5 - Dimensões da estrutura da Cúpula da Câmara dos Deputados, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.

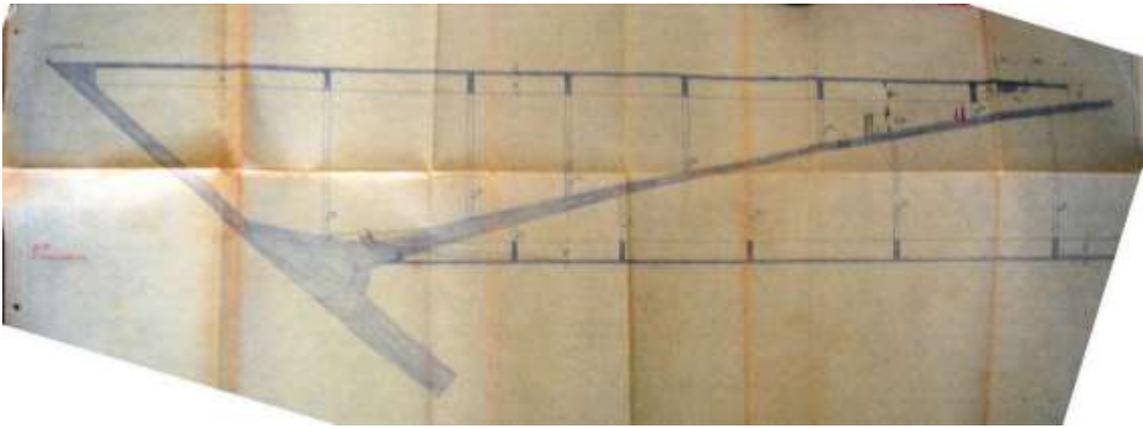
Elemento	A (m)	B (m)	Cor
1. Pilares Inferiores	1,10	0,40	
2. Cortinas de Concreto	0,35	1,00	
3.1. Vigas de Sustentação (trecho 1)	0,15	2,20	
3.2. Vigas de Sustentação (trecho 2)	0,15	1,50	
3.3. Vigas de Sustentação (trecho 3)	0,15	0,79	
4.1. Anel Inferior (trecho 1)	-	1,10	
4.2. Anel Inferior (trecho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

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

Fonte: INOJOSA, 2010.

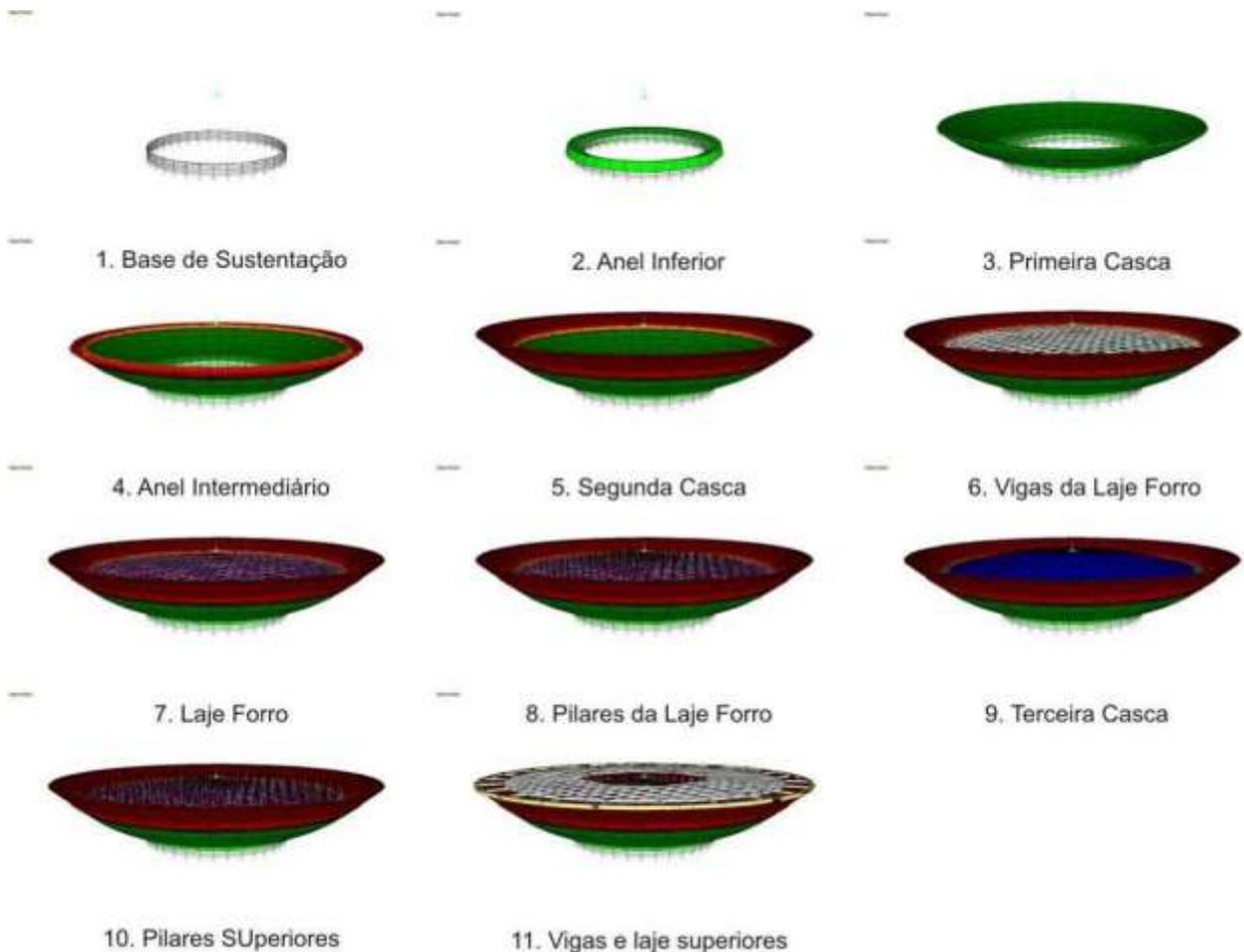
Figura 179 – Imagens do Projeto de Estrutura da Cúpula Invertida.





Fonte: Arquivo da Câmara dos Deputados. Fotos do Autor.

Figura 180 – Montagem passo a passo do sistema estrutural da Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenhos do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

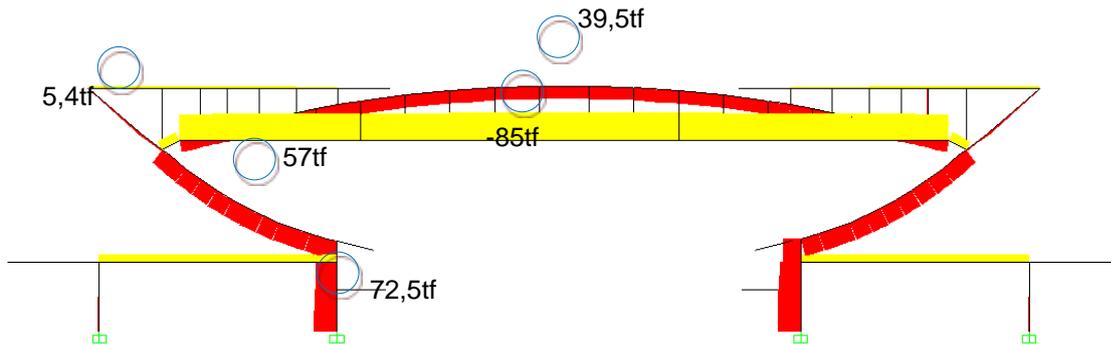
- **Primeira e segunda casca**

Para identificar as funções estruturais de cada elemento do sistema estrutural montado por Joaquim Cardozo, inicialmente observamos o modelo simplificado em 2 dimensões como um corte transversal, considerando o sistema engastado na base das cortinas de concreto e nos pilares no nível do Plenário. Nessas análises iniciais tomaremos os resultados numéricos como referências qualitativas e comparativas, já que os valores não representam os resultados obtidos com o modelo

completo tridimensional. Na sequência, são observados os resultados utilizando o modelo completo.

O diagrama de forças normais (Figura 181), mostra que na Primeira Casca (base da Cúpula invertida) existe grande esforço de compressão, assim como nas cortinas de concreto, no encontro da primeira casca com a cortina e 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).

Figura 181 – Diagrama de Forças Normais do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.

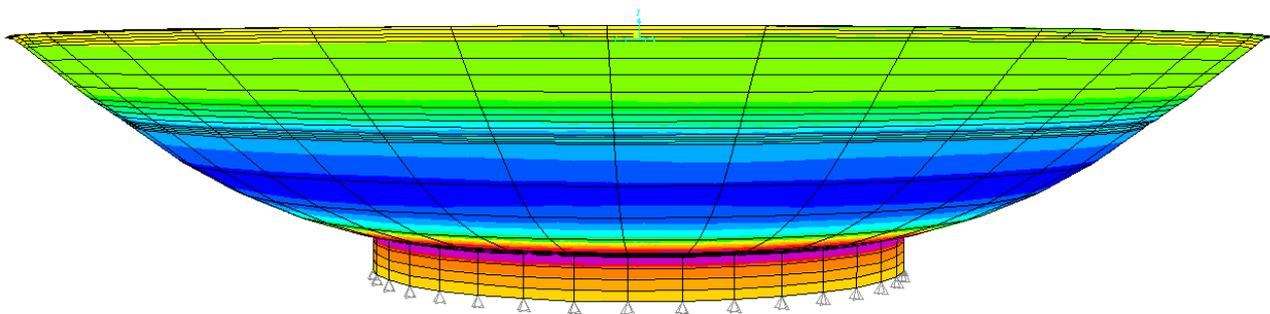


Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Na Figura 182, o diagrama de forças normais do sistema completo, observamos da mesma forma que a análise inicial, uma concentração de forças de compressão (região mais azulada) na primeira casca, base da cúpula invertida, menores que na região da segunda casca (verde), que tangencia a primeira no ponto onde se encontra o anel intermediário.

Figura 182 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – Vista externa das cascas de concreto.

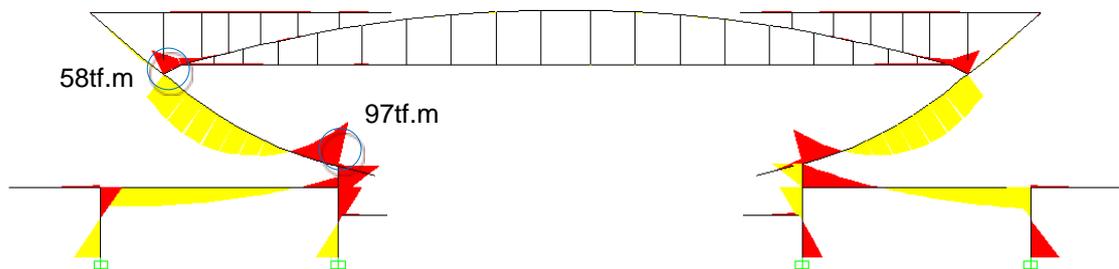
Analysis Model



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

A Figura 183 mostra o diagrama de momento fletor para a simulação do sistema estrutural da cúpula como um corte bidimensional. Nesse diagrama notamos que a Primeira Casca apresenta um grande momento principalmente próximo ao engaste na base (Anel Inferior), já a segunda parte da Cúpula (Segunda Casca) não apresenta grande momento, pois esta faz parte do conjunto que podemos descrever como cobertura, formado pela laje forro, terceira casca e pilares, que será analisado a seguir. Esses dados são observados também do modelo tridimensional (Figura 184) onde notamos também que o momento aumenta consideravelmente próximo ao encontro das duas cascas (azul), onde está o anel intermediário.

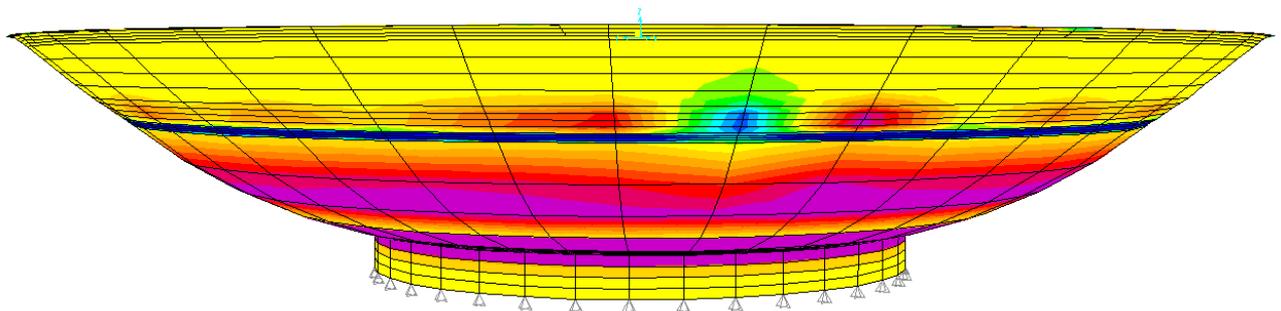
Figura 183 – Diagrama de Momento Fletor do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Figura 184 – Diagrama de Momento Fletor na direção X. Cúpula Invertida da Câmara dos Deputados.

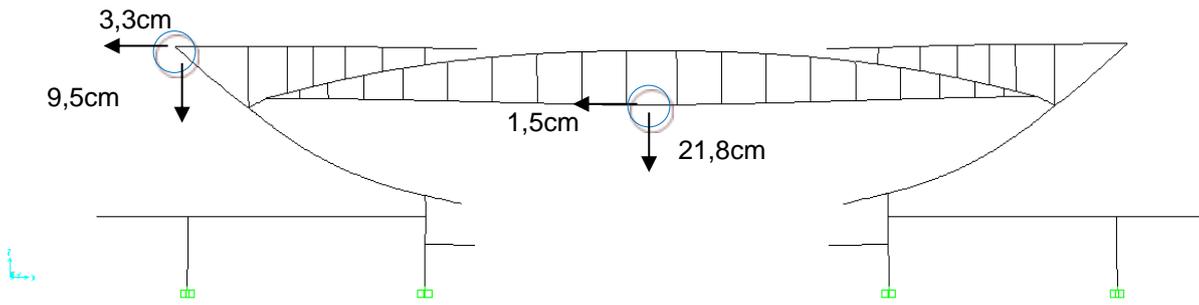
Analysis Model



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Analisando os deslocamentos apresentados pelo modelo simplificado (Figura 185) 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.

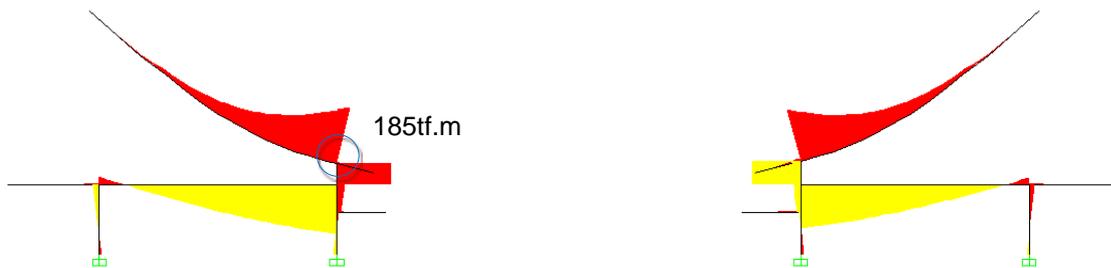
Figura 185 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural simplificado da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Podemos usar os dados mostrados acima para analisarmos a estrutura de forma comparativa com um sistema estrutural sem a cobertura, apenas com a primeira casca e a segunda casca soltas. O diagrama de momentos fletores (Figura 186) 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 anterior.

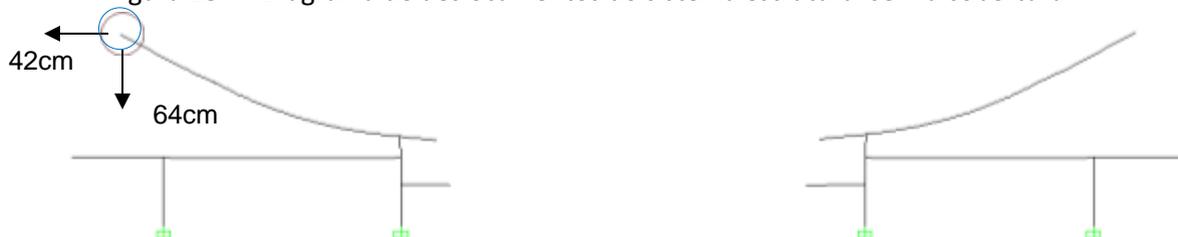
Figura 186 – Diagrama de momento fletor do sistema estrutural sem a cobertura.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Na Figura 187, 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, o que evidencia que a cobertura da cúpula, principalmente a laje forro, de apenas 6cm de espessura tem uma importante função estrutural.

Figura 187 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural sem a cobertura.

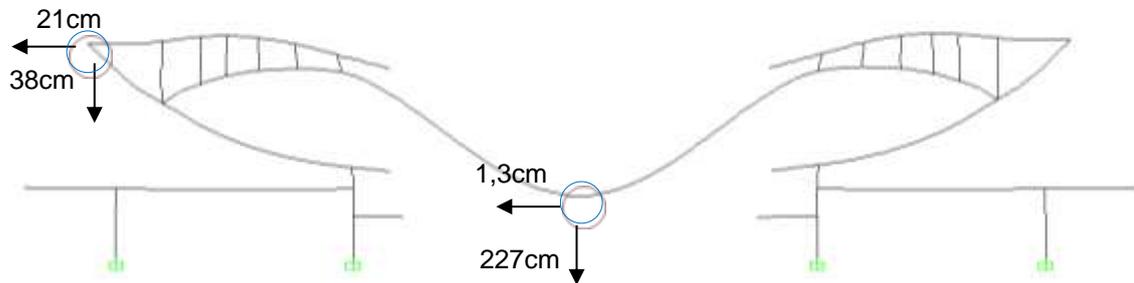


Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

A Laje Forro 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 funciona com um tirante. Para corroborar com essa conclusão observarmos no diagrama de deslocamento da estrutura sem apenas a Laje

Forro (Figura 188) deslocamentos bem maiores na extremidade da cúpula invertida e um enorme deslocamento da terceira casca (cúpula de cobertura).

Figura 188 – Diagrama de deslocamentos do sistema estrutural sem a laje forro.



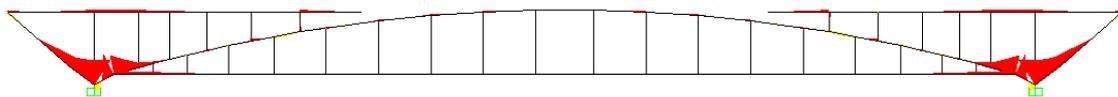
Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

- **Cobertura**

Nos diagramas mostrados acima identificamos a importância da cobertura – conjunto formado pela Laje Forro, os Tirantes da Laje Forro, a Terceira Casca (Cúpula de Cobertura) os pilares superiores e a Laje Superior. Analisaremos então, novamente de maneira qualitativa, essa parte da estrutura de forma isolada e bidimensional, fixando (engastados) os pontos de apoio do Anel Intermediário, comparando com os resultados do modelo completo.

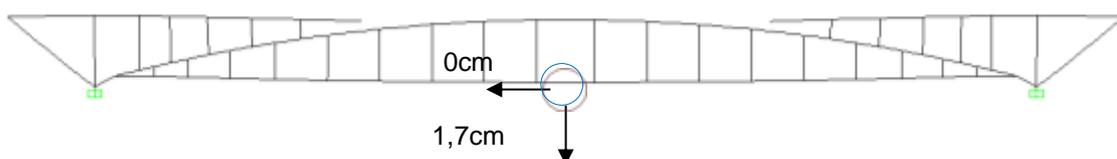
O diagrama de momento fletor (Figura 189) mostra que, isolando a cobertura os valores de momento apresentados se concentram na base de apoio do “arco” (terceira casca) e do “tirante” (Laje Forro). Já o diagrama de deformações (Figura 190) mostra que os deslocamentos nessa parte isolada da estrutura são quase desprezíveis.

Figura 189 – Diagrama de Momento Fletor do sistema simplificado da cobertura da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Figura 190 – Diagrama de Deformação do sistema simplificado da cobertura da Câmara dos Deputados.



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

Notamos aqui a semelhança do sistema estrutural da cobertura da Cúpula Invertida simplificada em corte com o sistema estrutural de uma ponte de sistema de arco sob tabuleiro. A Laje Superior sendo o tabuleiro da ponte, que se apoia sobre o arco (Terceira Casca), transferindo os esforços de compressão até o ponto de apoio, nesse caso o Anel de Apoio. Na montagem da Figura 191, apresentada pelo autor em 2010 vemos esta semelhança nas proporções – arco, vão e apoios – com a Ponte Salginatobel, situada em Schiers na Suíça, projetada em 1930 por Robert Maillart.

Figura 191 – Foto-montagem: Corte da Cúpula da Câmara do Congresso Nacional sobre imagem da Ponte Salginatobel de Robert Maillart.



Fonte: Desenho do autor em AutoCad, sobre foto da ponte. (INOJOSA, 2010).

Com o modelo tridimensional completo podemos analisar o funcionamento desses elementos estruturais no conjunto do sistema estrutural. Como na Figura 192 onde temos o diagrama de forças normais mostrando os esforços na Laje Forro. Podemos assim observar as forças atuantes nessa laje e a concentração de esforços no anel intermediário.

Na sequência (Figura 193) temos em destaque o diagrama de Forças Normais dos tirantes da laje forro e pilares superiores, onde notamos que os primeiros, sob a cúpula de cobertura, estão sob tração (amarelo), funcionando como tirantes para suportar a laje forro. Já os pilares superiores, apoiados na cúpula, estão sob compressão (vermelho), suportando a laje superior.

Figura 192 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – Vista interna, laje forro.

Analysis Model

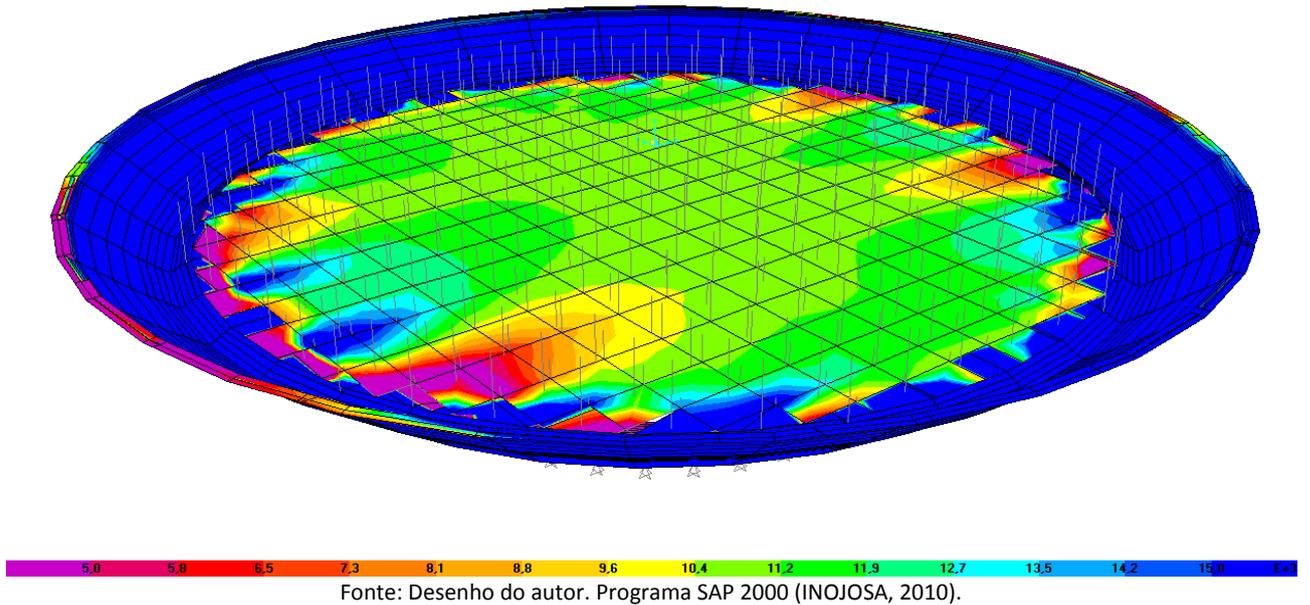
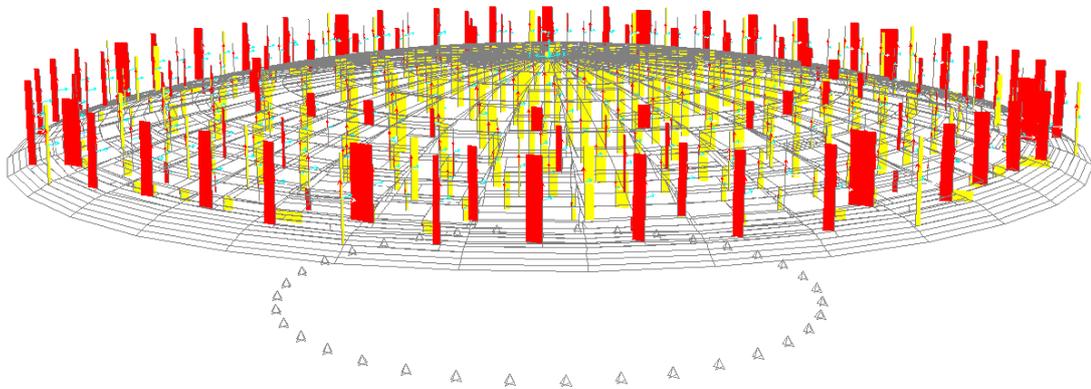


Figura 193 – Diagrama de Forças Normais da Cúpula Invertida – tirantes da laje forro e pilares superiores.

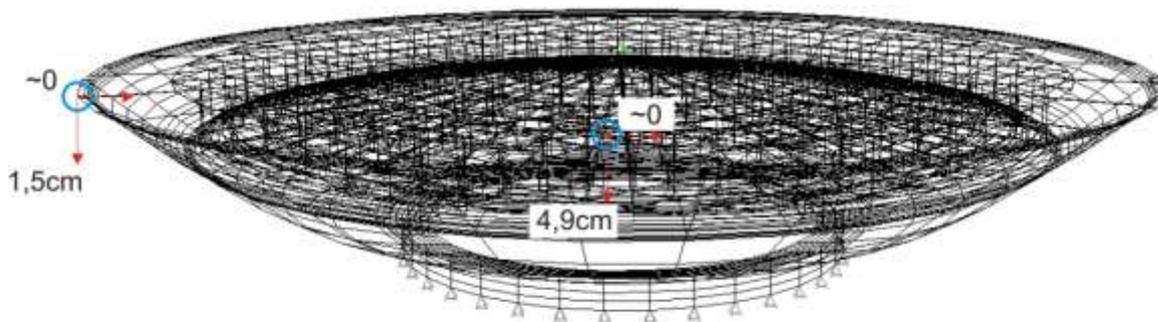
Analysis Model



Finalmente, podemos observar no diagrama de deslocamentos para a estrutura tridimensional, na Figura 194, que os deslocamentos no sistema estrutural completo são bem menores que os observados no corte simplificado. No ponto extremo do anel superior (indicado na figura) a deformação é de 1,5cm enquanto que no sistema simplificado era quase nove vezes maior. Já na laje forro o deslocamento que se apresentou excessivo no modelo bidimensional, com o sistema tridimensional 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 equilíbrio e na rigidez da edificação.

Figura 194 – Diagrama de deslocamentos da Cúpula Invertida.

Analysis Model



Fonte: Desenho do autor. Programa SAP 2000 (INOJOSA, 2010).

A Cúpula invertida é uma forma inusitada, que causa surpresa – característica considerada essencial para Niemeyer em uma arquitetura de boa qualidade – e exigiu que Joaquim Cardozo se valesse de várias soluções estruturais para viabilizar mais essa inovação. Nesse caso, as análises dos projetos com o auxílio do programa SAP 2000 possibilitaram novamente a identificação das funções estruturais de cada elemento, e assim observar como o conjunto de soluções idealizadas por Joaquim Cardozo tornaram viável uma estrutura inédita.

Fica claro que nesse momento histórico a unidade de pensamento entre o arquiteto e o engenheiro foi fundamental para o projeto e para a qualidade estética e formal do edifício. A integração do engenheiro Joaquim Cardoso com a leveza arquitetural e a proposta de buscar a beleza e não somente solucionar os aspectos funcionais, trouxeram soluções estruturais tão inovadoras e criativas quanto às formas inusitadas que a arquitetura sugeria.

Nesse momento, utilizando o sistema estrutural a favor do resultado estético, Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo criam soluções estruturais que permitem os pontos de apoio mínimos, que fazem com que os palácios aparentem não ter quase nenhum peso e apenas tocarem levemente o solo. Ou ainda vencem grandes desafios estruturais para conseguir resultados arrojados não só no Congresso Nacional, mas em outros exemplos como na Catedral de Brasília, onde a estrutura complexa e inovadora bastou para definir uma forma arquitetônica inédita.

4.4 4º Momento: Pós-Brasília

4.4.1 Edifício Vilanova Artigas – FAU-USP (Vilanova Artigas e Figueiredo Ferraz)

A Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUSP), situada na cidade de São Paulo, nasce da separação do curso de arquitetura das engenharias agrupadas na Escola Politécnica. Inicialmente, a faculdade ocupou um casarão, construído em estilo art nouveau, no bairro de Higienópolis, doado pela família Penteado, com a condição de abrigar uma faculdade de arquitetura, onde ficou de 1949 a 1968. Posteriormente, com a revisão da grade curricular e a necessidade de mais espaço, a faculdade foi remanejada para a Cidade Universidade, onde ganhou um novo edifício projetado pelos arquitetos João Batista Vilanova Artigas e Carlos Cascaldi.

Vilanova Artigas é reconhecido como um dos principais arquitetos brasileiros do século XX e provavelmente o mais influente no contexto da arquitetura paulista. Sua obra foi marcada por várias inflexões, decorrentes dos avanços tecnológicos, discussões das correntes artísticas nacionais e internacionais e questões políticas. No início de sua carreira, entre 1937 a 1945, seus projetos tiveram forte influência da obra de Frank Lloyd Wright, quando utilizava elementos como grandes beirais, integração entre interior e exterior, volumes salientes da volumetria do conjunto e materiais aparentes, como madeira e tijolos. Em seguida, entre os anos de 1946 a 1952, seus projetos são marcados pela influência de Le Corbusier e Niemeyer e passam a apresentar volumes geométricos puros apoiados sobre pilotis, grandes aberturas, brises e rampas (GIANNECCHINI, 2009). E, de 1952 até o final de sua carreira, caracteriza sua fase brutalista, na qual se encontram seus projetos de maior destaque. E é justamente nesse último período que a estrutura ganha maior relevância na conformação de seus projetos, passando a ser sua essência.

Esse estudo de caso, apresenta a obra mais marcante de Artigas, o edifício da FAU-USP em São Paulo, inaugurado em 1969 e que posteriormente recebeu seu nome. Nesse estudo são destacados, por meio de análises numéricas os elementos estruturais protagonistas no processo de criação do espaço e da forma arquitetônica. Dentre esses elementos são destacados os pilares externos da edificação devido à sua forma escultórica, a grande grelha de concreto armado que forma a cobertura do prédio, além das grandes empenas das fachadas e os grandes balanços estruturais que compõe os espaços internos. São exploradas as justificativas construtivas, além da importância desses elementos estruturais na composição arquitetônica.

Arquitetura

O edifício da FAUUSP notabiliza-se pela racionalidade construtiva, pela riqueza espacial e pelo aspecto didático com que evidencia os elementos construtivos e o partido arquitetônico para

os usuários do prédio, predominantemente estudantes de arquitetura. Além de ser um dos mais importantes edifícios do brutalismo paulista.

O projeto, de 18.600m² com o gabarito é de 16 metros, data de 1961 e a execução ocorreu entre 1966 e 1969 (Figura 195).

Figura 195 – Vista externa da empena lateral do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: PASQUA, 2017.

Externamente o edifício se caracteriza por um volume retangular em concreto aparente, suspenso do chão, apoiado sobre pilares esculturais. (Figura 196). Os dois pavimentos abaixo desse volume (térreo e primeiro pavimento) se encontram recuados em relação aos pilares da fachada, formando um peristilo ao redor da edificação, sua vedação é em caixilharia que vai do piso ao teto, com exceção da parte frontal do prédio, na qual não há nenhum tipo de porta ou fechamento, tornando o acesso generoso e convidativo, integrando interior e exterior.

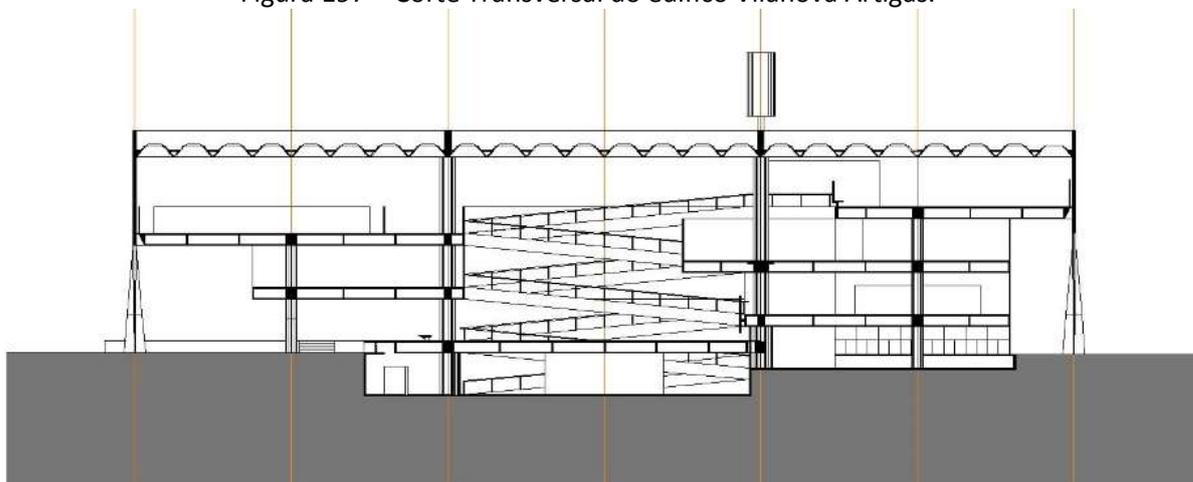
Internamente é como se fossem dois volumes de quatro pavimentos separados por um vazio central, e por uma diferença de meio nível – 1,90m – entre os pavimentos dos lados opostos do vazio (Figura 197). Uma mesma cobertura com 960 domos une ambos os volumes. Em contraposição a sobriedade da forma externa, a espacialidade interna é muito dinâmica, fruto do jogo de avanços e recuos das lajes sobre o vazio central, da alternância de aberturas e fechamentos e da generosidade dos espaços de circulação. Além disso, as aberturas da cobertura fechada apenas pelos domos permitem a entrada de luz natural em praticamente todo o edifício (Figura 197).

Figura 196 – Fachada do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Acervo Biblioteca FAU-USP.

Figura 197 – Corte Transversal do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Adaptado de desenho do Acervo da Biblioteca FAU-USP.

Figura 198 – Vista interna do vão central (Salão Caramelo) do edifício Vilanova Artigas.

Fonte: Foto de Nelson Kon em www.nelsonkon.com.br/.

O complexo programa que envolve uma faculdade de arquitetura se desenvolve em 7 níveis, dispostos em meio-níveis (1,90m) podendo ser descritos em quatro pavimentos da seguinte forma:

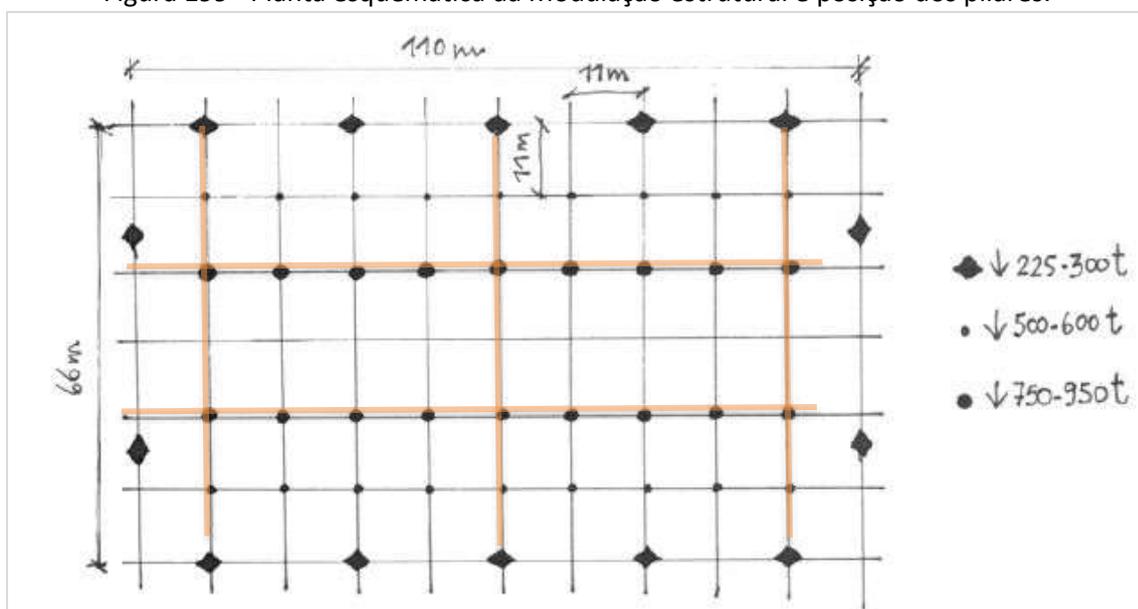
- O subsolo (nível -1,10m) abriga auditório e laboratório de pesquisa. Por alguns anos, essa parte dos laboratórios foi ocupada pelas oficinas de maquete, que posteriormente foram remanejadas para um prédio anexo.
- No térreo encontram-se a administração, o Salão Caramelo – vazio central (nível 0,80 – acesso principal), a lanchonete, o Museu – espaço para exposições e o Grêmio estudantil (nível 2,70m).
- No primeiro pavimento temos a biblioteca (nível 4,60m) e as salas de departamentos (nível 6,50)
- No segundo pavimento encontram-se os Estúdios – ou ateliers de projeto (nível 8,40m) e salas de aula (nível 10,30m).

Sistema Estrutural

O projeto estrutural é de autoria do Escritório Técnico J. C. de Figueiredo Ferraz e a construção foi executada pela Construtora ANR, Alberto Nagib Rizkallah Ltda. O concreto armado foi a técnica construtiva adotada na quase totalidade do prédio, não somente nas fundações, vigas e pilares, mas também na cobertura e em grande parte das vedações. A estrutura é hiperestática e as lajes, juntamente com as vigas, formam caixões perdidos.

O edifício segue uma modulação de 11x11 metros. A cobertura é estruturada no sentido longitudinal por 4 vigas invertidas separadas entre si por 22 metros. No sentido transversal, há vigas invertidas a cada 11 metros. A Figura 199 mostra a planta esquemática de modulação e a posição dos pilares. As linhas destacadas sobre a figura marcam a posição das vigas que possuem a junta de dilatação.

Figura 199 –Planta esquemática da Modulação estrutural e posição dos pilares.



Fonte: Adaptado de GIANNECHINI, 2009.

A estrutura do edifício se desenvolve nos níveis descritos pela arquitetura, criando grandes vãos e balanços, sustentados pelas grandes lajes nervuradas e grandes empenas de concreto armado.

Análise Estrutural

Nas imagens mostradas na Figura 200, temos a modelagem dos elementos estruturais no software SAP-2000, v20.

Tabela 6 - Dimensões da estrutura do edifício Vilanova Artigas, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.

PILARES			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
1 - Pilares Internos-1 (Cobertura)	D=0,70		
2 - Pilares Internos-2 (Pavimentos)	1,10	0,50	
3- Pilares externos			
3.1 - Pilares externos - base	1,30 a 0,01	1,30 a 0,01	
3.2 - Pilares externos - superior	1,18 a 3,00	0,20	
NÍVEL 0,80m (Acessos e Salão Caramelo)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
4- Lajes Nervuradas			
4.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
4.2 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
4.3 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
4.4 - Lajes Nervuradas - Nervuras Bordas	0,16	0,85	
5 - Vigas Longitudinais-1 (eixos Pilares 2)	0,70	0,85	
6 - Vigas Longitudinais-2 (eixos Pilares 1)	0,80	0,85	
NÍVEL 2,70m (Museu)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
6- Lajes Nervuradas			
6.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
6.2 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
6.3 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
6.4 - Lajes Nervuradas - Nervuras Bordas	0,16	0,85	
7 - Vigas Longitudinais-3 (eixos Pilares 1 e 2)	0,50	0,85	
8 - Viga Parede-1 (Empena Nível Museu)	0,10	2,60	
8.1 - Detalhe de ligação Viga Parede-1	0,25	0,20	
NÍVEL 4,60m (Biblioteca)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
9- Lajes Nervuradas			
9.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
9.2 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
9.3 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
11 - Vigas Longitudinais-3 (eixos Pilares 2)	0,50	0,85	
NÍVEL 6,50m (Departamentos)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
12- Lajes Nervuradas			
12.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
12.2 - Lajes Nervuradas - Superior (Balanço Nível Deptos.)		0,20	
12.3 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
12.4 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
13 - Vigas Longitudinais-2 (eixos Pilares 1)	0,80	0,85	
14 - Vigas Longitudinais-4 (Eixo Interno Nível Deptos)	1,10	0,85	
15 - Viga Parede-2 (Empena Nível Departamentos)	0,10	3,80	

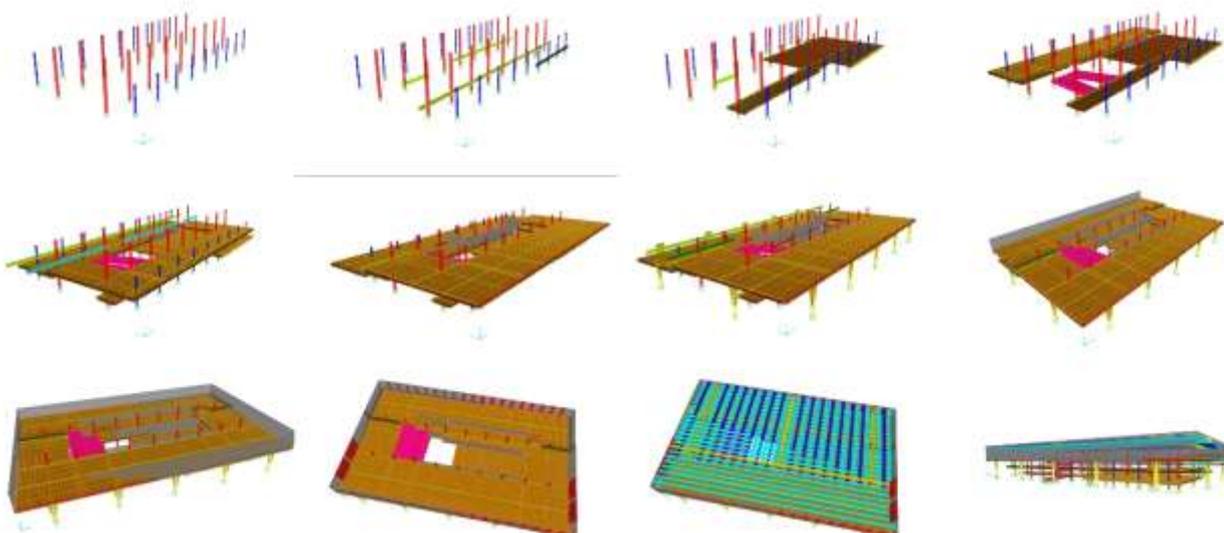
Tabela 6 - Continuação.

NÍVEL 8,40m (Estúdios)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
16- Lajes Nervuradas			
16.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
16.2 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
16.3 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
17 - Vigas Longitudinais-2 (eixos Pilares 1 e 2)	0,80	0,85	
18 - Viga Borda externa (Base Empenas)	0,30	0,85	
19 - Viga Parede-3 (Empena Nível Estúdios)	0,10	2,75	
NÍVEL 10,30m (Salas de Aula)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
20- Lajes Nervuradas			
20.1 - Lajes Nervuradas - Pano Superior		0,075	
20.2 - Lajes Nervuradas - Pano Inferior		0,050	
20.3 - Lajes Nervuradas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
21 - Vigas Longitudinais-2 (eixos Pilares 2)	0,80	0,85	
22 - Vigas Longitudinais-3 (eixos Pilares 1)	0,50	0,85	
23 - Viga Borda externa (Base Empenas)	0,30	0,85	
24 - Viga Parede-4 (Banco / Empena Nível Salas de Aula)	0,10	1,48	
24.1 - Detalhe - Base Viga (Parede-4)	0,25	0,85	
24.2 - Detalhe - Base Banco (Parede-4)	0,15	0,38	
24.3 - Detalhe - Banco (Parede-4)	0,65	0,08	
RAMPAS			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
25- Lajes Nervuradas das Rampas			
25.1 - Lajes Nervuradas das Rampas - Pano Superior		0,080	
25.2 - Lajes Nervuradas das Rampas - Pano Inferior		0,050	
25.3 - Lajes Nervuradas das Rampas - Nervuras Internas	0,10	0,85	
EMPENAS			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
26 - Empena Fachada 1 (Frontal e Laterais)	0,20	8,15	
27 - Empena Fachada 2 (Posterior)	0,20	7,25	
28 - Reforço Empena Fachadas Frontal e Lateral (eixo salas)	0,35	8,15	
29 - Reforço Empena Fachada Posterior	0,35	7,25	
30 - Reforço Empena Fachadas Laterais (eixo Estúdios)	0,40	8,15	
COBERTURA (GRELHA)			
ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
31 - Vigas Calha (Domus)	variavel	0,78	
32 - Vigas Calha Principais (invertidas)	variavel	1,95	
33 - Vigas Calha Principais-com junta (invertidas)	variavel	2,95	

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

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 200 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do Edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Foram utilizados como base para essa modelagem os desenhos arquitetônicos disponíveis na biblioteca da FAU-USP. As dimensões dos elementos estruturais foram organizadas na Tabela 6.

Para modelo estudado (Figura 201) foram usados elementos barras (*frames*) – para os pilares e vigas da cobertura e placas (*area shells*) para as lajes, nervuras, vigas longitudinais e empenas, resultando em um modelo composto por 2.164 *frames*, 26.926 *area shells*, 19.194 *points* e um total de 107.689 *area edges*.

Figura 201 – Modelo do Edifício Vilanova Artigas.

Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

- **Pilares**

A estrutura apresenta 14 pilares de fachada, 5 em cada fachada longitudinal, com espaçamento entre si de 22 metros e balanços nas exterminadas de 11 metros. Em cada uma das fachadas transversais há 2 pontos de apoio, com espaçamento entre si de 33 metros e balanços na extremidade de 16,50 m. Os pilares externos, com seu desenho oblíquo e seção variável, sustentam um grande volume de concreto, o qual internamente abriga os estúdios de um lado e do outro, as salas de aula.

O desenho escultórico dos pilares da fachada tem justificativas não só estéticas, mas também estruturais. Esteticamente a forma do pilar dá ao observador impressão de que um enorme peso é sustentado pelos pilares. Essa sensação é acentuada pelo fato dos pilares terem estreitamentos ao longo de sua altura. Quando vistos de frente, a seção mais estreita parece estar na articulação; quando vistos da lateral, isto é, com o observador no mesmo eixo dos pilares, a menor seção aparenta estar no ponto mais alto do pilar, no encontro com a empena (Figura 202).

Figura 202 – Vista frontal do pilar da fachada frontal do Edifício Vilanova Artigas.



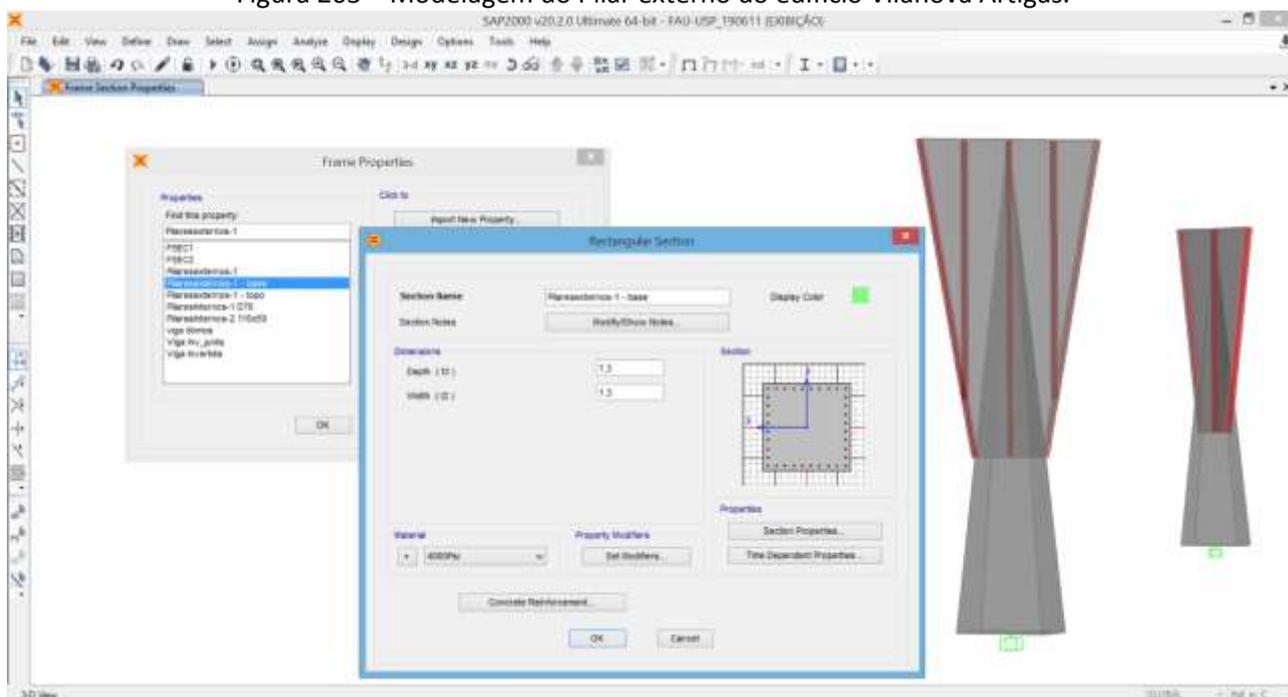
Fonte: Foto de Nelson Kon em www.nelsonkon.com.br/.

O pilar é formado por duas pirâmides que se encaixam pelas pontas, a base não converge para o mesmo ponto que a parte superior, seus vetores se cruzam no meio do caminho, criando uma composição dinâmica como se a pirâmide superior representasse toda a carga do edifício, enquanto a inferior representasse a força de reação da fundação (PASQUA, 2017).

Para a modelagem dos pilares externos foram utilizados elementos de barras ou *frames* para a pirâmide inferior (base do pilar), com secção variável entre 1,30mx1,30 m a 0,01x0,01m, conforme mostrado na Tabela 6. Já a porção superior do pilar foi modelada com elementos de placa ou *area shells*, aproximando sua forma ao máximo com a realidade. Na Figura 203 é mostrada a modelagem do pilar externo.

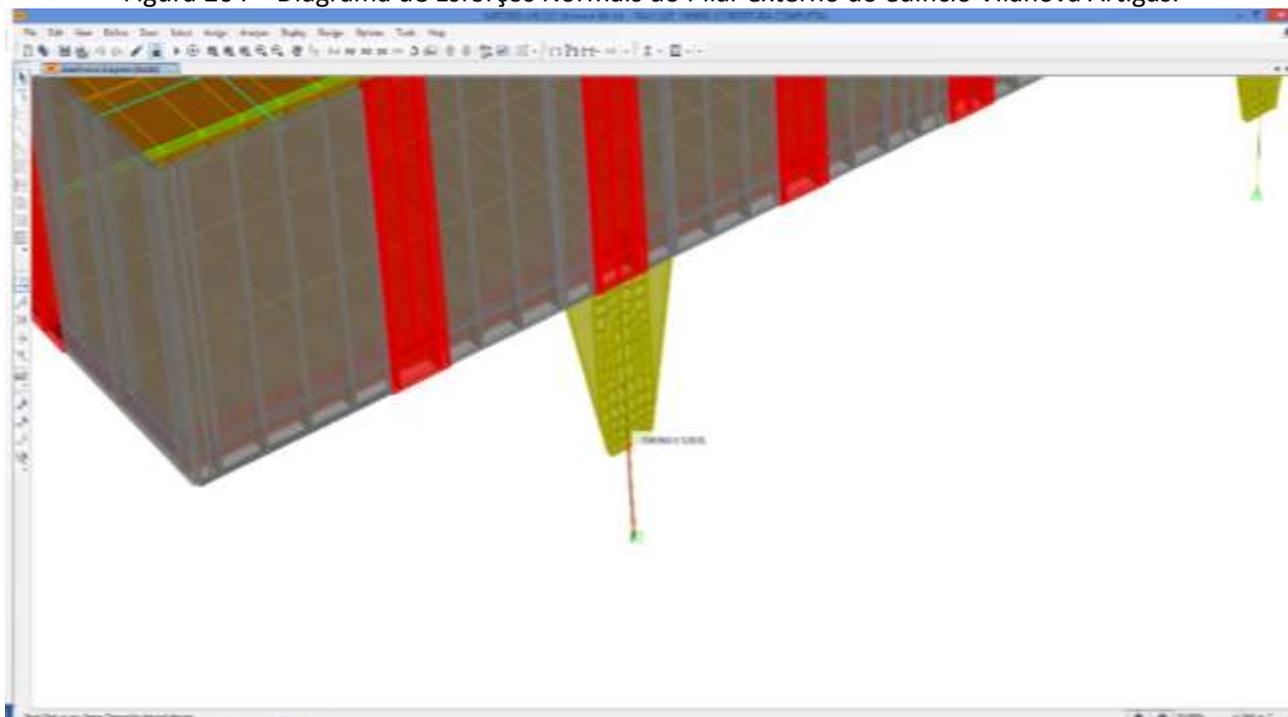
Podemos observar na Figura 204 que carga máxima sobre um dos pilares das extremidades da fachada frontal é de aproximadamente 300 toneladas. Sabendo que a menor seção do pilar $0,48\text{m}^2$, tem-se que a tensão nessa altura do pilar é 6,25 Mpa. Logo, na menor seção, encontramos um coeficiente de segurança de 5,12; bem acima do coeficiente na ordem de 1,4, normalmente utilizado em estruturas de concreto armado. Portanto, podemos afirmar que o fator determinante para a menor seção do pilar não foi a resistência à compressão. Importante enfatizar que, como os vãos ente os pilares são grandes – 11 metros – deve ser levado em consideração no dimensionamento a estabilidade do conjunto da edificação.

Figura 203 – Modelagem do Pilar externo do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Figura 204 – Diagrama de Esforços Normais do Pilar externo do edifício Vilanova Artigas.



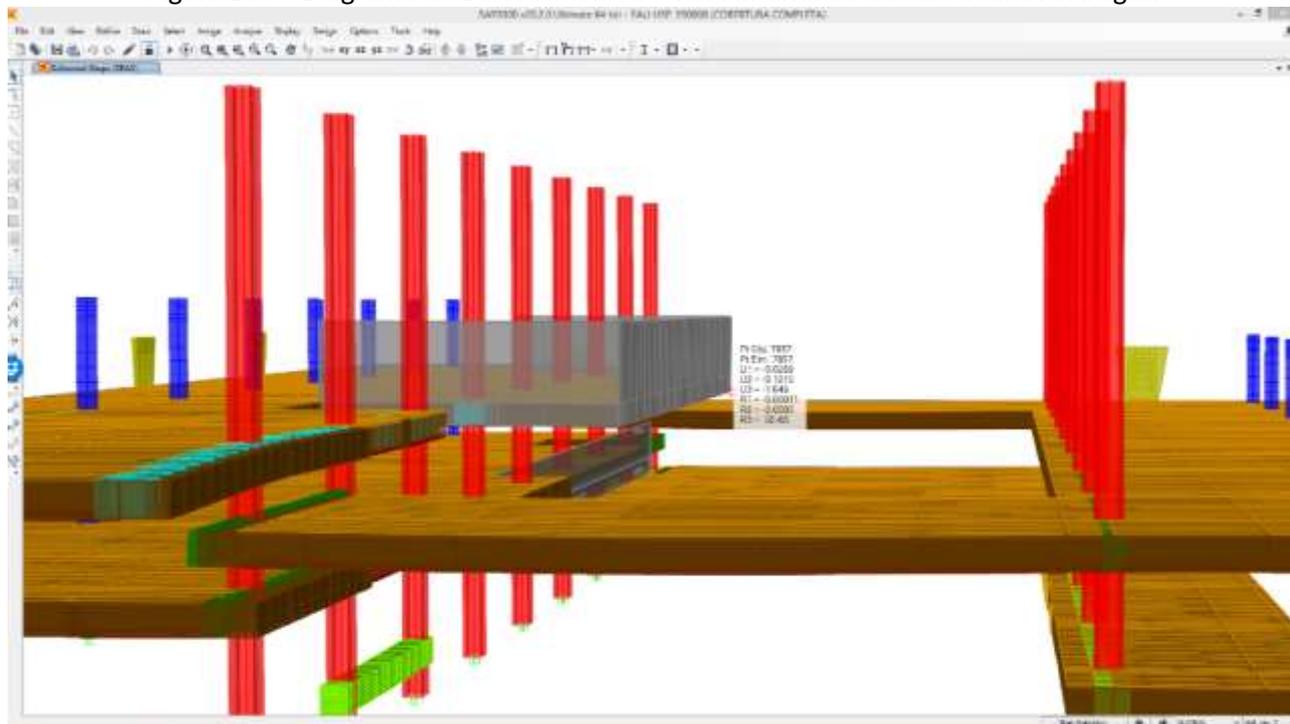
Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

- **Grandes Balanços**

Outra característica do projeto do edifício Vilanova Artigas que chama atenção são os balanços das lajes nervuradas que formam os pisos, gerando relações de cheios e vazios e destacando as massas de concreto aparente sobre os espaços internos da edificação (Figura 198). Apesar dos balanços chegarem a 12m de comprimento em alguns casos, a grande rigidez da estrutura não permite grandes deslocamentos.

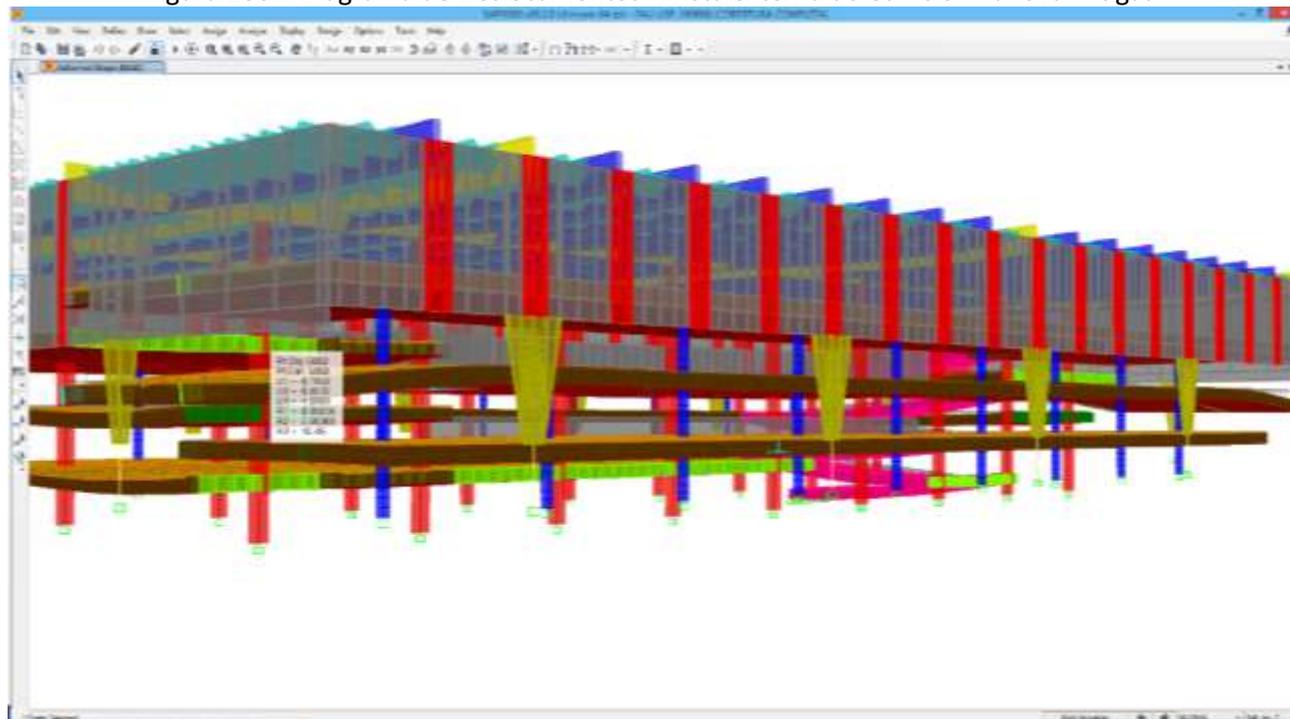
Como podemos ver na Figura 205, que mostra o modelo internamente, o balanço mais expressivo do ponto de vista estético – formado pela projeção do nível dos Departamentos sobre o Salão Caramelo – apresenta um deslocamento de menos de 2cm verticalmente. Já a Figura 206 mostra o maior deslocamento vertical entre os diversos balanços da estrutura. As extremidades da laje do piso dos Departamentos apresentam deslocamento de cerca de 4cm.

Figura 205 – Diagrama de Deslocamentos – vista interna do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

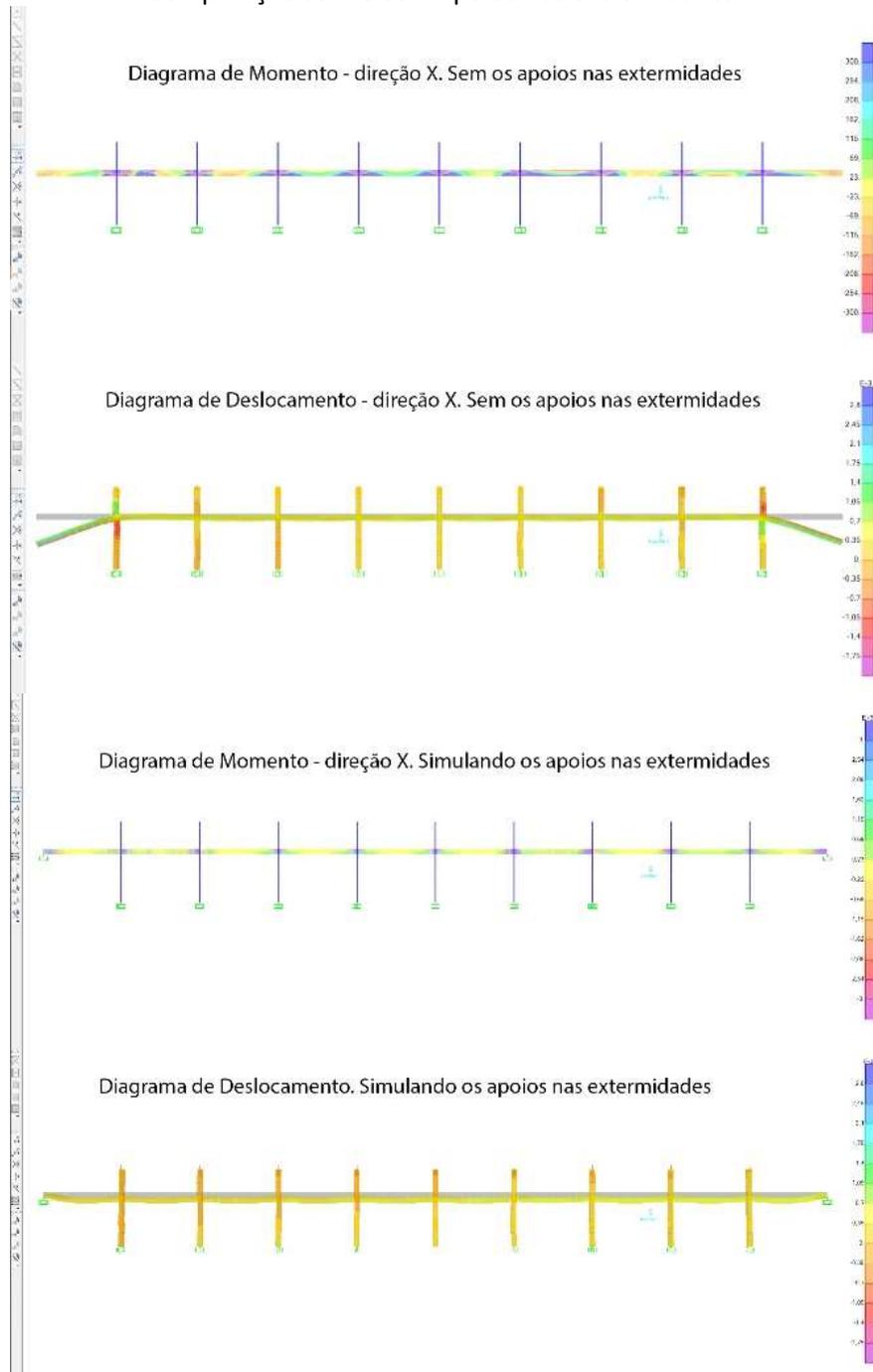
Figura 206 – Diagrama de Deslocamentos – vista externa do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Curiosamente, essa laje fazia os pilares externos das laterais do edifício, porém não são apoiadas neles, mantendo o critério estrutural adotado para esses elementos de fachada – que suportam somente os últimos pavimentos, as empenas da fachada e a cobertura do edifício. Além disso os balanços nas extremidades fazem com que o valor do momento positivo nos vãos internos diminua e como verificado nesse exemplo, o deslocamento nas extremidades dos balanços é condizente com o estabelecido nas normas. Os diagramas mostrados na Figura 207 mostram um comparativo dos valores dos momentos e dos deslocamentos na viga longitudinal do pavimento dos Departamentos conforme construído e à direita, simulando os apoios nas extremidades.

Figura 207 – Diagramas Momento e de Deslocamentos – Viga Longitudinal do nível dos Departamentos. Comparação sem e com apoios nas extremidades.

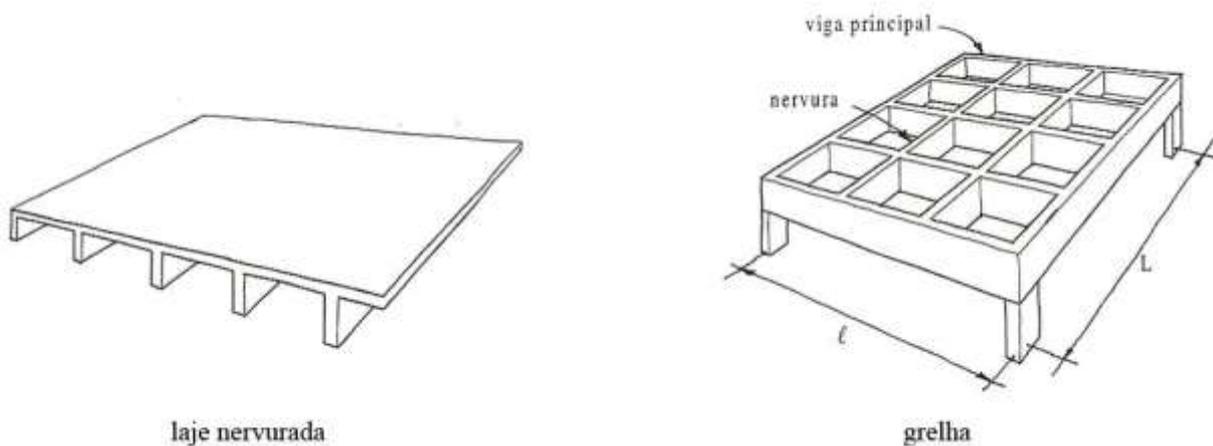


Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

- **Cobertura (Grelha)**

O sistema usado na cobertura do edifício é a associação transversal entre vigas conhecido como grelhas (Figura 208). Nas grelhas as vigas são colocadas lado a lado, com vão pequenos, assim como em uma laje nervurada, a diferença é que no caso das grelhas as vigas se repetem nas duas direções, com ligações rígidas nos cruzamentos entre elas, proporcionando assim uma colaboração entre as vigas (REBELLO, 2000). A grelha, na proporção utilizada na cobertura do edifício Vilanova Artigas – L (lado maior) $<$ l (lado menor) – permite a distribuição dos esforços nas duas direções, aumentando a rigidez do sistema estrutural.

Figura 208 – Associações viga x viga: laje nervurada e grelha.

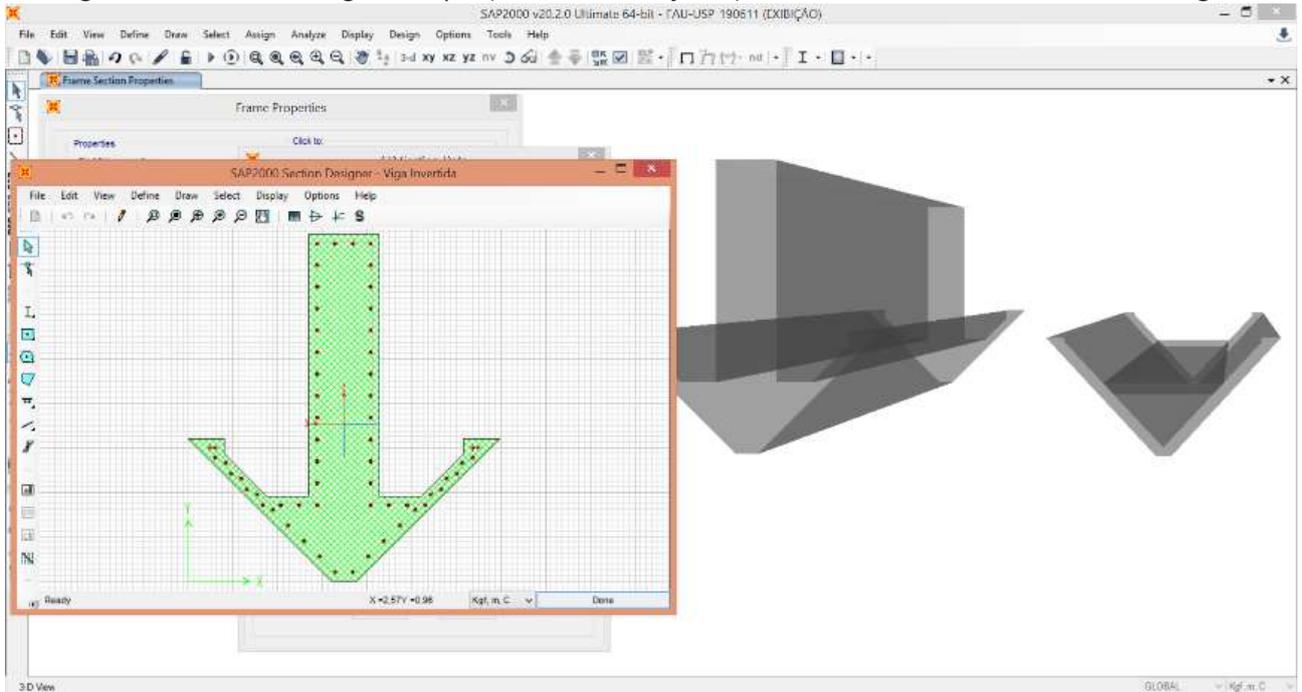


Fonte: REBELLO, 2000 pag. 161.

A grelha que compõe a cobertura do edifício da FAU-USP é formada por três tipos de vigas espaçadas em 2,75m – vigas baixas, vigas invertidas e vigas invertidas com juntas de dilatação. As vigas formam calhas para receber as águas das chuvas e os espaços entre elas são fechados com domos de iluminação zenital, proporcionando a iluminação natural em todo o interior do edifício descritas na arquitetura (Figura 198). Essa é uma característica importante das grelhas, pois os espaços vazios entre as vigas que a formam permitem essa iluminação com a possibilidade de vencer grandes vãos utilizando um sistema relativamente leve.

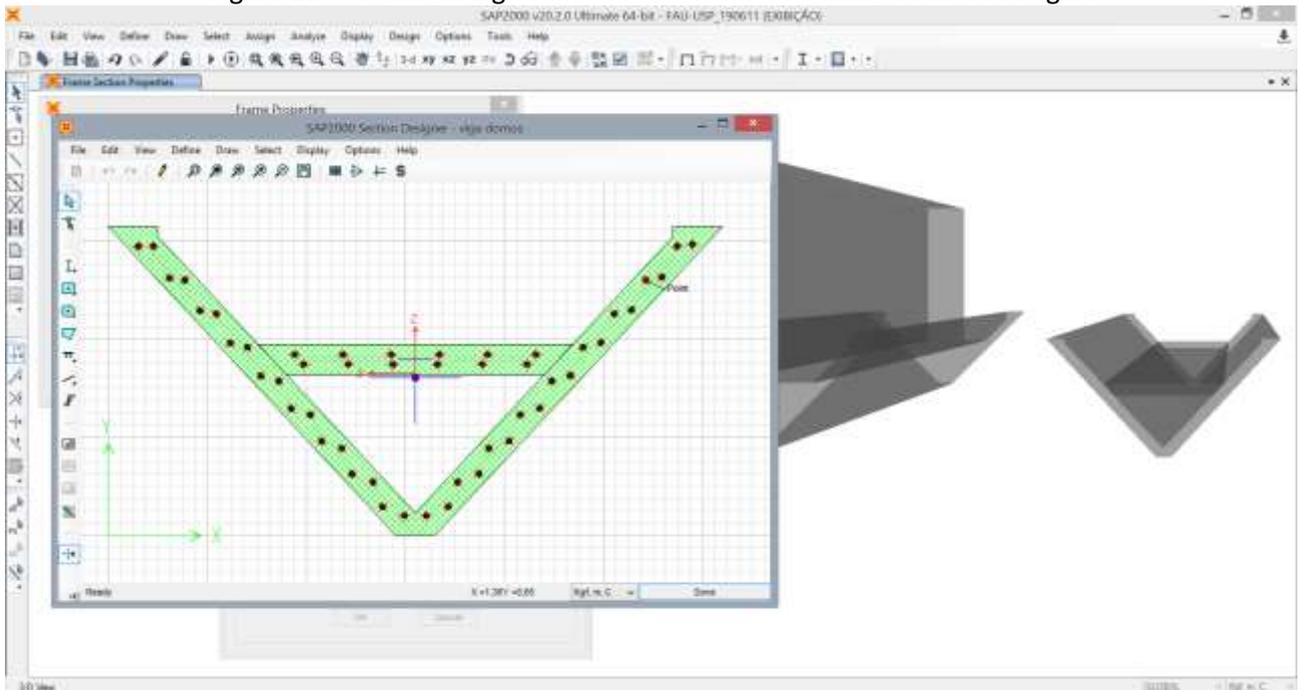
Para a modelagem desse elemento estrutural no programa SAP 2000 foram utilizados elementos de barras (*frames*), com perfil desenhado de acordo com os projetos estruturais disponibilizados na Biblioteca da FAU-USP. As Figura 209 e Figura 210 mostram os perfis modelados no software para as vigas principais, sem a junta de dilatação e para a viga calha comum.

Figura 209 – Perfil da Viga Principal (invertida, sem junta) da cobertura do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

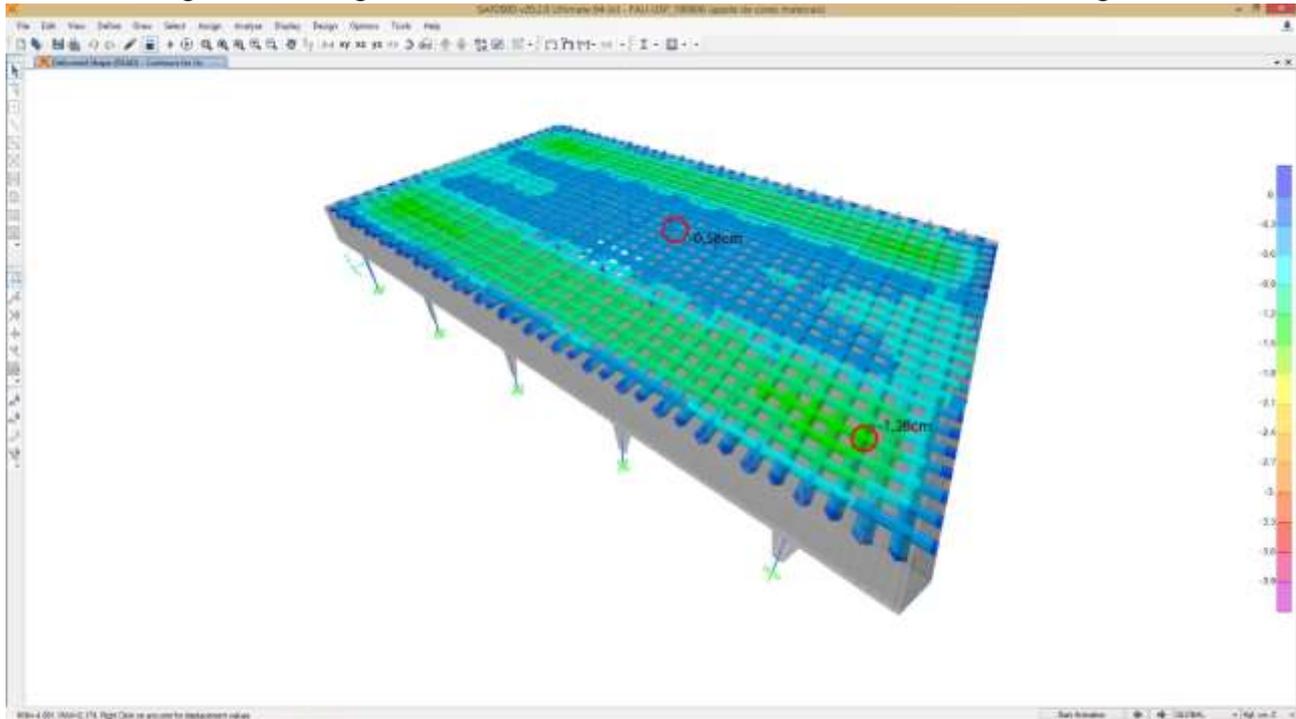
Figura 210 – Perfil da Viga Calha da cobertura do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

A rigidez do sistema estrutural pode ser observada na Figura 18 que mostra o diagrama de deslocamento das vigas que compõe cobertura do edifício. Observa-se que os maiores deslocamentos na direção Z (vertical) são da ordem de 1,28cm nos vãos mais próximos às fachadas e 0,58cm no vão central.

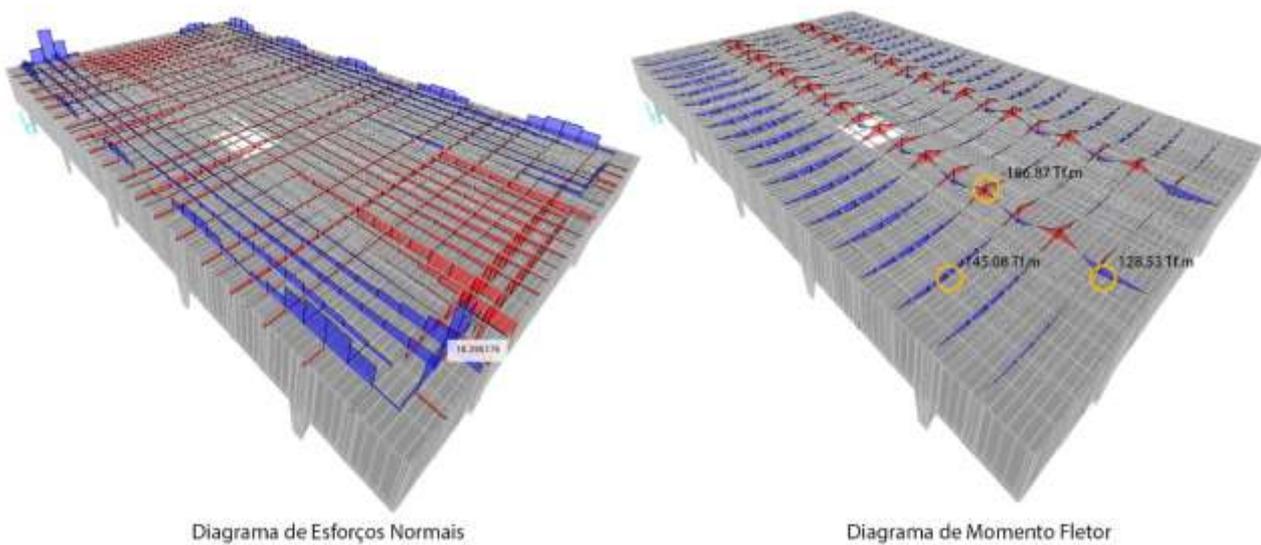
Figura 211 – Diagrama de deslocamento da cobertura do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Já a Figura 212 mostra os diagramas de momento fletor e forças normais, onde podemos observar o funcionamento dos esforços no sistema de grelha e a distribuição uniforme desses esforços entre as vigas nas duas direções.

Figura 212 – Diagramas de esforços normais e momento fletor da cobertura do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

- **Empenas das fachadas**

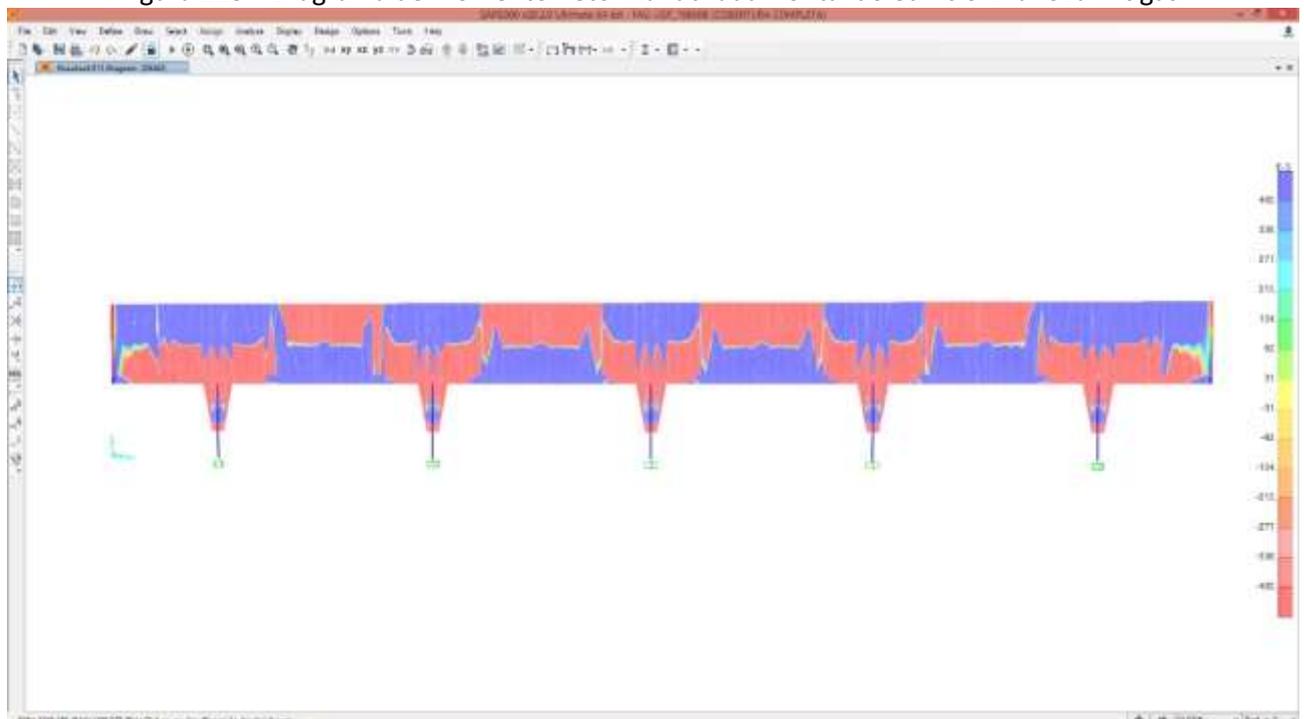
Outra característica marcante na arquitetura do edifício estudado são as grandes empenas de concreto aparente das fachadas. Essas empenas criam a sensação de um grande paralelepípedo de concreto bruto suspenso pelos pilares esculturais já citados, que mostram como o arquiteto

Vilanova Artigas explorou os principais conceitos de sua concepção arquitetônica, que buscava beleza nas técnicas construtivas e nos sistemas estruturais puros, como coberturas, balanços, grandes vãos e articulações estruturais (CONTIER, 2013).

As empenas do prédio da FAU-USP são grandes vigas-parede, a frontal e lateral possuem 8,15m de altura, sendo a frontal com 110 metros de comprimento e 5 pontos de apoio (vãos de 22 metros e balanços de 11 metros para cada lado), e as laterais com 66 metros de comprimento e 2 pontos de apoio (vãos de 33 metros e balanços de 16,5 metros). A empena posterior tem 7,25 metros de altura e acompanha as dimensões e apoios da empena frontal (110 metros).

A Figura 213 mostra o diagrama de momento fletor da empena frontal. Podemos notar as concentrações de momentos e a inversão dos momentos positivos e negativos nos apoios da parede.

Figura 213 – Diagrama de momento fletor na fachada frontal do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

A arquitetura moderna brasileira nos traz diversos exemplos nos quais a integração entre arquitetura e estrutura permitiu a execução de notáveis obras, explorando os limites dos materiais disponíveis e desenvolvendo ao máximo as técnicas conhecidas. A obra de Vilanova Artigas aqui analisada é um exemplo dessa integração, que se faz presente na escultura dos pilares, na escala da grelha que forma a cobertura e na expressão das empenas de concreto das fachadas. Sua formação de engenheiro-arquiteto pela Escola Politécnica, somada ao seu acompanhamento da evolução das correntes artísticas e arquitetônicas mundiais, além de seu engajamento político, qualificou-o como profissional e conseqüentemente fez com que sua obra fosse amplamente conhecida e respeitada (PASQUA, 2017).

Assim como outros grandes nomes da Arquitetura Moderna, as principais obras de Artigas têm a estrutura como importante elemento na arquitetura. Esta análise permitiu o entendimento da importância do repertório tecnológico na produção de uma arquitetura de boa qualidade e engenharia de alta tecnologia, evidenciou a presença de soluções técnicas na definição da arquitetura e o protagonismo do sistema estrutural na concepção arquitetônica do período.

4.4.2 Superior Tribunal de Justiça - STJ (Oscar Niemeyer e Bruno Contarini)

O projeto de arquitetura e estruturas do conjunto de edifícios do STJ – Superior Tribunal de Justiça (Figura 214) – tem peculiaridades importantes e apresenta uma estrutura marcante, definidora de sua forma arquitetural. O sistema estrutural adotado nessa obra teve um papel essencial na determinação de seu desenho arquitetônico. Bruno Contarini - autor do projeto estrutural do STJ teve participação efetiva desde a concepção dos projetos, proporcionando uma obra marcada pelo arrojo estrutural e por grandes desafios tecnológicos.

Figura 214 – Vista do Conjunto de edifícios do Superior Tribunal de Justiça – STJ, em Brasília.



Fonte: Foto de Luis Dantas – Creative commons

O STJ – Superior Tribunal de Justiça – é a última instância da justiça brasileira para as causas não relacionadas diretamente à Constituição. A instituição foi criada pela Constituição de 1988 e aprecia causas oriundas de todo o território nacional. Anteriormente, semelhante função era executada pelo extinto TRF – Tribunal Federal de Recursos.

Em 7 de abril de 1989, o tribunal passou a funcionar ocupando os edifícios pertencentes ao TRF (BRAZ, 2003), cuja estrutura não era compatível com a grandeza da instituição e não seria capaz de dar suporte ao vertiginoso crescimento do número de processos. De fato, segundo levantamentos do tribunal, no primeiro ano de sua existência, o STJ julgou pouco mais de 3.000 processos, tendo este número aumentado para 40.915 em 1994 e conta hoje com mais de 3,5 milhões de processos julgados ao longo de seus mais de 25 anos de história.

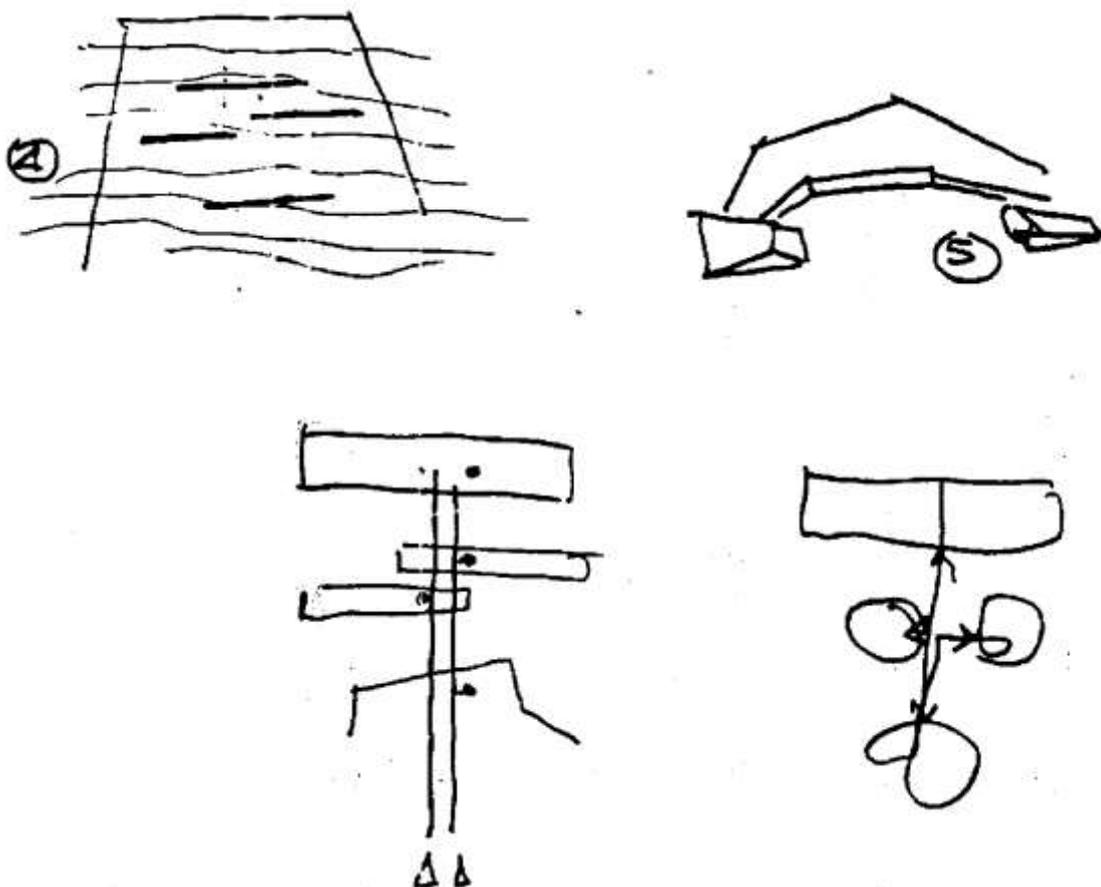
Em agosto de 1989, o arquiteto Oscar Niemeyer atendeu ao convite da cúpula do STJ e apresentou o estudo preliminar do projeto. A empresa responsável pela execução da obra foi a Construtora OAS LTDA que deu início aos trabalhos em 29/12/1989, tendo-o concluído em 30/12/1994 (BRAZ, 2003). A área total construída é de 133.569,60m², tendo seu custo de obra apurado em valores da época em U\$ 169.859.516,00 (BRASIL, 1995).

Arquitetura

Como toda grande obra de Oscar Niemeyer, o projeto do STJ impressiona pela monumentalidade estrutural e pela expressividade plástica. Contudo, questões funcionais não foram negligenciadas como por exemplo a demanda de independência entre as circulações de ministros, funcionários e público, que o arquiteto explica através dos croquis da Figura 215 e no memorial descritivo do projeto:

"duas circulações paralelas, mas independentes para carros e pedestres penetram no conjunto como se dele fossem a coluna vertebral. Delas, surgem todos os acessos que com elas se completam nas circulações horizontais dos andares superiores. É o esquema correto, simples e disciplinado que procurávamos, indispensável numa obra complexa como a do STJ." (NIEMEYER, sd, em Memorial Descritivo do STJ – Fundação Oscar Niemeyer).

Figura 215 – Croquis de Oscar Niemeyer para projeto do STJ.

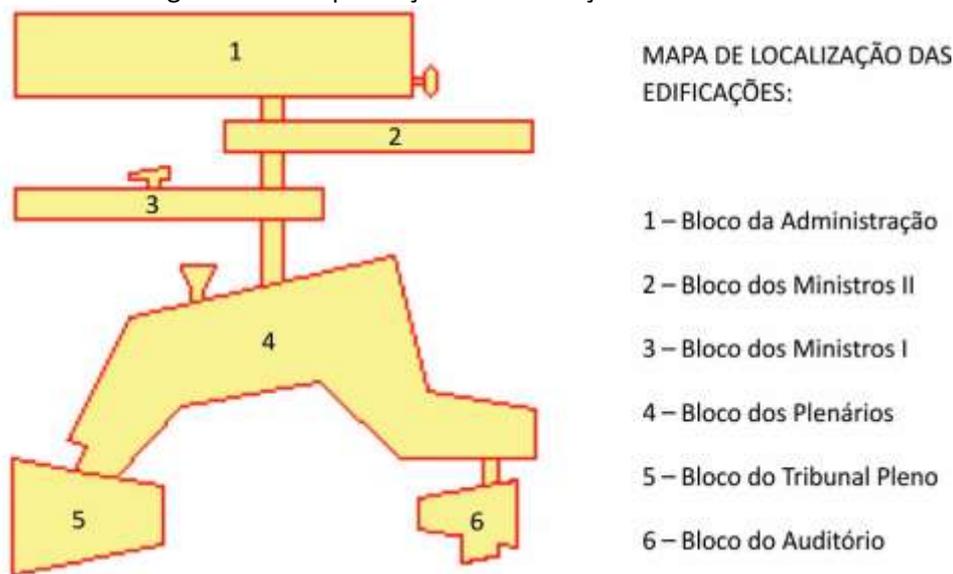


Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

Outra demanda do programa era a possibilidade de expansão com o acréscimo de mais um bloco de ministros. A locação deste visou à utilização do panorama para o lago e o acesso independente para a rua, para que a sua construção não interferisse no funcionamento do conjunto.

A distribuição dos blocos no terreno atende às curvas de nível existentes e às conveniências dos organogramas, que, por razões de hierarquia funcional, conferiu mais importância aos setores de contato com o público, como o salão de recepção, plenário, auditório e salas de sessão. O projeto, que teve contribuição autoral do arquiteto Hermano Montenegro foi distribuído conforme implantação mostrada na Figura 216.

Figura 216 – Implantação das edificações do STJ.



Fonte: Adaptado de BRAZ, 2003.

O Bloco da Administração (Figura 217) é um edifício de três andares, pilotis e subsolo e abriga toda a estrutura administrativa do STJ, o restaurante dos servidores, o serviço médico e a Biblioteca “Ministro Oscar Saraiva”. Possui 170m de comprimento e 40m de largura e é composto de 17 pórticos com três pilares de 2,00 x 0,50m e 16,50m de altura e uma viga superior protendida com 44m de comprimento por 0,50 x 2,80m de seção (BRAZ, 2003).

Os pórticos foram os primeiros elementos executados, e as lajes dos pavimentos foram içadas uma a uma, utilizando os próprios tirantes protendidos que eram protegidos por camisas metálicas. Primeiramente, ergueu-se a cobertura, cedendo espaço para ser executado o terceiro pavimento. Esse pavimento, sendo içado para a posição definitiva, cedia lugar ao segundo, que era executado a seguir. Finalmente, entrava a execução do primeiro pavimento, que, com seu içamento, completava a obra (Figura 218). Esses pavimentos são constituídos por vigas que formam um sistema de grelhas de modo a uniformizar a distribuição de cargas e deformações.

Adjacente ao bloco existe uma torre em formato oval em concreto armado aparente para saída de emergência e elevador de serviço da cozinha, localizada no terceiro pavimento. Na cobertura existem quatro caixas d'água em concreto protendido atirantadas nas laterais das vigas dos pórticos com capacidade de 60.000 litros cada (BRAZ, 2003).

Figura 217 – Bloco da administração do STJ.



Fonte: Acervo da Coordenadoria de engenharia do STJ.

Figura 218 – Içamento das lajes Bloco da administração do STJ durante a construção.



Fonte: Acervo da Coordenadoria de engenharia do STJ.

Pouco após a sua inauguração, este bloco tornou-se novamente foco de estudos de engenharia: um dos tirantes se rompeu, causando um leve tremor na estrutura. O conjunto não sofreu outros danos, porém, preventivamente, reforços foram aplicados em toda a estrutura do prédio (Figura 219).

Figura 219 – Reforço dos tirantes de sustentação das lajes Bloco da administração do STJ.

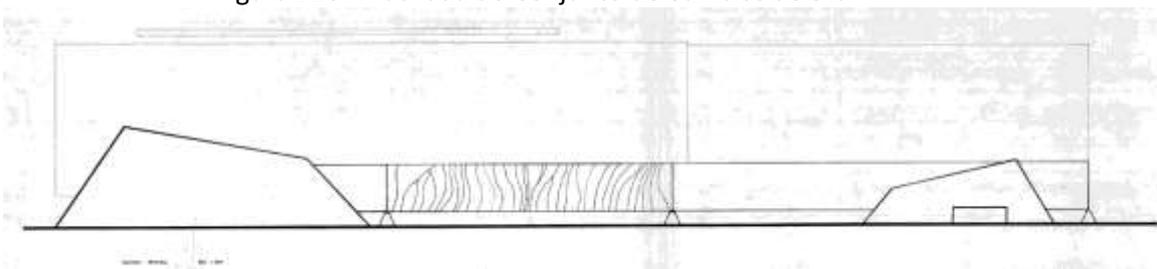


Fonte: Foto do Autor.

Os Blocos dos Ministros são dois edifícios em lâminas de nove pavimentos que emolduram os volumes dos demais blocos do conjunto a sua frente. Essa proporção de volumes pode ser observada no desenho da fachada (Figura 220). Medem 135 x 16,50m sobre pilotis. A área total dos dois blocos é de 33.812,13 m². No primeiro bloco, estão instalados 35 gabinetes de Ministros, a Presidência, a Vice-Presidência, a Coordenadoria Geral da Justiça Federal, o gabinete do Diretor da Revista do Tribunal, a Sala “Henrique D’ Ávila” – para ministros aposentados – um pequeno auditório, salão de exposição, restaurante e três salas de aula. No segundo, estão instalados 40 gabinetes de Ministros. O acabamento dos dois edifícios compreende tábua corrida, granito, mármore, lambris de madeira e forro de gesso.

A fachada principal é formada por quadros em concreto aparente e a posterior é do tipo “pele de vidro” com brises de alumínio. Uma torre em formato trapezoidal serve como circulação vertical (elevadores e escadas).

Figura 220 – Fachada do Conjunto de edifícios do STJ.



Fonte: Acervo da Coordenadoria de engenharia do STJ.

O Bloco do Tribunal Pleno é destinado às sessões plenárias do STJ. A área total é de 5.853,15m² e abriga um auditório de 420 lugares entre público e convidados especiais, além de um espaço destinado a advogados e cabines para tradução simultânea. O acabamento compreende carpete e placas de alumínio verticais. Em uma das paredes, há um grande painel da artista plástica Marianne Perreti (intitulado “A mão de Deus”). No térreo e no 1º andar do Tribunal Pleno, funciona a taquigrafia do STJ (BRASIL, 1995).

A volumetria do bloco é de forma trapezoidal com altura máxima de 22 metros (Figura 221). Possui vãos livres de cerca de 50m, apoiados sobre paredes laterais de concreto, uma delas com uma abertura circular para iluminação.

Figura 221 – Bloco do tribunal do Pleno do STJ.



Fonte: Foto do Autor

Do lado oposto ao Tribunal do Pleno está o Bloco do Auditório (Figura 222), com capacidade de 410 pessoas. É dotado de salas de projeção, som e tradução. A área total é de 1.086,27 m². Sua volumetria segue a linguagem trapezoidal do Bloco do Tribunal Pleno, porém em menor magnitude. Os vãos são da ordem de 30m e a altura máxima é de 14m. Um outro volume geminado ao corpo principal indica a entrada do auditório.

Figura 222 – Bloco do Auditório do STJ.



Fonte: Foto do Autor

O maior volume do conjunto é o Bloco dos Plenários. O prédio abriga 10 salas de julgamentos, sendo a principal delas a da Corte Especial, com capacidade para 184 pessoas. Existem três salas de Seções, seis de Turmas, além de uma de audiências, uma de advogados e uma do Ministério Público. No subsolo, funciona a Secretária Judiciária.

O programa está distribuído em um grande bloco suspenso sobre 11 pilares, criando vãos vencidos por empenas de concreto aparente de proporções monumentais que chamam a atenção no conjunto. Dentre essas empenas, se destaca a fachada principal, que recebe um painel de Mariane Perret (Figura 223), totalmente integrado com a arquitetura, pois cria aberturas na parede que permitem a passagem da luz natural para o interior do edifício. Pelo destaque estético e a relação de equilíbrio entre a arte, a arquitetura e a estrutura, esse painel de concreto é o foco desse estudo de caso.

Figura 223 – Fachada do Bloco dos Plenários do STJ, com o painel de Mariane Perret.



Fonte: Foto do Autor

Estrutura

A estrutura do Bloco dos Plenários é de concreto armado, e foram utilizados recursos especiais em locais estratégicos, tais como microsílca e protensão. As resistências aplicadas são de 24MPa, aumentando para 90MPa nos locais onde foi empregada a microsílca.

O conjunto possui vãos da ordem de 60m tendo sido executado totalmente apoiado em seus 11 pilares externos em forma de tronco de pirâmide e em 3 pilares embutidos nas caixas de elevadores e poços internos (BRAZ, 2003).

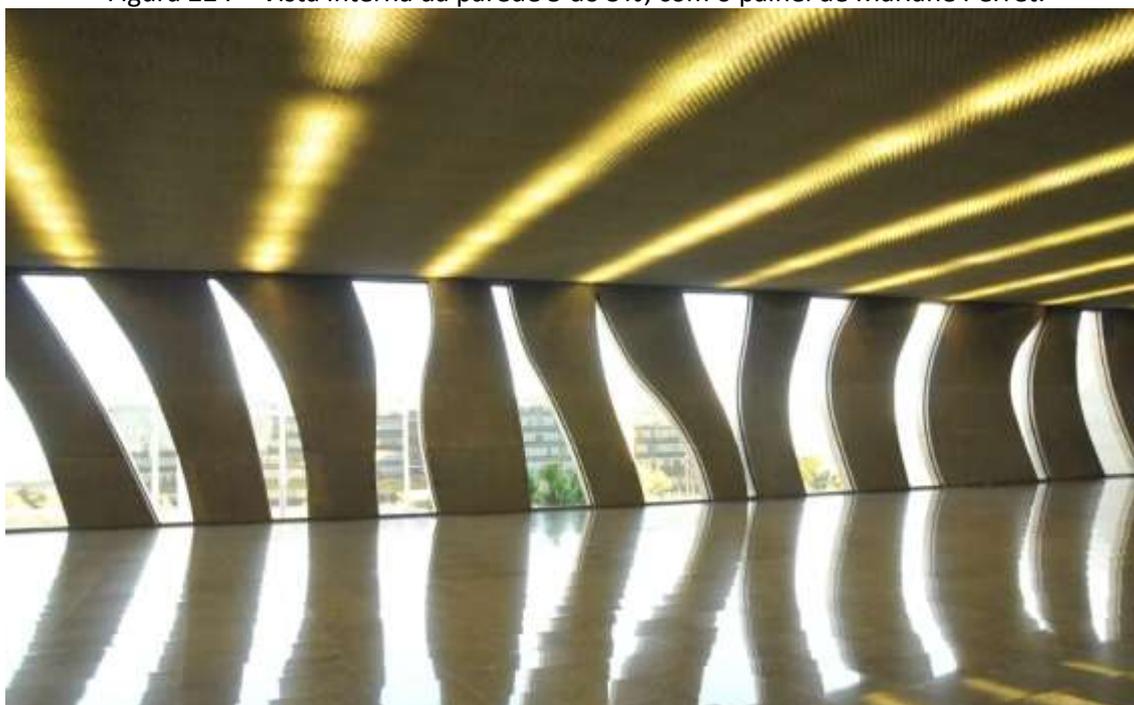
As paredes externas com 11,9m de altura foram utilizadas como vigas, apoiando as lajes, em um sistema de vigas em grelha. Em entrevista com os engenheiros do STJ que fiscalizaram a

obra, ressaltou-se que especial atenção foi dada ao painel da artista Marianne Perretti, uma vez que ele também trabalha estruturalmente e representa o segundo maior vão do edifício, com 61,25m.

Análise Estrutural

O elemento estrutural e estético mais marcante na arquitetura do edifício é sem dúvida a viga-parede 5 (Figura 224), que forma o grande painel de concreto da fachada e se destaca sobre o grande vão de mais de 60 metros com suas aberturas de vidro de formas sinuosas. Este elemento foi escolhido para a análise neste estudo.

Figura 224 – Vista interna da parede 5 do STJ, com o painel de Mariane Perret.



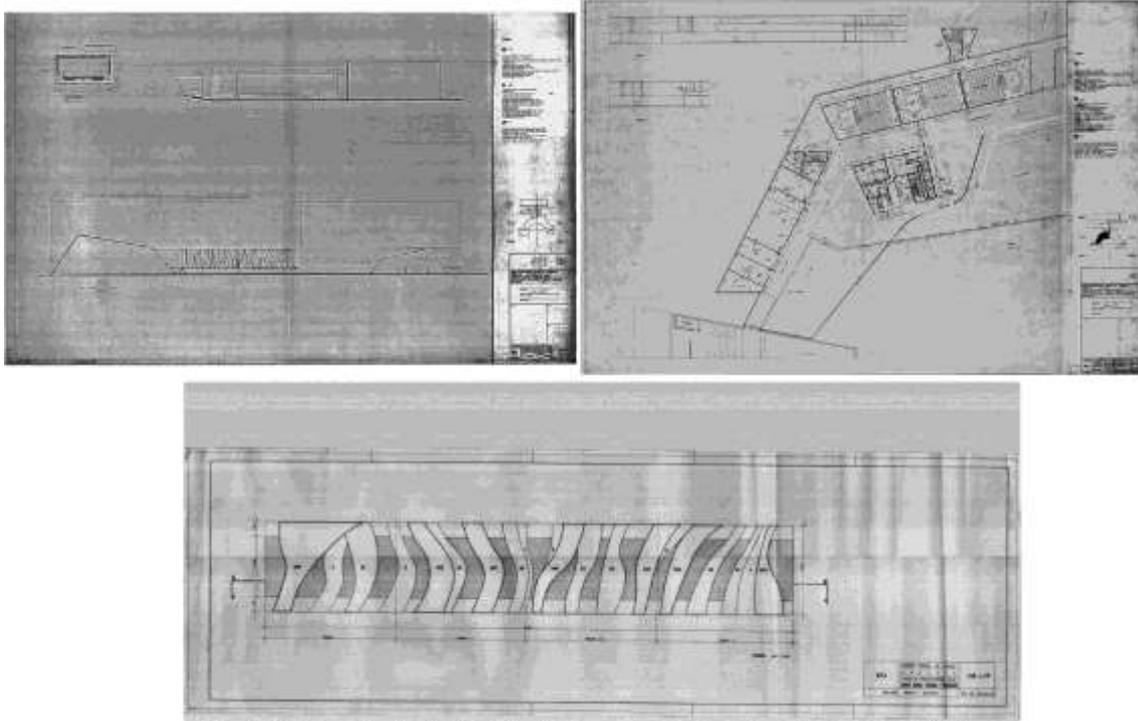
Fonte: Foto do Autor

Para análise da estrutura do painel vazado da fachada – viga-parede 5, foram levantados dados a partir dos desenhos técnicos da estrutura do Bloco dos Plenários – planta de formas, cortes, desenhos arquitetônicos – cedidos pela Coordenadoria de Engenharia do STJ (Figura 225).

Desse material foram extraídos os seguintes dados:

- Dimensões:
 - vão de 61,25m,
 - altura de 11,9m
 - espessura média de 0,6m
- Cargas:
 - Peso Próprio da laje de piso do Salão de Recepção: PPlj = 28.063 kgf/m
 - Sobre Carga no piso do Salão de Recepção: SClj = 11.605 kgf/m
 - Peso Próprio da Viga-parede (com o painel): PPpar-vazada ≈ 14.357 kgf/m
 - Peso Próprio da Viga-parede (sem o painel): PPpar-cheia = 17.850 kgf/m
 - Peso Próprio da laje de cobertura: PPCob = 28.733 kgf/m
 - Sobre Carga na laje de cobertura: SCCob = 6.981 kgf/m

Figura 225 – Projetos originais do Conjunto arquitetônico do STJ.

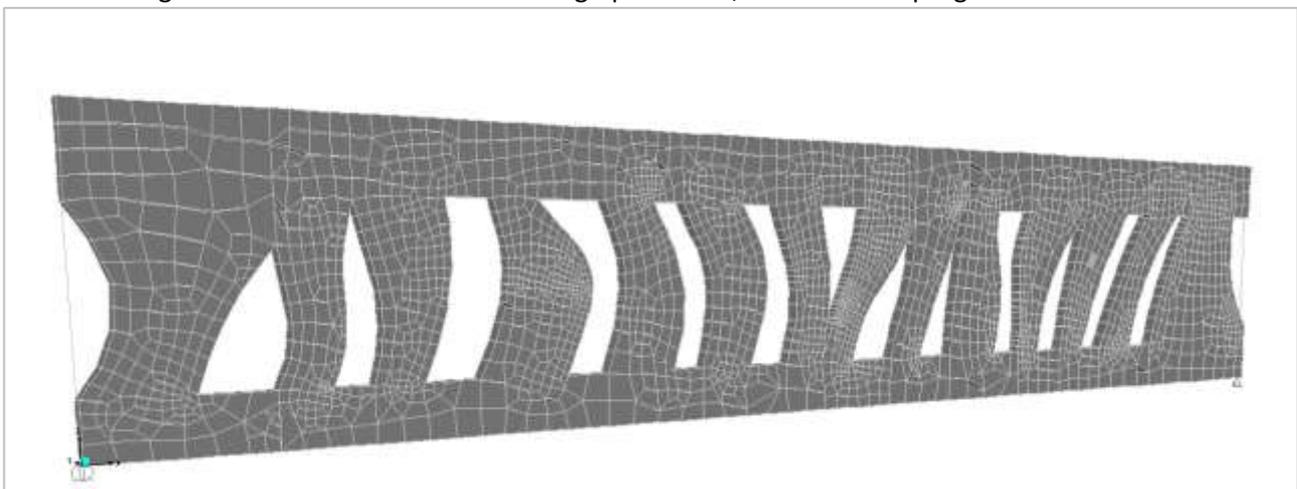


Fonte: Cedidos pela Coordenadoria de engenharia do STJ.

Para análise da estrutura de concreto considera-se o estado limite último e de serviço conforme critérios da Norma NBR 6118 (ABNT, 2004) – projeto de estrutura de concreto. A partir desses dados foram modeladas, no programa SAP 2000, empregando-se o elemento finito “*Shell*”, duas situações da viga em estudo.

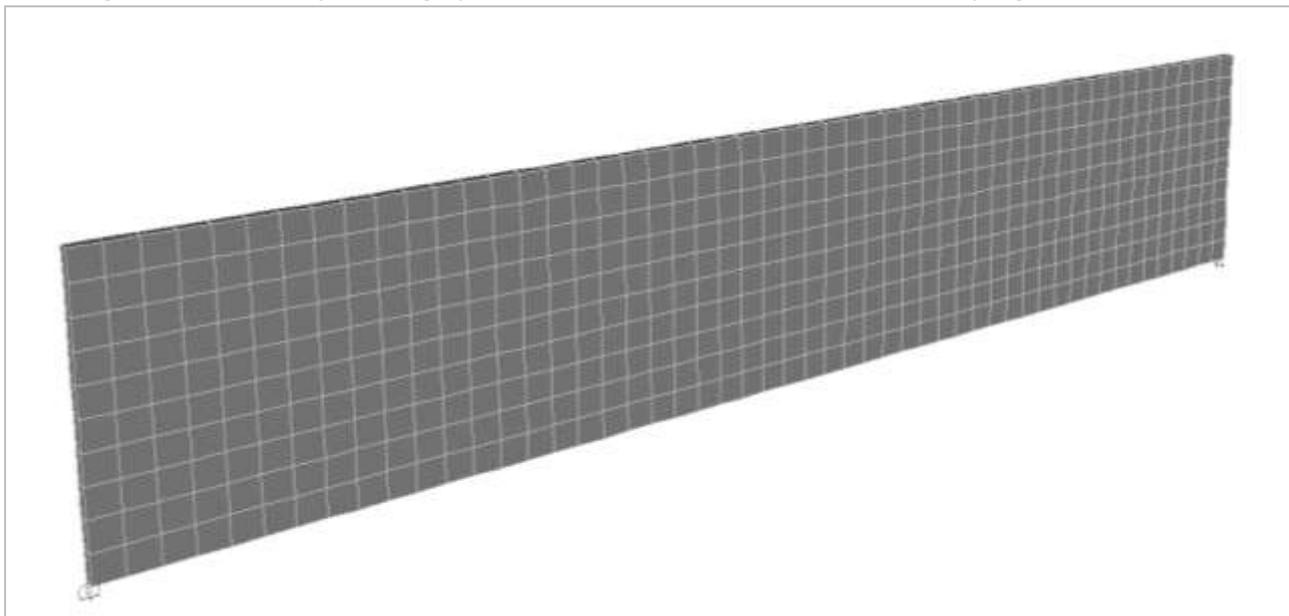
Na primeira delas (Figura 226) foram consideradas as aberturas de vidro, desenhadas pela artista Marianne Perretti. Nesta situação, foram utilizados 2.556 elementos finitos. Para efeito de comparação, a segunda situação (Figura 227) foi modelada com a alma cheia, desconsiderando as aberturas do painel. Nesta situação foram utilizados 520 elementos finitos, já que se trata de modelo mais convencional.

Figura 226 – Sistema estrutural da viga-parede 05, modelado no programa SAP 2000.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

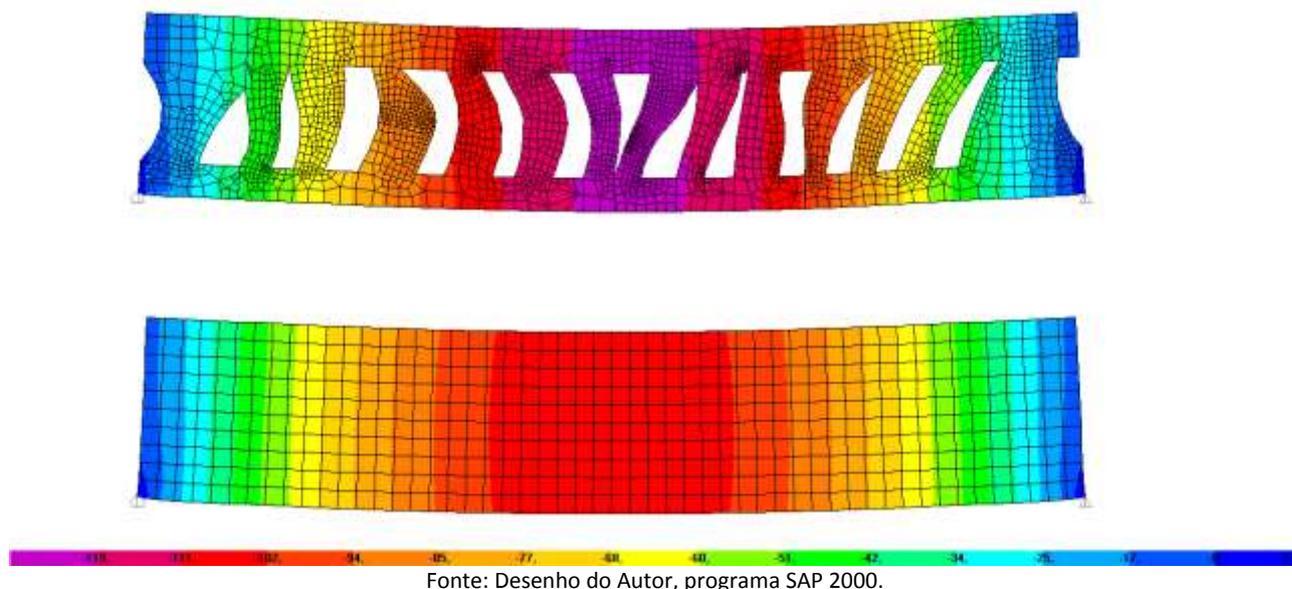
Figura 227 – Simulação da viga-parede 05 com a alma cheia, modelada no programa SAP 2000.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Na Figura 228 vemos os gráficos de deslocamentos. Neles, podemos observar que na viga com os vazios, o deslocamento vertical é de 12,17 cm, cerca de 11% maior se comparado com a viga-parede com alma cheia, que é de 10,91cm. Considerando a protensão utilizada no projeto (Figura 230) o deslocamento diminui consideravelmente. Mesmo para um carregamento elevado – 89.739 kgf/m de carga total – a inércia da viga-parede com uma relação entre comprimento da viga e sua altura da ordem de $l/5$ reduz consideravelmente o deslocamento.

Figura 228 – Simulação do deslocamento da viga-parede 05 nas duas situações.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Na Figura 229 mostram-se os esforços internos na direção principal X. O primeiro gráfico mostra o funcionamento como uma viga vierendel, concentrando os esforços de tração no banzo inferior.

Os esforços de flexão máximos, nos elementos mais solicitados são da ordem de 40 mil toneladas metro, sendo combatido por 30 cordoalhas de protensão localizado na região central da base da viga. Devido à dificuldade de dispor os cabos de protensão acompanhando o esforço de flexão, o projetista dispôs cabos verticais ao longo da altura da viga conforme Fig. 19 para garantir o confinamento do concreto.

Figura 229 – Diagrama de esforços internos na direção "X" da viga-parede 05 nas duas situações.

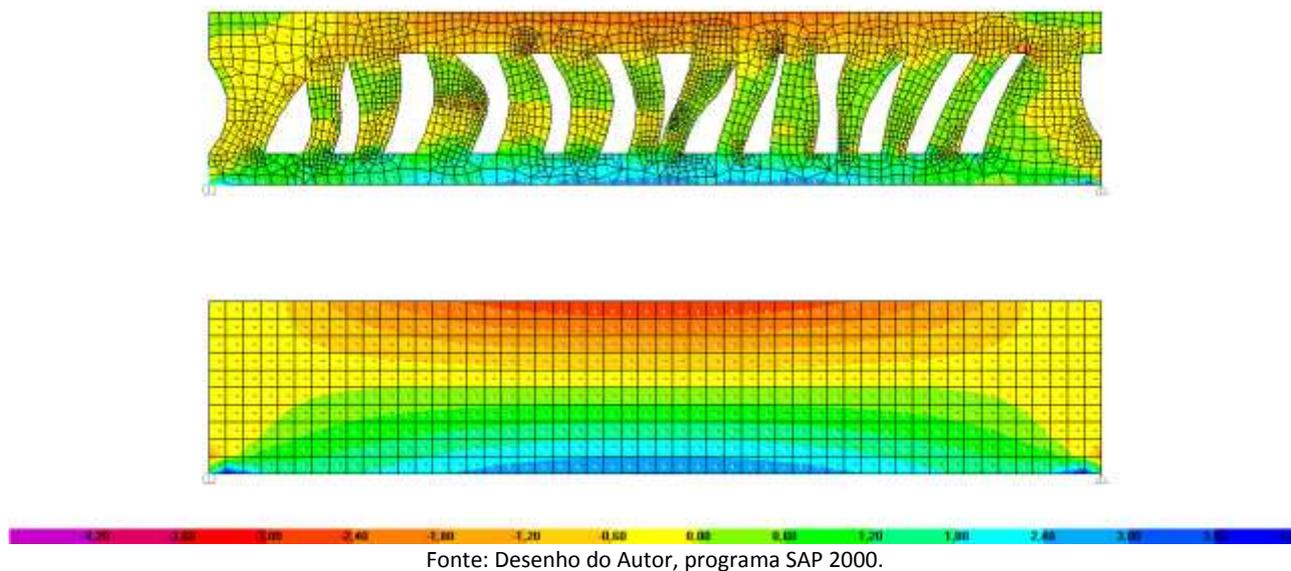
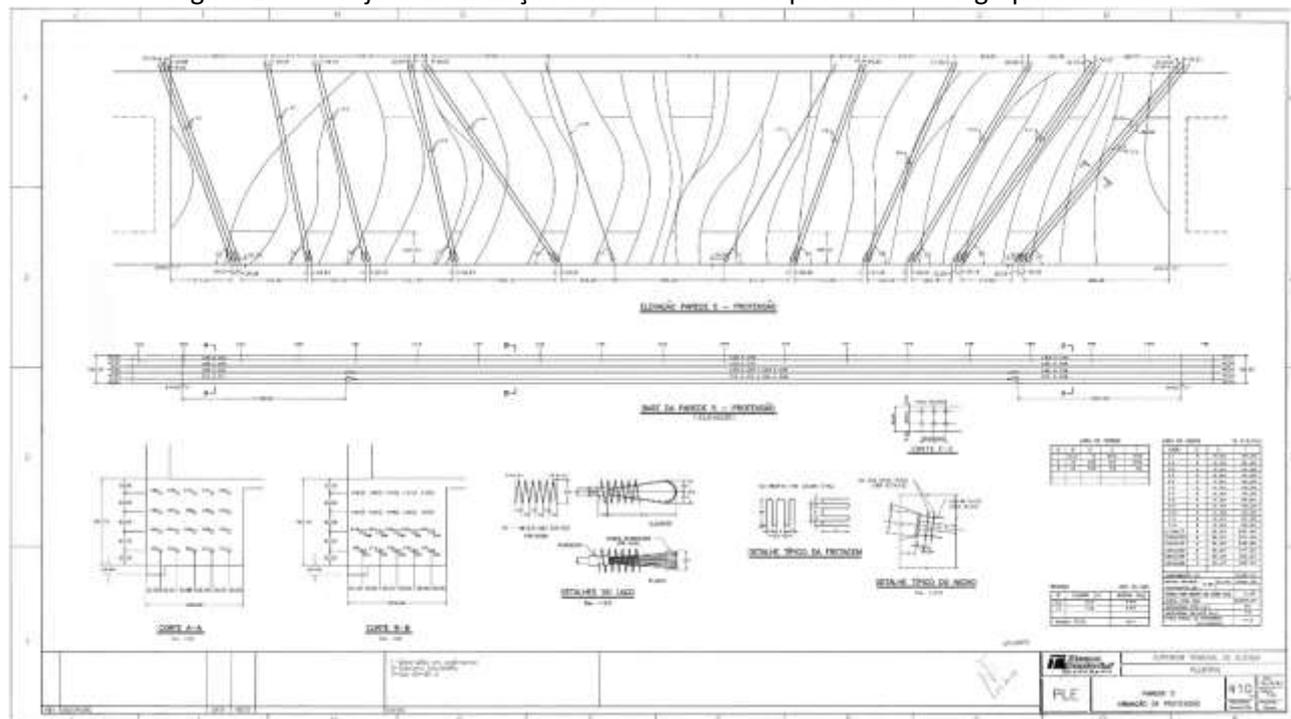


Figura 230 – Projeto da armação das cordoalhas de protensão da viga-parede 05.



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.

Os engenheiros que trabalharam com Niemeyer foram responsáveis por soluções estruturais inéditas em diversas épocas, para possibilitar a realização da inventividade formal da arquitetura de Niemeyer (INOJOSA et al, 2011). A respeito disso, Joaquim Cardozo, em carta escrita em 1957 ao arquiteto, ao comentar sobre uma viga, proposta por Niemeyer para ter 30 metros de vão que foi trocada por outra de três vãos de 10 metros, compara a viga, a de 30 metros, com o desenho de uma flor extraordinária feito por Portinari, junto com a qual aparece uma pequena flor, de 3 pétalas – a viga com 3 pequenos vãos na analogia do engenheiro. Junto com o desenho uma anotação: “Cada um desenha a flor que pode.” (CARDOZO, 2007).

O edifício do Superior Tribunal de Justiça – STJ, construído entre 1989 e 1994 está entre as obras mais marcantes de Oscar Niemeyer e segue a linha dos grandes desafios estruturais que o arquiteto proporcionou ao calculista Bruno Contarini.

Por meio das análises feitas no programa computacional, podemos comparar os resultados da grande viga vazada de concreto e vidro da fachada do edifício, elemento que visualmente tem grande função estética, com uma situação simplificada, sem as aberturas, contribuindo para a valorização da técnica na produção arquitetônica integrada não só com uma engenharia de alta tecnologia, mas também com marcos artísticos como o painel de Mariane Perret.

4.4.3 Museu Nacional (Oscar Niemeyer e Sussekind)

Parte do conjunto de obras do arquiteto Oscar Niemeyer para a Esplanada dos Ministérios em Brasília, o Museu Nacional Honestino Guimarães, conhecido como Museu Nacional, inaugurado em dezembro de 2006, apresenta uma estrutura marcante, que por si só define sua forma arquitetural. O sistema estrutural adotado nessa obra tem uma relação com o desenho arquitetônico. Relação marcante na obra de Niemeyer – arquitetura - estrutura – que evidencia a importante influência de grandes engenheiros, como José Carlos Sussekind - autor do projeto estrutural da obra analisada nesse estudo de caso.

O 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.

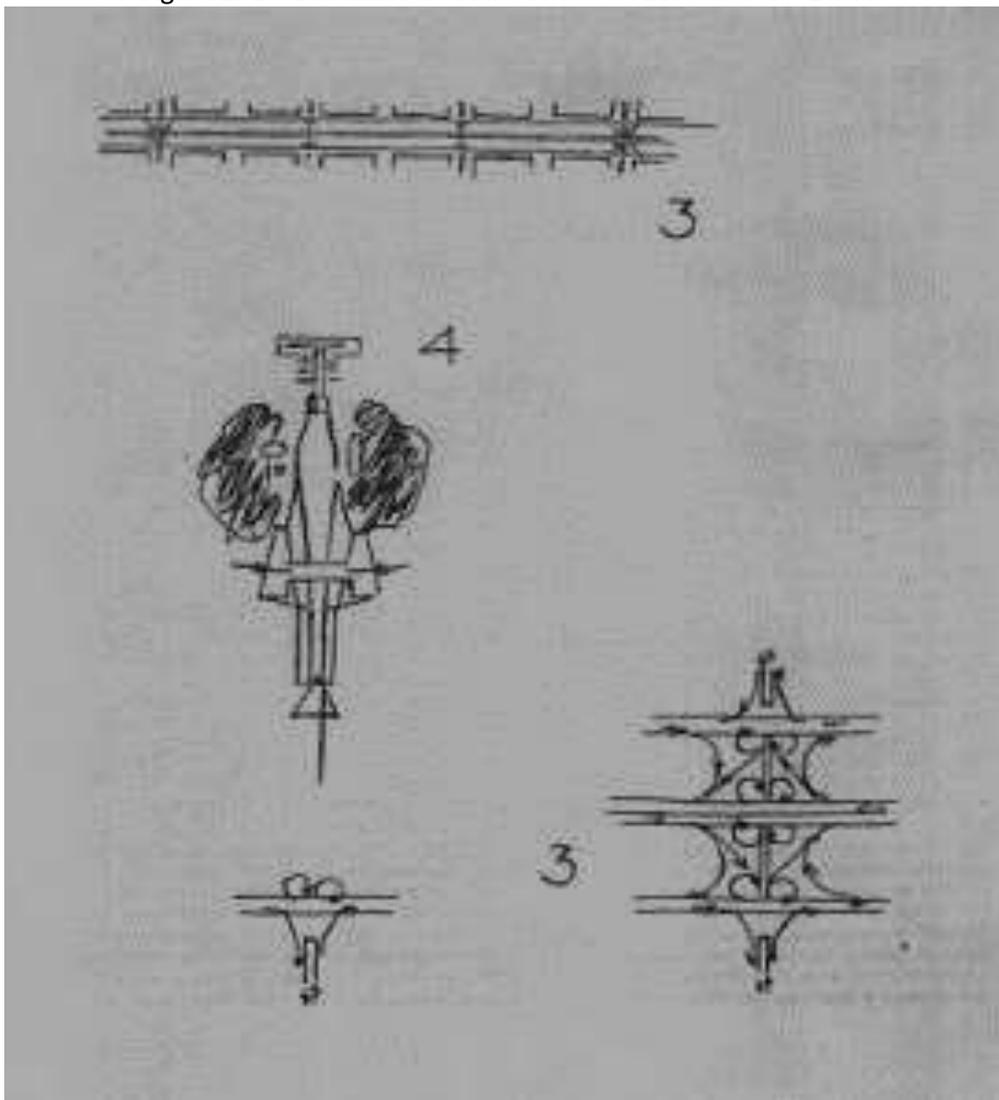
Esse museu é um exemplo dos trabalhos mais recentes do arquiteto, quando Niemeyer já explora com muita experiência e simplicidade as qualidades estruturais do concreto armado. Na questão estrutural Niemeyer teve a importante contribuição do engenheiro José Carlos Sussekind,

que esteve ao seu lado em diversas obras nos últimos 30 anos, entre elas o Museu Oscar Niemeyer em Curitiba e os projetos do Caminho Niemeyer em Niterói.

Os projetos originais do Plano Piloto de Brasília (Figura 231), apresentados pelo urbanista Lúcio Costa na década de 50 já previam a construção de um museu, e este museu deveria ter o porte e a importância que uma capital nacional merece.

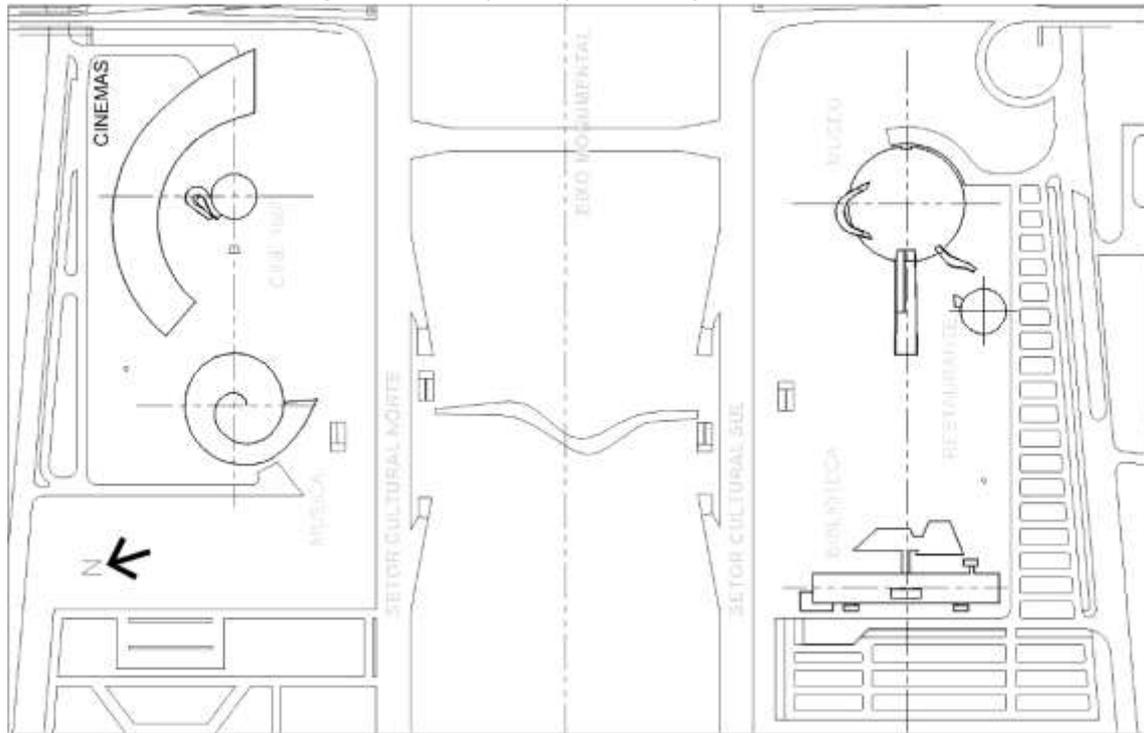
Porém, passaram-se alguns anos até que Brasília tivesse esse museu. Em 1970, na mesma época do projeto e construção do teatro Nacional, foi desenvolvido o projeto arquitetônico do conjunto Cultural de Brasília que continha em seu programa, além do Teatro Nacional, uma biblioteca, salas de música, cinemas 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.

Figura 231 – Desenhos do Plano Piloto de Lúcio Costa – 1957.



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 232).

Figura 232 – Implantação do Conjunto Cultural.



Fonte: Acervo técnico do 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.

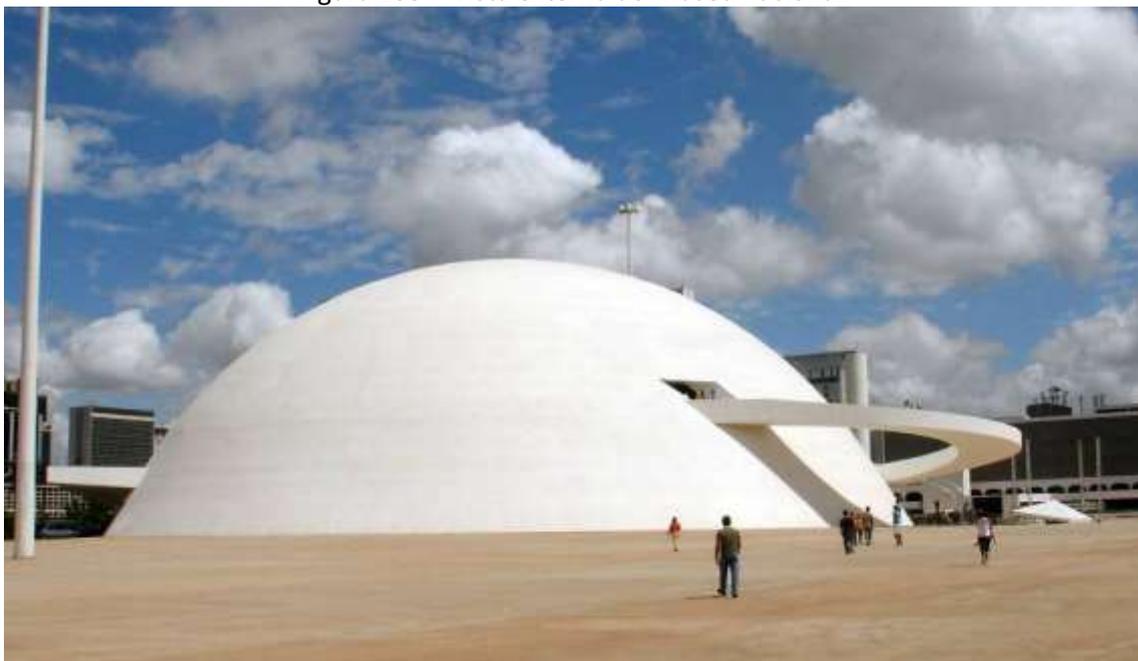
Arquitetura

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 ideias, 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 conservação de 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 (Figura 233). 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 233 – Vista externa do Museu nacional.



Fonte: Foto do Autor.

Internamente (Figura 234), 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 outra 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 234 – Vista Interna do Museu Nacional.



Fonte: Skyscrapercity.com

Estrutura

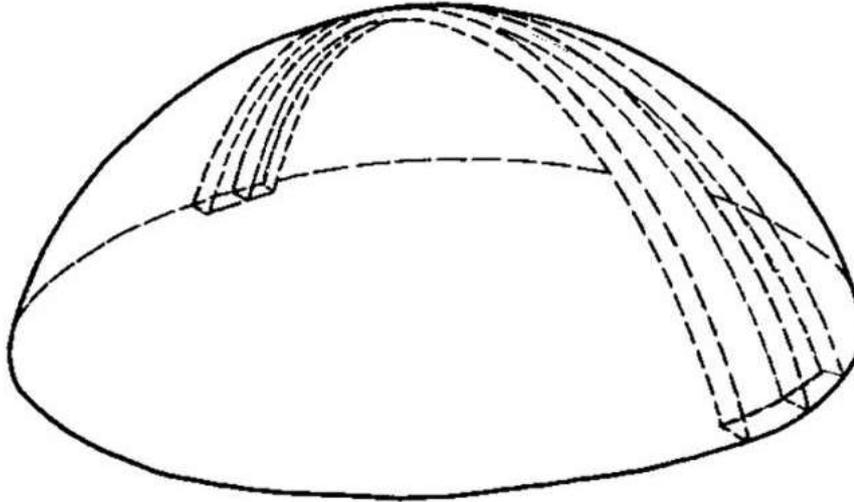
A arquitetura do Museu Nacional segue uma linha de raciocínio formal adotada por Oscar Niemeyer ao longo de toda sua carreira, reforçando a importância do sistema estrutural na forma da edificação. A forma plástica da arquitetura do museu resulta de um sistema estrutural conhecido como cúpula. Nesse 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.

Niemeyer gostava 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 concluiu a arquitetura já estava presente. (...) Arquitetura e Estrutura como coisas que nascem juntas e juntas devem se enriquecer.” (Oscar Niemeyer, em “A Vida é um Sopro”, Direção: Maciel, Fabiano – Europa Filmes, 2007)

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 235. 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, os arcos.

Figura 235 – Cúpula formada pela sucessão radial de arcos.

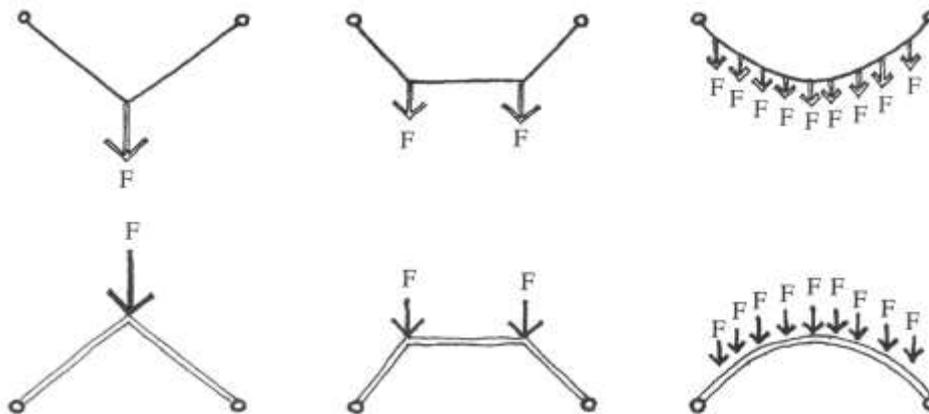


Fonte: REBELLO, 2000

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 das cargas aplicadas. 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 (Figura 236). Os arcos funiculares estão sujeitos a esforços inversos aos dos cabos, ou seja, um cabo com formato funicular gera esforços somente de compressão simples. 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 se desvia do eixo do arco originam-se esforços de flexão, sendo que quanto maiores forem os desvios maiores serão esses esforços.

Figura 236 – Formas Funiculares – Cabos e Arcos.

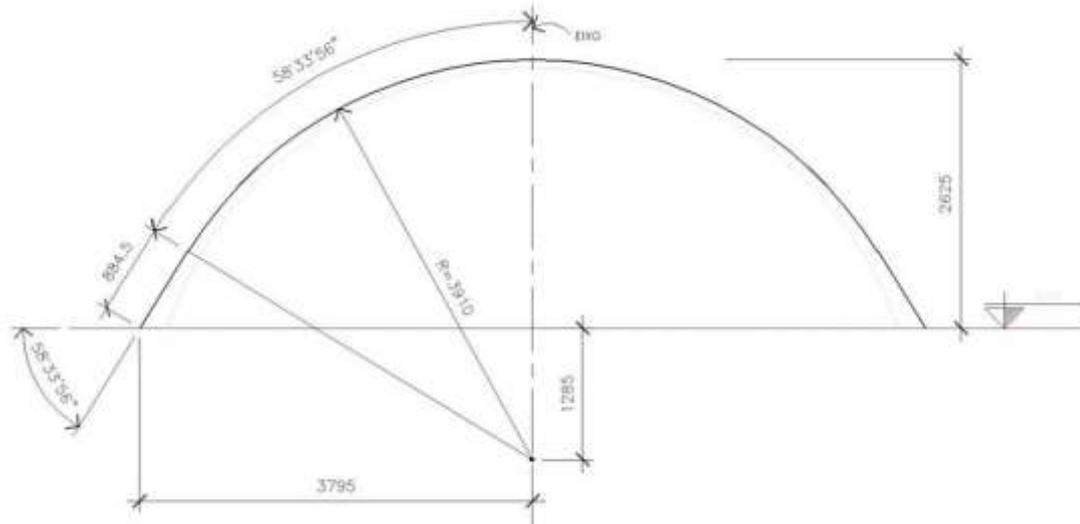


Fonte: adaptado de REBELLO, 2000.

Sabe-se que para uma cúpula estar totalmente comprimida, ela deve ter uma abertura angular de aproximadamente 104° , isto é, a transição entre os esforços de compressão e tração

ocorre com 52º (considerando um ângulo medido do topo para a base) (REBELLO, 2000). No Museu Nacional, Niemeyer e Sussekind utilizaram deste princípio para gerar a forma da cúpula, a angulação no caso do Museu é de cerca de 58º, como pode ser observado na Figura 237.

Figura 237 – Corte Esquemático do arco gerador da cúpula do Museu Nacional.

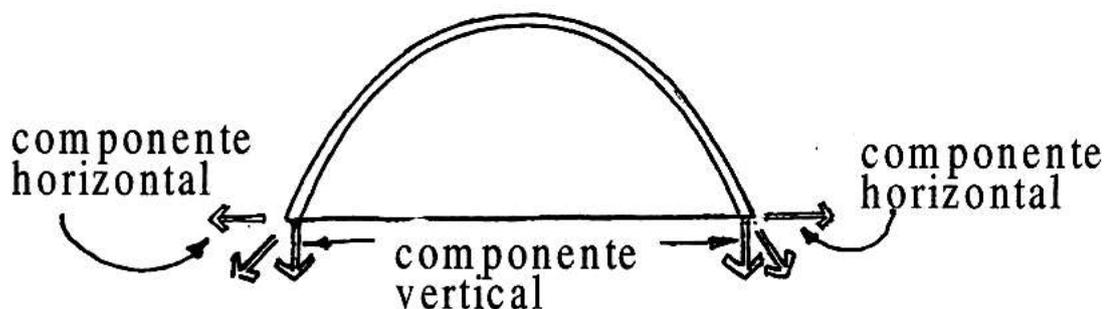


Fonte: Projetos estruturais do Museu Nacional, cedidos pela construtora Casuarina Consult. LTDA.

Além dessa reação 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 (Figura 238), 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 mostrada na Equação (2):

$$\frac{1}{10} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{5} \quad (2)$$

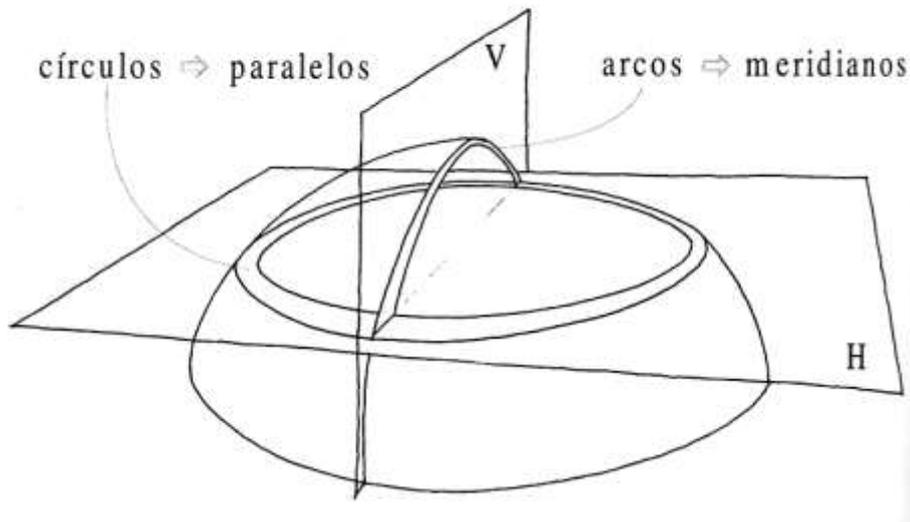
Figura 238 – Reações horizontais na base do arco.



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 239.

Figura 239 – Paralelos e Meridianos de uma cúpula.



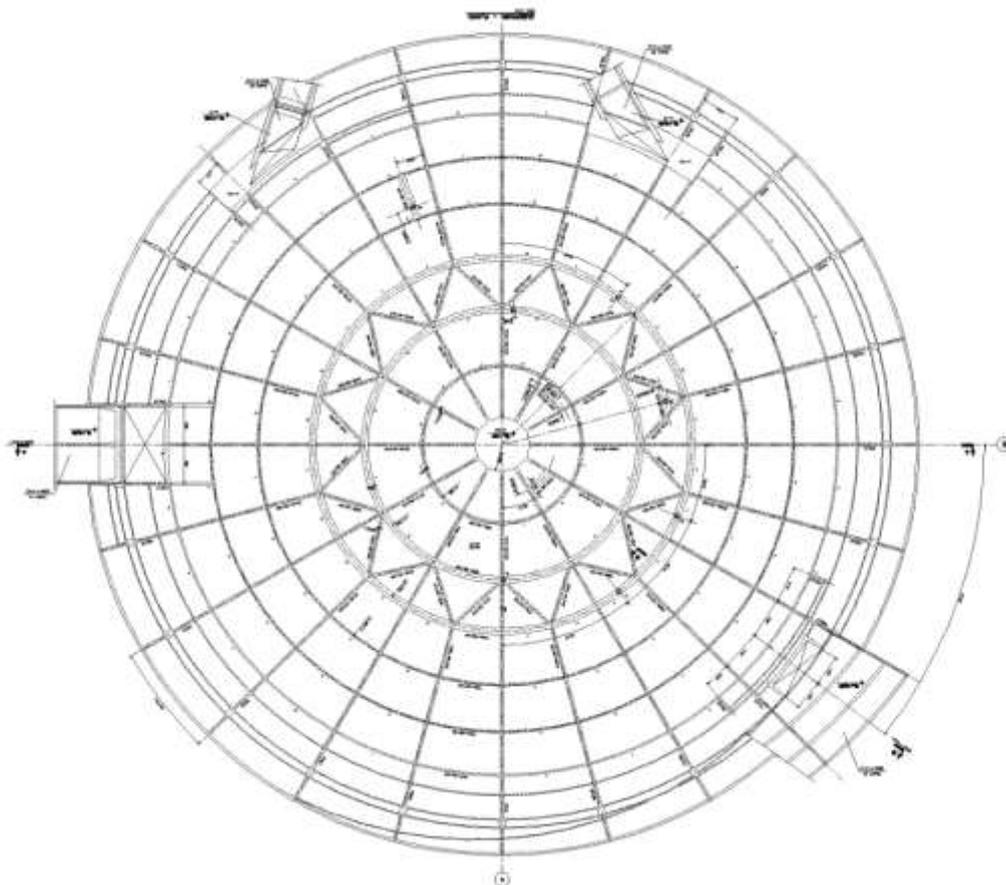
Fonte: REBELLO, 2000

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 distribuído 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 240). Mas, 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 da cúpula.

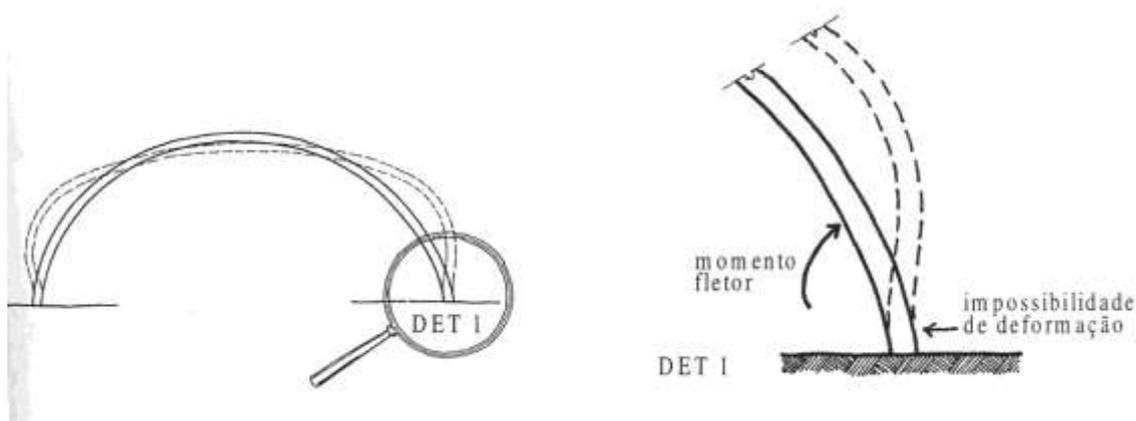
Nesse caso, como a cúpula não apresenta somente esforços de compressão, os esforços de flexão geram grandes esforços horizontais nos apoios causando uma tendência da cúpula aumentar de tamanho na base. Essa tendência gera um efeito chamado de “Perturbação de Borda” (REBELLO, 2000). A perturbação de borda (Figura 241) 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 240 – Planta de formas da cobertura do Museu Nacional.



Fonte: Projetos estruturais do Museu Nacional, cedidos pela construtora Casuarina Consult. LTDA.

Figura 241 – 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 242, 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 243).

Figura 242 – Execução das Fundações e do Anel de Compressão na base da cúpula.



Fonte: Acervo VIA Engenharia.

Figura 243 – Execução da base da cúpula – parede dupla.



Fonte: Acervo 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 permite 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 (Figura 244) que, nas extremidades se apoiam nos arcos da cúpula e, no centro, comprimem um maciço de concreto suspenso.

Figura 244 – Execução das formas das vigas radiais do pavimento de exposições.

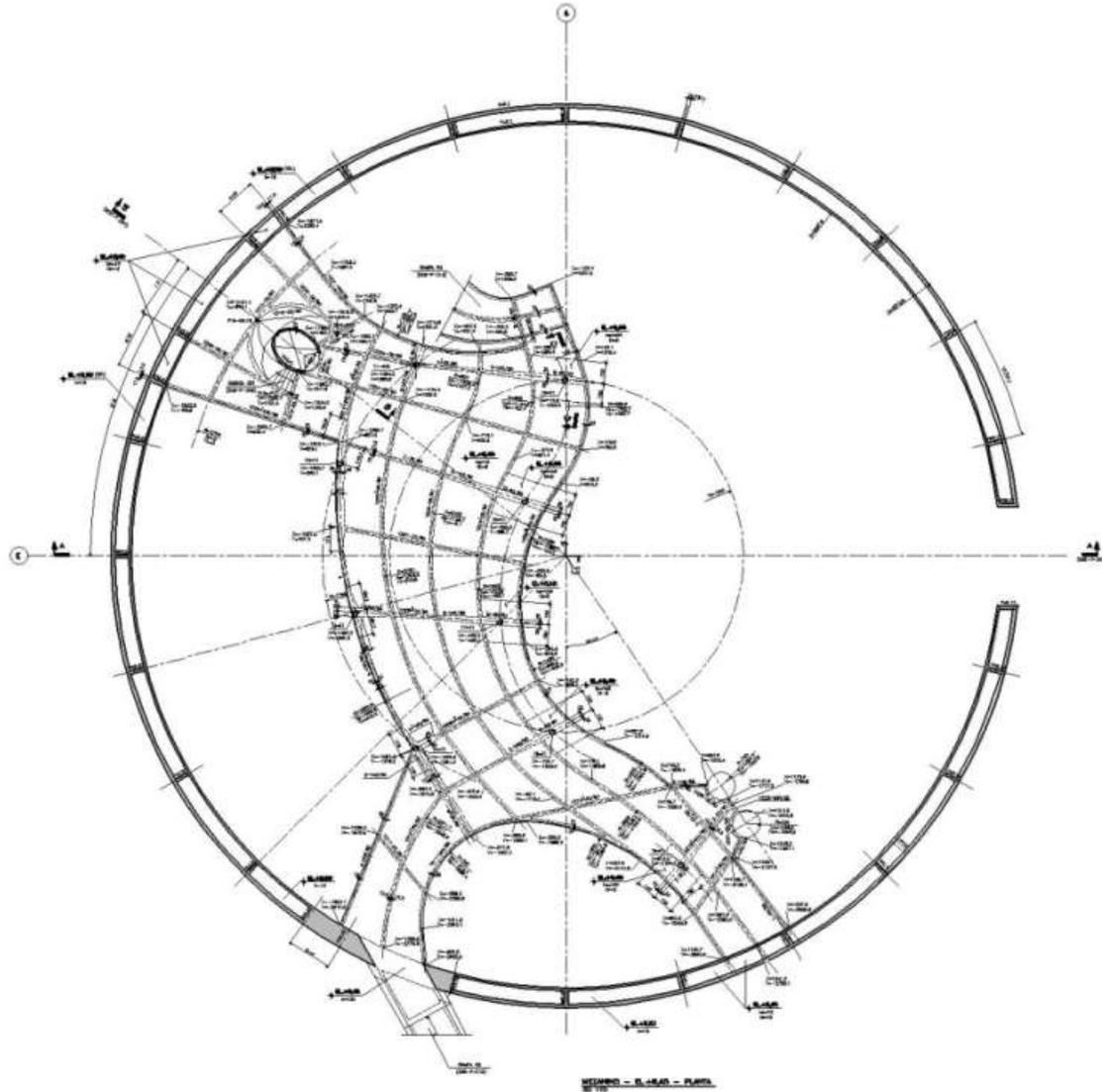


Fonte: Acervo VIA Engenharia.

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 245).

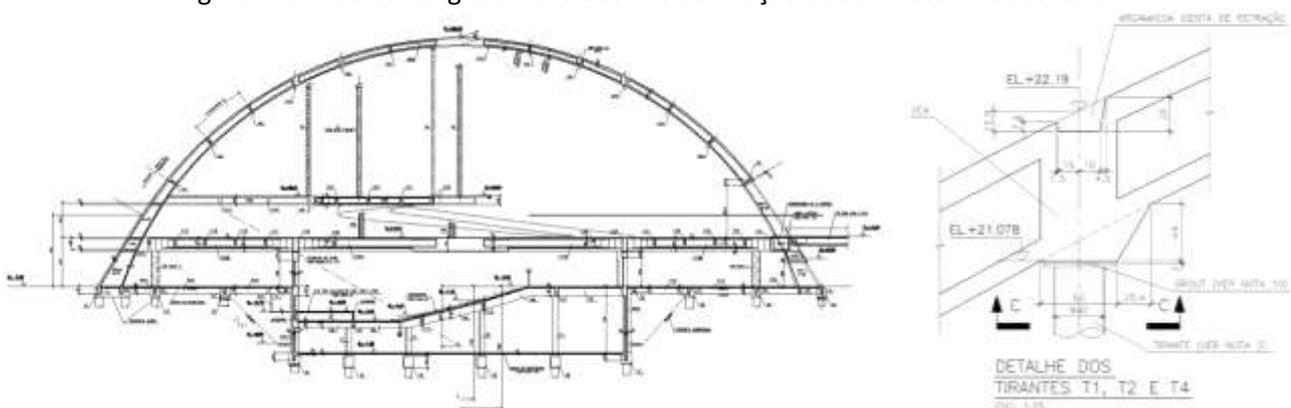
Na sequência (Figura 246) o corte mostra os tirantes que sustentam a laje do mezanino e o ponto de contato deles na estrutura da cúpula. Essa estrutura teve que ser reforçada nesses pontos, como se vê no detalhe.

Figura 245 – Planta de Formas do Mezanino.



Fonte: Projetos estruturais do Museu Nacional, cedidos pela construtora Casuarina Consult. LTDA.

Figura 246 – Corte Longitudinal e detalhe de fixação dos tirantes na cobertura.



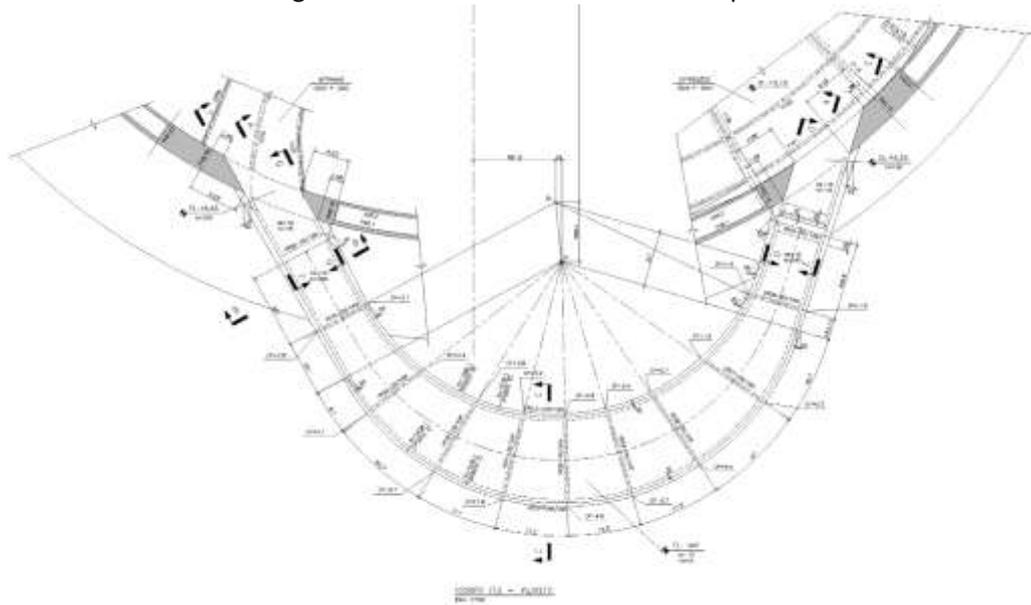
Fonte: Projetos estruturais do Museu Nacional, cedidos pela construtora Casuarina Consult. LTDA.

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, 2002, p.73).

O elemento que mais se destaca na arquitetura do museu é a rampa externa (rampa 3), 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. A rampa 3, que sai da cúpula em curva, retornando à 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 possui uma sequência de 11 vigas dispostas de forma radial ao longo do comprimento da rampa (Figura 247).

Figura 247 – Planta de Formas da Rampa 3.



Fonte: Projetos estruturais do Museu Nacional, cedidos pela construtora Casuarina Consult. LTDA.

Análise Estrutural

Com base nos dados levantados nos desenhos técnicos da estrutura do Museu Nacional – planta de formas, cortes, desenhos arquitetônicos, etc. – cedidos pela empresa Casuarina Consultoria LTDA. e pela construtora VIA Engenharia, foi modelado, no programa SAP 2000, o sistema estrutural do Museu Nacional. A Figura 248 mostra a montagem do sistema estrutural em estudo.

Os valores utilizados no modelo em estudo foram tabulados na Tabela 7. Para essa análise estrutural, foram consideradas apenas o peso próprio da estrutura. Para simplificar a leitura dos resultados foram desconsiderados no modelo as rampas 1 e 2, respectivamente a rampa de acesso ao Pavimento de Exposições e a rampa que liga esse pavimento ao mezanino.

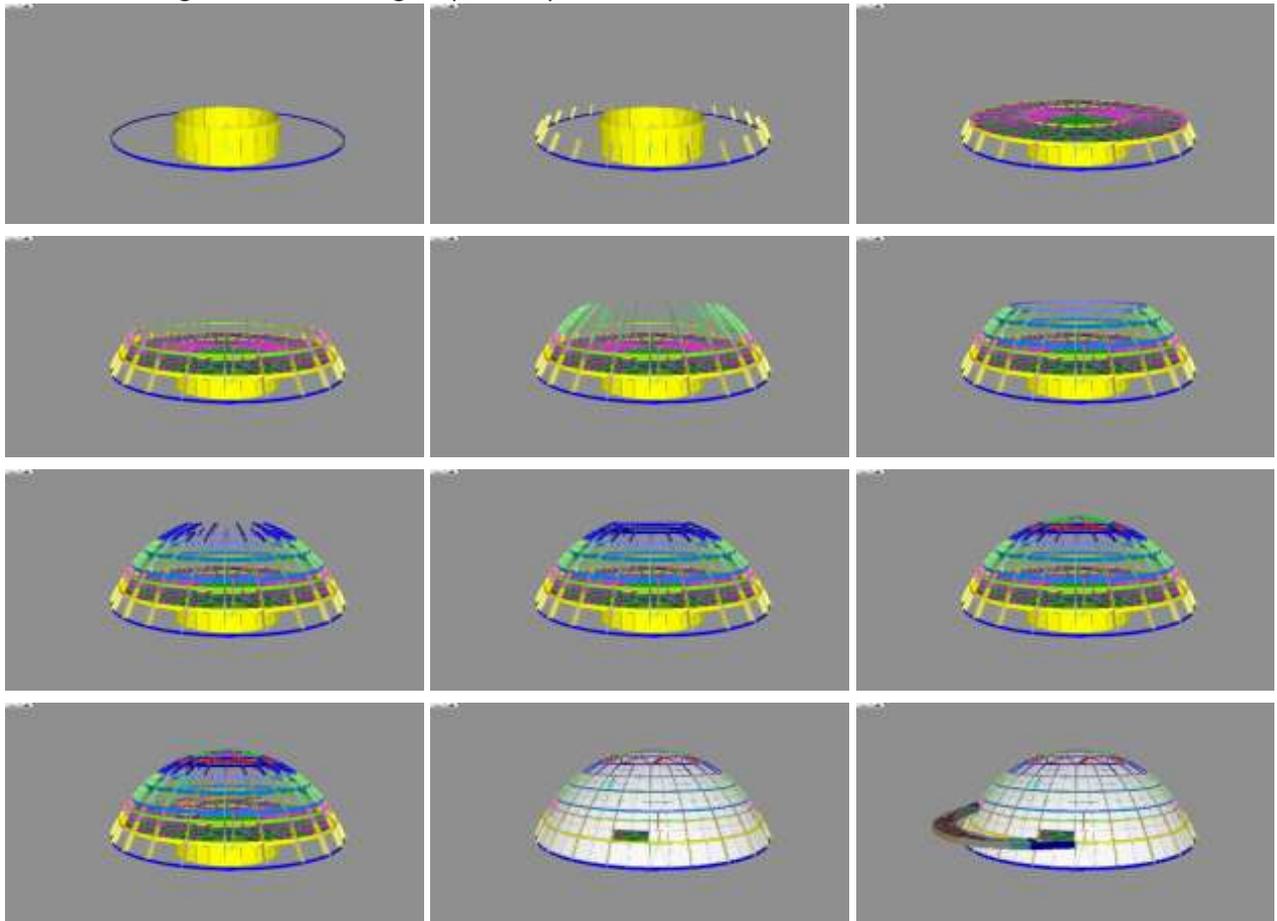
Tabela 7 - Dimensões da estrutura do Museu Nacional, levantadas para análise estrutural e inseridas no modelo no software SAP2000.

ELEMENTO	A (m)	B (m)	COR
1 - Parede Estrutural do Auditório (subsolo)		0,20	
2 - Anel de Compressão (térreo)	0,25	0,80	
3.1 - Paredes 5 a 29 parte 1 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	1,70	
3.2 - Paredes 5 a 29 parte 2 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	1,30	
3.3 - Paredes 5 a 29 parte 3 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	1,15	
4.1 - Vigas 7 a 30 parte 1 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	1,10	
4.2 - Vigas 7 a 30 parte 2 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	0,93	
4.3 - Vigas 7 a 30 parte 3 (arcos meridianos – cobertura)	0,25	0,83	
5 - Reforço 01 – Exposição (anel paralelo – cobertura)	0,20	1,25	
6 - Reforço 02 – Mezanino (anel paralelo – cobertura)	0,20	0,85	
7 - Viga 01 (anel paralelo – cobertura)	0,25	1,15	
8 - Viga 02 (anel paralelo – cobertura)	0,25	1,04	
9 - Viga 03 (anel paralelo – cobertura)	0,25	0,96	
10 - Viga 04 (anel paralelo – cobertura)	0,60	1,00	
11 - Viga 05 (anel paralelo – cobertura)	0,60	0,90	
12 - Viga 06 (anel paralelo – cobertura)	0,25	0,83	
13 - Vigas 31 a 54 (reforços – cobertura)	0,25	0,93	
14 - Viga 55 (reforço tirantes 9 e 3)	0,60	1,10	
15 - Vigas 56 e 58 (reforços tirantes 7 e 6)	0,60	0,83	
16 - Viga 57 (reforço tirante 7)	0,25	0,83	
17 - Vigas 110 a 130 (radiais do pav. de exposições)	0,60	1,40	
18 - Vigas 103 a 107 (circulares do pav. de exposições)	0,20	0,70	
19 - Viga 108 (circular do pav. de exposições)	0,50	1,40	
20 - Viga 109 (circular do pav. de exposições)	0,20	0,90	
21 - Viga 134 (viga do elevador)	0,20	0,90	
22 - Laje do pavimento de exposições	0,10	0,10	
23 - Tirantes do Mezanino	D=0,40	E=0,012	
24 - Vigas de borda do Mezanino	0,25	0,85	
25 - Vigas de bordas do Mezanino (reforçadas nos tirantes)	0,50	0,85	
26 - Vigas internas do Mezanino	0,25	0,80	
27 - Vigas internas do Mezanino (reforçadas nos tirantes)	0,50	0,80	
28 - Laje do Mezanino		0,10	
29 - Vigas 23 e 24 parte 1 (Vigas de borda da rampa 3)	0,24	1,85	
30 - Vigas 23 e 24 parte 2 (Vigas de borda da rampa 3)	0,22	1,75	
31 - Vigas 23 e 24 parte 3 (Vigas de borda da rampa 3)	0,20	1,62	
32 - Vigas 23 e 24 parte 4 (Vigas de borda da rampa 3)	0,20	1,30	
33 - Vigas 25 e 35 (Vigas internas da rampa 3)	0,40	1,00	
34 - Vigas 26 e 34 (Vigas internas da rampa 3)	0,20	0,77	
35 - Vigas 27 e 33 (Vigas internas da rampa 3)	0,20	0,57	
36 - Vigas 28 a 32 (Vigas internas da rampa 3)	0,20	0,42	
37 - Laje da rampa 3		0,10	

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

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 248 – Montagem passo a passo do sistema estrutural do Museu Nacional.



Fonte: Desenhos do Autor, programa SAP 2000.

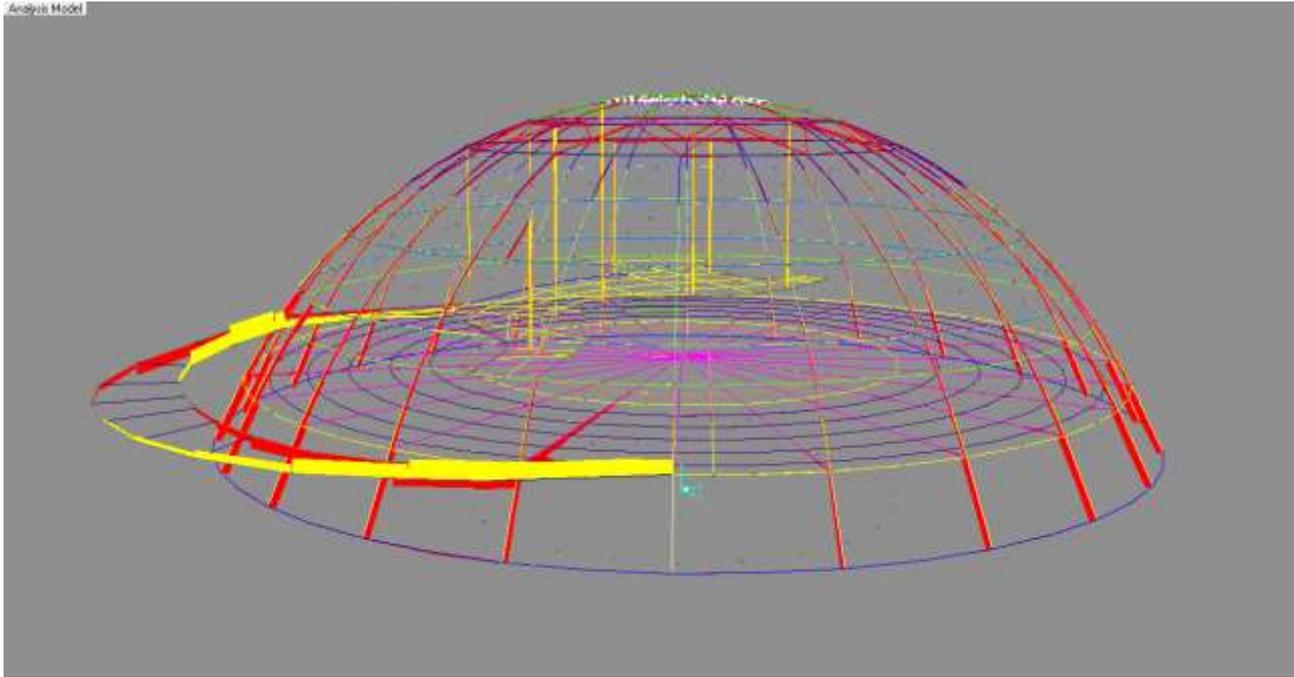
- **A Cúpula**

Podemos observar no diagrama de Forças Normais das vigas (Figura 249) que os arcos meridianos da cobertura do Museu Nacional estão sob compressão (cor vermelha). De acordo com os resultados obtidos através do programa SAP 2000, os valores variam de 264Tf na base dos arcos e aproximadamente 40Tf no topo da estrutura, no encontro dos arcos meridianos.

Além disso, o diagrama de momento fletor, mostrado mais adiante na Figura 252, quando analisamos a rampa externa, mostra que praticamente não há esforços de flexão na cúpula, constatando que a forma funicular descrita anteriormente foi conseguida pelo projetista.

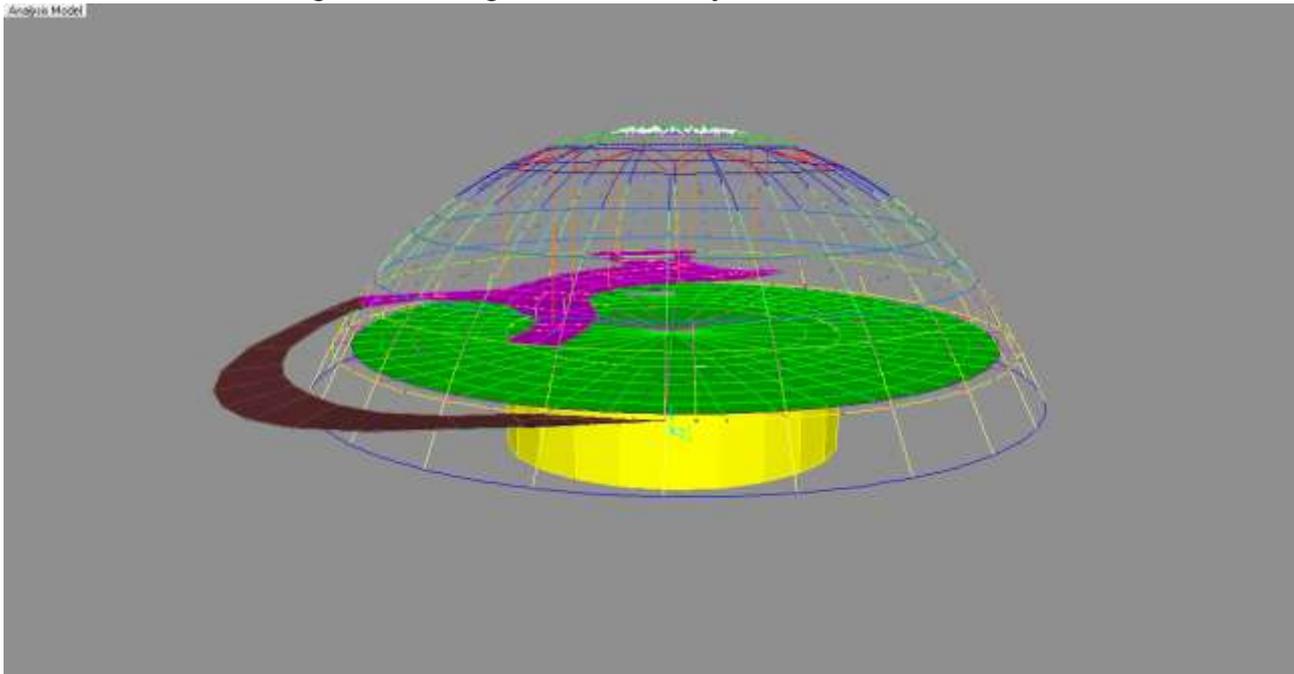
No diagrama abaixo (Figura 250), Diagrama de Deformações, podemos observar que os deslocamentos da estrutura na cúpula são muito pequenos – 0,02cm nos arcos meridianos, na altura do encontro desses com a laje do Pavimento de exposições e 0,1cm no topo da estrutura, no encontro dos arcos meridianos.

Figura 249 – Diagrama de Forças Normais da cobertura do Museu Nacional.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Figura 250 – Diagrama de Deformações do Museu Nacional.



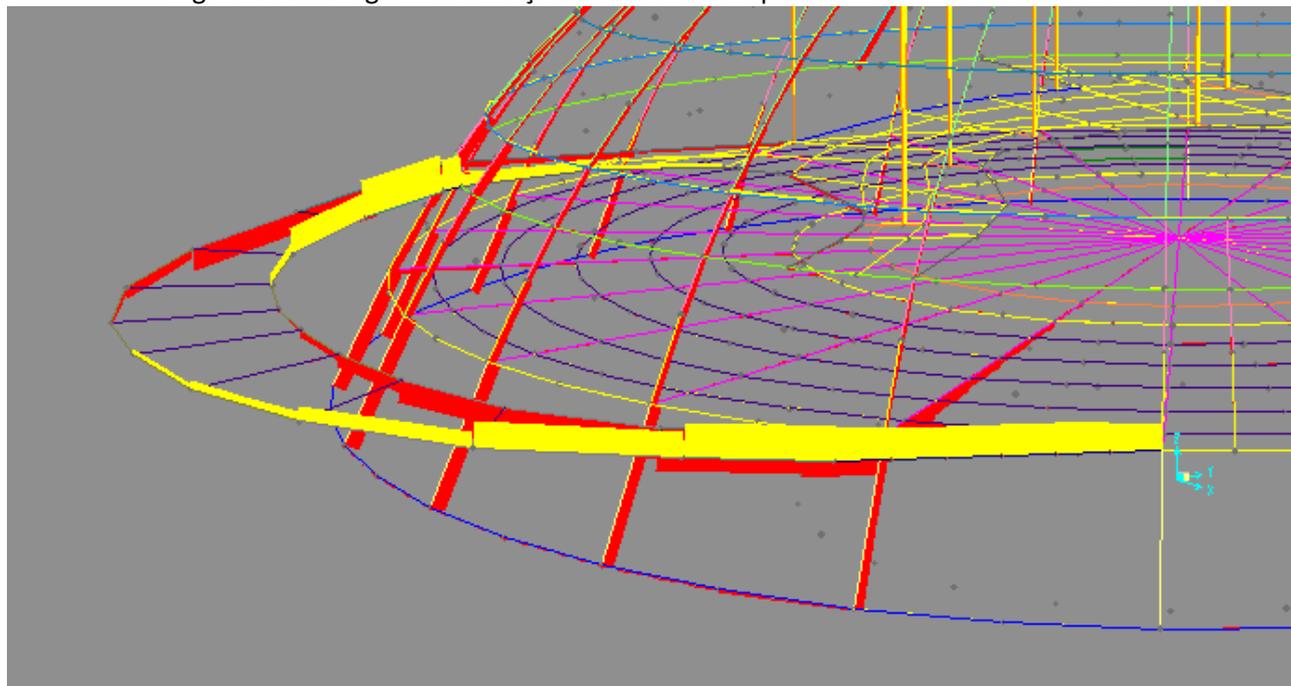
Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

- **A Rampa Externa**

Usando o mesmo diagrama de esforços normais, mostrado com detalhe para a rampa 3, externa à estrutura da cúpula (Figura 251), notamos que na viga 23, viga de borda da rampa, mais próxima à cúpula os valores obtidos variam entre $-790Tf$ (tração, mostrada em amarelo) no ponto em que a viga se engasta à estrutura da cúpula na altura do Mezanino, e $718Tf$ (compressão, mostrada em vermelho) no ponto oposto, onde a viga se une à estrutura na altura do Pavimento de Exposições. Já a viga 24, viga de borda externa da rampa, comporta-se de maneira oposta. No ponto

onde esta se une ao Pavimento de Exposições, o diagrama mostra uma tração de cerca de $-500Tf$, enquanto que no ponto onde esta se une ao Mezanino o valor que temos é de $480Tf$. (compressão).

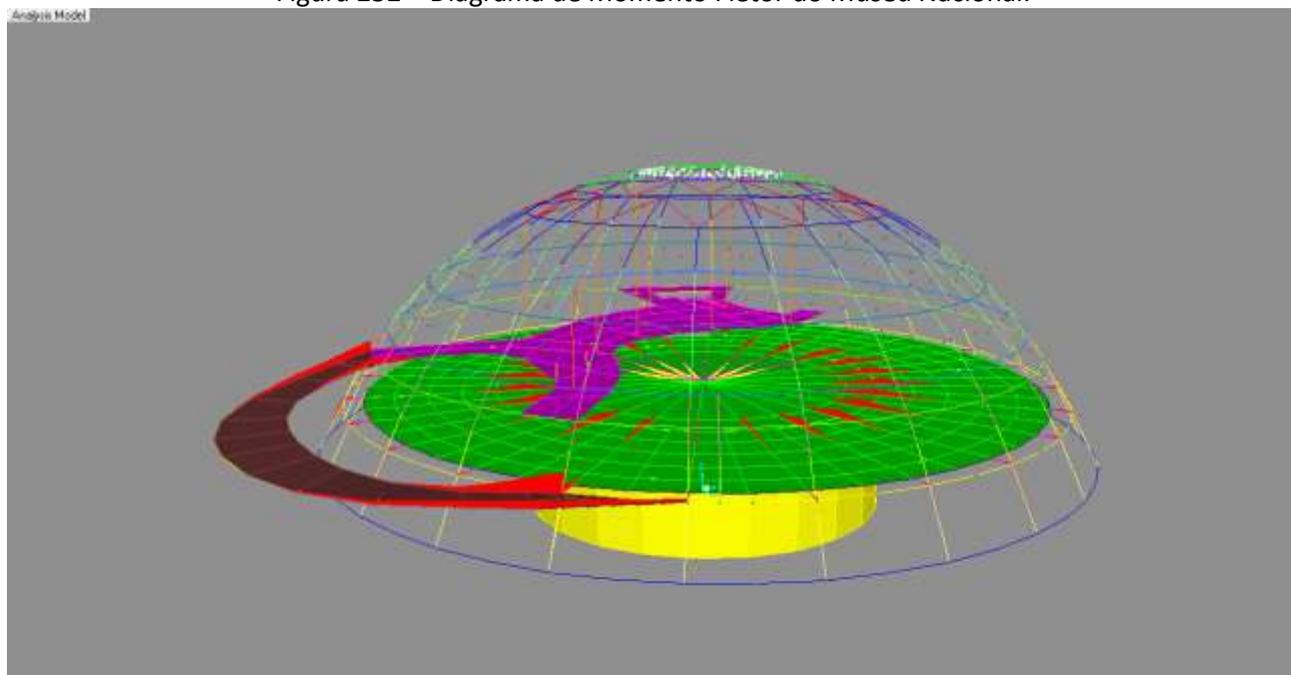
Figura 251 – Diagrama de Forças Normais da rampa externa do Museu Nacional.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Analisando agora o diagrama de momento fletor (Figura 252) podemos observar uma concentração de momento no encontro da rampa externa (rampa 3) com a estrutura da cúpula, justamente nos pontos onde foram adicionados reforços nessa estrutura, com paredes de concreto – paredes 15 e 16, no nível de Exposições e 19 e 20, no nível do Mezanino. Os valores observados são: $15.494,51KN.m$ ($1.580Tf.m$) no encontro da viga 23 com a estrutura no pavimento de Exposição e $9.228,06KN.m$ ($941Tf.m$) no encontro da viga 24 com a estrutura no nível do Mezanino.

Figura 252 – Diagrama de Momento Fletor do Museu Nacional.

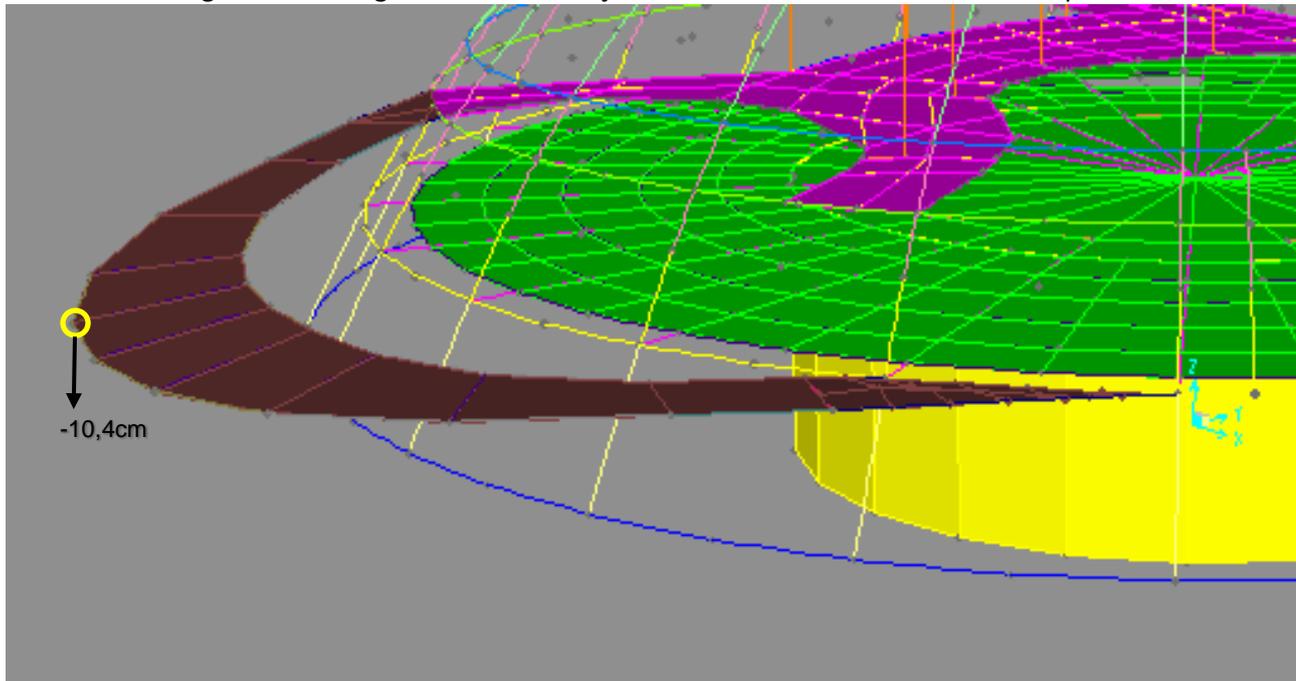


Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Podemos destacar também, observando novamente o gráfico de deslocamentos – detalhe para a rampa (Figura 253) que, em contraste com a estrutura equilibrada da cúpula de cobertura, a rampa 3, que possui um balanço de 20m para a parte externa da estrutura, apresenta um deslocamento mostrado no gráfico de 10,4cm na direção z (vertical). Considerando a Norma ABNT 6118/2003 (ABNT, 2004), a flecha admissível nesse caso, conforme Equação (4), seria de 8 centímetros, para deslocamentos visíveis em elementos estruturais (ABNT, 2004).

$$F_{adm.} = \frac{l}{250} = \frac{20m}{250} = 0,08m \text{ ou } 8cm \quad (3)$$

Figura 253 – Diagrama de Deformações do Museu Nacional – detalhe rampa 3.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

- **Os Tirantes**

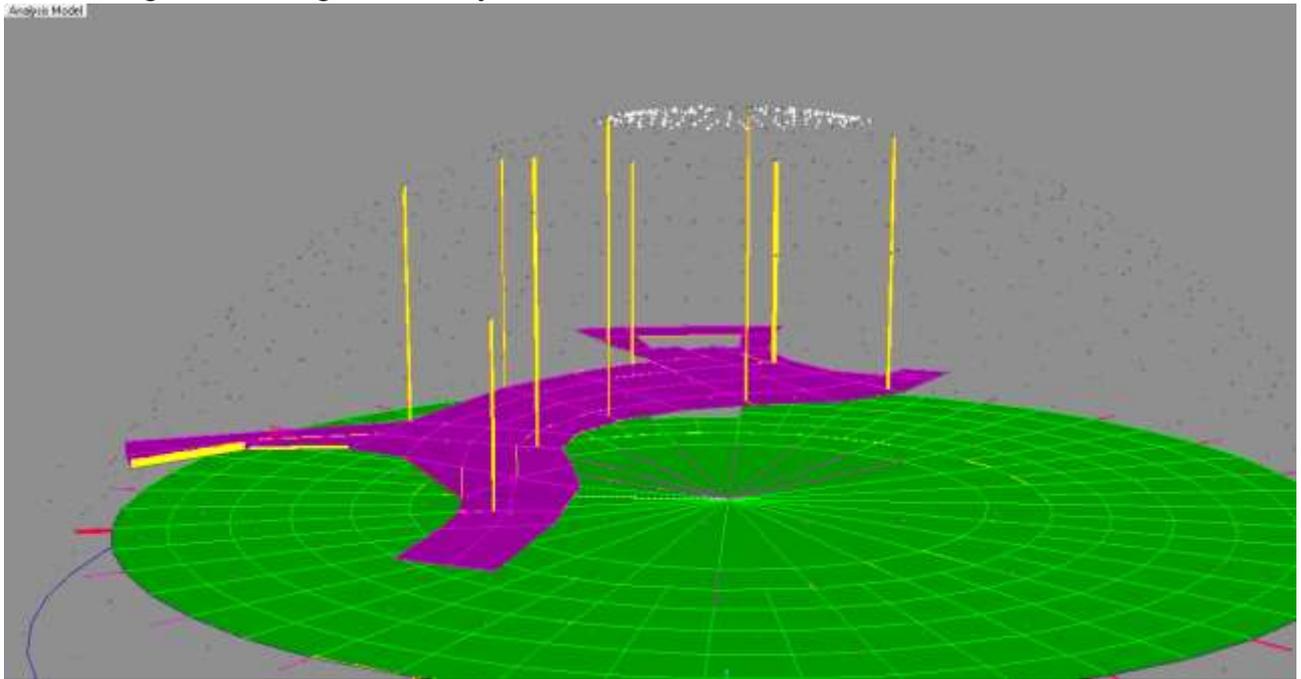
Observando novamente o diagrama de forças normais, com detalhe das reações nos tirantes que suportam o mezanino (Figura 254), notamos que eles sofrem uma tração (amarelo) de 150Tf.

Com base nos dados extraídos através do software podemos verificar qual a área de aço necessária para os tirantes, através da Equação (4).

$$\sigma = F/A \quad (4)$$

Com $\sigma = 2500\text{Kgf/cm}^2$, com coeficiente de segurança de 40% e $F=150\text{Tf}$, temos uma área de 150cm^2 . Esse resultado é consistente com a dimensão adotada para o tirante em questão, um tubo de aço SAC-250, com 40cm de diâmetro e 1,5cm de espessura ($A=152\text{cm}^2$).

Figura 254 – Diagrama de Forças Normais dos tirantes do mezanino do Museu Nacional.



Fonte: Desenho do Autor, programa SAP 2000.

Outro dado interessante observado nesse gráfico é o alongamento (Δl) dos tirantes que suportam o Mezanino. Calculando-se esse valor através da Equação (5), para o tirante 7, onde $P = 150.000\text{Kg}$; $l = 1622\text{cm}$; $E = 2.100.000\text{Kg/cm}^2$ e $A = 152\text{cm}^2$, temos um deslocamento de $0,76\text{cm}$. No gráfico mostrado acima, os deslocamentos dos tirantes 1 a 9 variam entre $0,4\text{cm}$ e $0,6\text{cm}$.

$$\Delta l = P.l / E.A \quad (5)$$

O Diagrama de Deformações mostra também um deslocamento de $1,5\text{cm}$ no centro da laje do Pavimento de Exposições. Esse ponto é o centro de um vão de $34,5$ metros sobre o auditório do pavimento térreo.

Podemos notar com essas análises que, assim como outros projetos desse momento, o projeto do Museu Nacional Honestino Guimarães, apesar de em um primeiro momento apresentar uma forma simples – a cúpula – o arquiteto acrescentou características únicas, exigindo soluções estruturais complexas, que não interferem no resultado da forma arquitetônica, e sim contribuem com ele. Isso só é conseguido por meio de uma total sintonia entre o sistema estrutural adotado e o desenho arquitetônico pretendido, desde o início do processo projetual.

As verificações atendem aos modelos previstos na Norma 6118:2003 (ABNT, 2004) – que atualmente, já preveem a análise de elementos finitos – como no exemplo os tirantes, observando os deslocamentos e esforços.

O modelo numérico empregado, de elementos finitos para casca, do programa SAP 2000, consiste da teoria de casca de Mindlin que foi associado ao pórtico espacial, gerando uma análise

completa da estrutura em 3D. Os resultados mostram que o modelo numérico empregado confirma a proposta inicial de estrutura sugerida pelos projetistas.

Com a modelagem precisa do sistema estrutural do museu foi possível analisar essa estrutura em vários aspectos com o auxílio de ferramentas computacionais e destacar os principais elementos que além da função estrutural, desempenham também uma importante função estética.

O protagonismo do sistema estrutural sempre esteve presente nos projetos de Oscar Niemeyer. Nos trabalhos mais recentes, o arquiteto 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, com sua forma plástica definida diretamente por uma cúpula, mas que recebe outros elementos estruturais para valorizar a arquitetura interna e externa do museu, como a rampa externa analisada neste estudo de caso.

Esse momento marca a afirmação da relação da arquitetura com a estrutura onde observamos a preocupação com a exploração dos elementos estruturais como elemento plástico e a busca da aplicação do conhecimento técnico na construção.

CONCLUSÕES

Na arquitetura moderna brasileira a estrutura representa um papel de grande relevância. Em obras consagradas internacionalmente, os elementos estruturais e sua função dentro do sistema estrutural adotado são os principais elementos responsáveis pela definição da forma. “(...)Terminada a estrutura a arquitetura já está presente.” (NIEMEYER, 2002). A relação – arquitetura - estrutura – pode ser vista com clareza nas obras dos grandes arquitetos modernista brasileiros, Lúcio Costa, Oscar Niemeyer, Affonso Reidy, Vilanova Artigas, Lina Bo Bardi, Paulo Mendes da Rocha, João Filgueira Lima, dentre tantos outros exemplos, responsáveis pela fama internacional da escola brasileira de arquitetura.

Além da inventividade dos arquitetos modernistas brasileiros, o material – concreto-armado – teve grande influência para o desenvolvimento da arquitetura moderna brasileira e na importância da estrutura para esse desenvolvimento. Desde do aparecimento no Brasil, no início do século XX, o concreto armado foi responsável por uma grande evolução tecnológica que também ganhou destaque internacional como a escola brasileira de concreto se estabelecendo como o material ideal para o desenvolvimento da Arquitetura Moderna no país. Contribuíram para esse desenvolvimento, a adequação do material ao mercado brasileiro além das possibilidades que o concreto, com sua capacidade de se moldar em formas livres, trazia para a arquitetura moderna, que procurava romper com a rigidez formal da arquitetura internacional.

Na Arquitetura Moderna Brasileira, definimos quatro momentos específicos da produção arquitetônica em que o sistema estrutural aparece de forma marcante, seja de maneira experimental, rompendo preceitos estéticos vigentes ou com maturidade técnica para impor uma relação de harmonia entre a estrutura e a arquitetura. Estes quatro momentos ajudaram a impulsionar a arquitetura brasileira como uma das mais importantes do mundo e caracterizam uma formação histórica, precedendo o início de um novo estilo dentro da arquitetura moderna brasileira.

O primeiro desses momentos acontece na década de 30, representando a gênese do protagonismo estrutural na arquitetura moderna brasileira, e é marcado pelas obras do arquiteto Luiz Nunes e do engenheiro Joaquim Cardozo nas diretorias D.A.C. e D.A.U. em Recife, Pernambuco. Essas obras revolucionaram os métodos então usuais na engenharia, explorando as dimensões das peças projetadas, harmonizando a estrutura à arquitetura e inovando o cálculo estrutural.

O segundo momento teve mais uma vez a presença do engenheiro Joaquim Cardozo, desta vez com os trabalhos realizados com o arquiteto Oscar Niemeyer no conjunto da Pampulha em 1940, mas não se restringe a esses exemplos. Destacam-se nesse momento também, obras da escola carioca de Affonso Reidy, Lúcio Costa, Irmãos Roberto e Sérgio Bernardes, durante as décadas

de 40 e 50. Durante esse momento, a arquitetura é fiel à estrutura que a suporta, o equilíbrio estrutural é visível e percebido na forma. A estrutura já exhibe a arquitetura, sem adereços e a beleza surge do equilíbrio estrutural da forma pura.

O terceiro momento acontece entre as décadas de 50 e 60 e é talvez o grande marco para a arquitetura moderna brasileira, a construção de Brasília, com a presença de Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo. Na arquitetura dos palácios e monumentos de Brasília a relação da arquitetura com a técnica é ainda mais evidente. Para que pudesse criar as formas livres, simples e puras, Niemeyer precisou de apuro tecnológico e soluções estruturais inovadoras para mais uma vez atingir os limites máximos dos materiais utilizados.

O quarto momento acontece na sequência do período da construção de Brasília, do final da década de 60 e durante a década de 70 e se estende até obras mais recentes, período marcado pela disseminação da arquitetura moderna brasileira pelo Brasil e o mundo, difundindo os princípios formais e técnicos em várias escolas modernistas, cada uma representando suas características regionais ou estéticas, mas respeitando a relação da estrutura com a expressão arquitetônica.

Desde as primeiras experiências modernistas na construção, enquanto movimento organizado, na década de 30, o sistema estrutural foi protagonista na concepção da arquitetura moderna brasileira, impulsionando soluções técnicas que se incorporaram ao seu repertório formal herdado do movimento moderno internacional, mas moldado por especificidades próprias, muitas vezes respaldadas pelo desenvolvimento técnico de ponta da “escola brasileira do concreto”.

A identificação dos quatro momentos da arquitetura moderna brasileira durante o período de recorte adotado como premissa – entre as décadas de 1930 e 1970 – se mostra adequado à caracterização da hipótese e organiza a exposição das análises que contribuem para a confirmação prática da teoria levantada.

A tese exposta neste trabalho confirma a relação da estrutura com a arquitetura, estabelecendo, através da análise de elementos ao mesmo tempo estruturais e estéticos, a posição de protagonismo do sistema estrutural adotado em obras que marcam os momentos emblemáticos para a evolução da arquitetura moderna brasileira.

A aplicação do método de análise histórica, arquitetônica e técnica pode contribuir para o desenvolvimento de outros trabalhos tanto com intuito de consagrar a importância tecnológica para o desenvolvimento da arquitetura moderna brasileira quanto para investigar a importante relação da estrutura com outros estilos e períodos arquitetônicos. O método também tem contribuído, ainda que de maneira experimental, no ensino da estrutura na arquitetura e da arquitetura para a engenharia.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6120:1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118:2003 - Projeto de estruturas de concreto**. Primeira edição: 31/03/2003, Versão corrigida: 31/03/2004. Válida a partir de 30/03/2004. Rio de Janeiro, 2004.
- ADDIS. Bill; **Edificação: 3000 Anos de Projeto, Engenharia e Construção**. Tradução Alexandre Salvaterra. Bookman, Porto Alegre, 2009.
- AGRIPINO, Maria Amélia; FRONER, Yacy Ara. **Athos de Brasília: Uma Experiência Singular**. DEART-UFU – Departamento de Artes da Universidade Federal de Uberlândia. 2004.
- ANDRADE, Rogério Pontes. **Matrizes Tectônicas da Arquitetura Moderna Brasileira 1940 – 1960**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Orientadora: Sylvia Ficher. Brasília, 2016.
- ARAKAKI, Suyene Riether. **Igreja Católica de Superquadra: origens da concepção arquitetônica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Orientador: Prof. Dr. José Manoel Morales Sánchez. Brasília, 2012.
- BENEVOLO, Leonardo. **História da Arquitetura Moderna**. Editora Perspectiva, São Paulo, 2001.
- BONDUKI, Nabil. **Affonso Eduardo Reidy – Arquitetos Brasileiros**. Portugal: Ed. Blau / Instituto Lina Bo e P. M. Bardi, 2000.
- BRASIL. **Superior Tribunal de Justiça (STJ)**. Livro institucional alusivo à inauguração da sua nova sede. Brasília: STJ, 1995.
- BRAZ, Joaquim Gaião Torreão. **Espaço e poder na corporação: o caso da sede do Superior Tribunal de Justiça em Brasília-DF**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2003.
- BILLINGTON, David P. **The Tower and The Bridge – The New Art of Structural Engineering**. Princetown University Press, 1983.
- CAMPOS, João – **Da Ideia ao Traço do Professor Niemeyer**. Revista Darcy, nº 3, novembro e dezembro de 2009, UnB. Brasília, p. 56- 66.
- CARDOZO, Joaquim. **Arquitetura Brasileira: características mais recentes**. Módulo, v. 1, n. 1, p. 6-9, Março de 1955.
- CARDOZO, Joaquim. **Dois episódios na história da arquitetura moderna brasileira**. Revista Módulo, nº 4, PP. 32-36. Março de 1956. Reeditado em Rede de Ideias – 2004.

CARDOZO, Joaquim. **Poesia Completa e Prosa / Sobre Literatura e Arte**. Fundação Joaquim Nabuco, Ed. Nova Aguilar e Ed. Massangana, Rio de Janeiro, 2007.

CARDOZO, Joaquim. **A construção de Brasília**. Rede de Ideias – s.d.

CASTELLI, Klauber Braga e NASCIMENTO, Rangel Ferreira do. **Dimensionamento da Haste de um Cilindro Utilizado em uma Prensa Através dos Conceitos de Flambagem e Ponto Crítico**. Revista Engenharia em Ação UniToledo, Araçatuba, SP, v. 01, n. 01, p. 200-211, out./dez. 2016.

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 Monolito – ensaios arquiteturais. Unifev. Outubro de 2009.

CONDURO, Roberto. **Par Ímpar**, em Revista Teias, Vol. 1, Nº 2. Rio de Janeiro, 2000.

CONDURO, Roberto. **Razão em forma: Affonso Eduardo Reidy e o espaço arquitetônico moderno**. In: Risco, revista de pesquisa em arquitetura e urbanismo programa de pós-graduação do departamento de arquitetura e urbanismo eesc-usp Vol. 2, No 2. São Paulo, 2005.

CONTIER, F. de A. **O edifício da FAU-USP e os materiais do brutalismo**. São Paulo: Atas do X Seminário DoCoMoMo, Curitiba, 2013.

COSTA, Alcilia Afonso de Albuquerque. **A produção arquitetônica moderna dos primeiros discípulos de uma Escola**, em Arquitextos ISSN 1809-6298, 098.05 ano 09, julho, 2008.

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.

FRACALOSSI, Igor. **Clássicos da Arquitetura: Residência Rietveld Schröder / Gerrit Rietveld**. Maio, 2012. ArchDaily Brasil. Acessado em 29/11/2017. (<https://www.archdaily.com.br/46426/classicos-da-arquitetura-residencia-rietveld-schroder-gerrit-rietveld>) ISSN 0719-8906.

FRACALOSSI, Igor. **Clássicos da Arquitetura: Casa Modernista da Rua Santa Cruz / Gregori Warchavchik**. Agosto, 2013. ArchDaily Brasil. Acessado em 29/11/2017.

(<https://www.archdaily.com.br/17010/classicos-da-arquitetura-casa-modernista-da-rua-santa-cruz-gregori-warchavchik>) ISSN 0719-8906.

FRAMPTON, Kenneth. **História Crítica da Arquitetura Moderna**. Tradução Jefferson Luiz Camargo, Editora Martins Fontes, São Paulo, 1997.

FRAMPTON, Kenneth. **Rappel a l'Ordre: Em Defesa da Tectônica**, 1990. In: Revista Gávea, nº 12, 1994.

FRANÇA. **Villa Savoye – Um Manifesto da Modernidade**. Panfleto de visitação do monumento Villa Savoye em Poissy, França. Centre des Monuments Nationaux – France, 2019.

FRASER, Valerie. **Brasília: a national capital without a national museum**, in The Architecture of the Museum, Manchester University Press, 2003.

GALLINDO, Cyl. **Joaquim Cardozo**. Rede de Ideias, 2004.

GIANNECCHINI, A. C. **Técnica e estética no concreto armado. Um estudo sobre os edifícios do MASP e da FAUUSP**. Disserta o de Mestrado. 305 p. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo. São Paulo, 2009.

FISCHMANN, Daniel Pitta. **O Projeto de Museus no Movimento Moderno: Principais Estratégias nas Décadas 1930-60**. Disserta o de Mestrado apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Gradua o em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obten o do grau de Mestre em Arquitetura. Porto Alegre, 2003.

HELENE, Paulo. **Vida útil de 106 Anos! Muito bem vividos!** IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2006. Acessado em 17/05/2019 (www.ibracon.org.br/news/index_vida.htm).

INOJOSA, Leonardo da Silveira Pirillo. **O Sistema Estrutural na Obra de Oscar Niemeyer**. Disserta o de Mestrado submetida   Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obten o do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo,  rea de concentra o Tecnologia. Brasília, 2010.

INOJOSA, L. S. P., Buzar, M. A. R, de Gregorio M.H. R. **Aspectos do Projeto Estrutural do Museu Nacional de Brasília**. Anais do XXXIII Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia (XXXIII CILAMCE), Ouro Preto, 2011.

ISKENDEROĐLU, Yasemin. **An Inquiry into the Design Potentials of Le Corbusier's Dom-Ino Clusters**. Thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. Turquia, Setembro de 2009.

KAEFER, Luiz Fernando. **A Evolu o do Concreto Armado. PEF 5707 – Concep o, Projeto e Realiza o das estruturas: aspectos históricos – 1998.3 – FEB-UNESP, 1998**. Acessado em 18/06/2019 (<http://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>).

KISS, Paulo. **De um Mestre para Outro**. Revista Thechne, nº 154. Janeiro de 2010. Acessado em 27/05/2019. (<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/154/artigo285789-1.aspx>).

KÜHL, Beatriz Mugayar. **Arquitetura do ferro e arquitetura ferroviária em São Paulo: reflexões sobre sua preservação.** Ateliê Editorial, Fapesp, Secr. Da Cultura, São Paulo, 1998.

LEAL, Edite Antão de M. **Igrejinha Cinquenta Anos.** Igrejinha e Santuário de Fátima, 2008. Acessado em 27/05/2019. ([Http://pnsfatimabsb.com.br/artigos/item/126-igrejinha-cinquenta-anos](http://pnsfatimabsb.com.br/artigos/item/126-igrejinha-cinquenta-anos)).

LE CORBUSIER e OZENFANT, Amédée. **Vers une Architecture. Colletion L'Esprit Nouveau** Paris: Crés Editeur, 1923. (em: CARVALHO, Lilian Scorel de. A revista francesa L'Esprit Nouveau na formação das ideias estéticas e da Poesia de Mário de Andrade. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, FFLCH. São Paulo, 2008).

LE CORBUSIER. **Por uma Arquitetura.** Série estudos, 5ª edição. Editora Perspectiva, São Paulo, 1998.

LEONÍDIO, Otávio **De arquiteturas e ideologias. O esquema arquitetura carioca versus arquitetura paulista** – Arqtextos – Portal Vitruvius, Dezembro de 2006.

LIRA, José Tavares Correia de. **Warchavchik: fraturas da vanguarda.** Editora Cosac & Naify, São Paulo, 2011

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

LOTURCO, Bruno. **Carreira - Bruno Contarini.** Revista Thechne, nº 106, Janeiro de 2006. Acessado em 27/05/2019. (<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/106/artigo285525-1.aspx>).

MACEDO, Danilo Matoso e SILVA Elcio Gomes da. **Contribuições de Joaquim Cardozo à Arquitetura de Oscar Niemeyer.** Em 11º Seminário Nacional do Docomomo Brasil. Recife: DOCOMOMO_BR, 2016.

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

MAHFUZ, Esdson da Cunha **The importance of being Reidy** – Arqtextos – Portal Vitruvius, Setembro de 2003.

MARQUES, Sônia e NASLAVSKY, Guilah. **Eu vi o modernismo nascer... foi no Recife.** em Arqtextos ISSN 1809-6298131.02, São Paulo, 2011.

MOMA. **The Museum of Modern Art, MoMA Highlights,** Nova Iorque, The Museum of Modern Art, revisado em 2004, publicação original 1999, p. 86 Acessado em 17/11/2017. (<https://www.moma.org/collection/works/4044>)

MOREIRA, André Luiz 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.

NASCIMENTO, Elisa Fonseca. **Arte e Técnica na Obra de Joaquim Cardozo: notas para a construção de uma Biografia Intelectual**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PROURB/FAU/UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Urbanismo. Rio de Janeiro, 2007.

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.

OBIOL, Sánchez, Agustí. **Una cierta aproximación a la estructura del MAM**. Em: "DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura", UPC, Catalunha, 2003, núm. 19, p. 58-69.

O GLOBO. **Arquiteto e engenheiro contam histórias dos tempos de estágio**. O Globo Online. 30 de agosto de 2006. Acessado em 23/04/2010.
(<http://oglobo.globo.com/educacao/mat/2006/08/25/285413135.asp>)

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.

ORNSTEIN, Sheila Walbe; NASCIMBENI, J E F; ROMERO, M A; VILLORA, M T D. **Avaliação do processo produtivo do edifício do Museu Brasileiro da escultura (mube): do projeto ao uso: síntese da pesquisa**. Boletim Técnico, São Paulo, FAU/USP, n. 1, p. 1-103, 1991.

PASQUA, J. F. S. **O Papel da Estrutura na Definição da Arquitetura - Estudo de Caso do Prédio da FAU/USP**. Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista. Curso de pós-graduação lato sensu em Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística. Programa de Pesquisa e Pós-graduação. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

PEREIRA, Nathalia Coelho. **Concepção Arquitetônica e Estrutural de Duas Obras de Oscar Niemeyer: Igreja da Pampulha e Pavilhão da Gameleira**. Dissertação submetida ao departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em estruturas e construção civil. Brasília, 2012.

PEREZ, Adelyn. **Clássicos da Arquitetura: Museu Guggenheim / Frank Lloyd Wright**. Novembro, 2016. ArchDaily Brasil. (Trad. Souza, Eduardo). Acessado 29/11/2017.
(<https://www.archdaily.com.br/br/798207/classicos-da-arquitetura-museu-guggenheim-frank-lloyd-wright>) ISSN 0719-8906.

PORTO, Cláudia Estrela. **As Formas Estruturais na Arquitetura de Brasília: Uma Saga Tecnológica.** Paranoá eletrônico 4, Volume 9, 23 de Abril de 2007. Acessado em 29/11/2017. (http://www.unb.br/fau/pos_graduacao/paranoa/paranoa.htm). ISSN 1679-094.

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.

SAIA, Luiz, **Mies van der Rohe.** Revista Habitat, n. 22, 1955. em: Risco - Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) - São Carlos – SP, n. 18/19, p 187 188, 2014

SALVATORI, Mario. **Por que os Edifícios Ficam de Pé: a Força da Arquitetura.** 2ª edição, Editora WMF Martins Fontes. São Paulo, 2011.

SANTA CECÍLIA, Bruno. **Tectônica moderna e construção nacional.** em: 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, 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.

SANTOS, Roberto Eustaáquio dos. **A Armação do Concreto no Brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia.** Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Educação: “Conhecimento e Inclusão Social”, da Faculdade de Educação da UFMG, Belo Horizonte, MG. 2008.

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.** em: 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.

SILVA, Rafael Spindler. **O Conjunto Pedregulho e Algumas Relações Compositivas.** em: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, Belo Horizonte, v. 12, n. 13, Dezembro de. 2005. pp. 77-93.

SILVA, R. A. **O desafio da preservação do patrimônio arquitetônico modernista no Rio de Janeiro.** Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional do Instituto do Patrimônio Histórico e

Artístico Nacional, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Preservação do Patrimônio Cultural. Orientador: Claudia Feierabend Baeta Leal, Rio de Janeiro 2012.

SIQUEIRA, L.V.M.; **Apostila Laboratório de Materiais de Construção I**. Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2008.

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

TELLES, Pedro Carlos Silva. **História da Engenharia no Brasil. Século XX**. Ed. Clavero, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Notáveis empreendimentos da engenharia no Brasil**. Rio de Janeiro, LTC, 2017.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. Capítulo 12, em: Concreto: Ciência e Tecnologia, Geraldo Cechella Isaia (Editor), IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

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 do 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. **Voos 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.

ZEIN, Ruth Verde. **A década ausente. É preciso reconhecer a arquitetura brasileira dos anos 1960-70**. Em Arquitectos ISSN 1809-6298, 076.02 ano 07, setembro de 2006.

ZEIN, Ruth Verde. **A Arquitetura da Escola Paulista Brutalista 1953 – 1973**. Tese de Doutorado apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Arquitetura. Faculdade de

Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura – PROPAR. Setembro de 2005.

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 (Acesso em 27/05/2019).

Fondation LE CORBUSIE - www.fondationlecorbusier.fr (acesso em 19/08/2019).

Fundação Athos Bulcão - www.fundathos.org.br (Acesso em 27/05/2019).

Memorial JK - www.memorialjk.com.br (Acesso em 27/05/2019).

Ministério das Relações Exteriores - www.itamaraty.gov.br/ (Acesso em 27/05/2019).

MoMA - The Museum of Modern Art - www.moma.org (Acesso em 27/05/2019).

Portal da Câmara dos Deputados - www.camara.gov.br (Acesso em 27/05/2019).

Portal Educatorium - www.educatorium.com (Acesso em 21/05/2010)

Portal IPHAN - www.iphan.gov.br (Acesso em 27/05/2019).

Portal Museu Oscar Niemeyer - www.museuoscarniemeyer.org.br (Acesso em 27/05/2019).

Projeto Memória - www.projetomemoria.art.br (Acesso em 27/05/2019).

Site MAM do Rio - www.mam.rio (Acesso em 30/08/2019)

Site Oficial de Joaquim Cardozo - www.joaquimcardozo.com (Acesso em 18/11/2017).

The Wrigth Library - www.steinerag.com (Acesso em 25/08/2019).