

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

**EQUILIBRIO ESTRUTURAL E ARQUITETÔNICO NA OBRA DE
OSCAR NIEMEYER. ESTUDO DE CASO:
A PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA**

STEFANO GALIMI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: MÁRCIO AUGUSTO ROMA BUZAR

BRASÍLIA
Fevereiro de 2016

Galimi, Stefano

Equilíbrio Estrutural e arquitetônico na Obra de Oscar Niemeyer. Estudo de caso: a Procuradoria Geral da República /Stefano Galimi

Brasília, 2017

162 p. :il.

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

1. Estrutura.

2. Arquitetura. 3. Oscar Niemeyer. 4. Procuradoria Geral da República

I. Universidade de Brasília. FAU

II. Título.

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

Assinatura

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

**EQUILIBRIO ESTRUTURAL E ARQUITETÔNICO NA OBRA DE
OSCAR NIEMEYER. ESTUDO DE CASO:
A PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA**

STEFANO GALIMI

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

Aprovado por:

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

João da Costa Pantoja, Doutor (FAU, UnB)
(Examinador Interno)

Lenildo Santos da Silva, Doutor (ENC, UnB)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, 03 de Fevereiro de 2016.

A minha avó, Giovanna, para sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha amada mãe, Lucia, pelo amor, força, determinação, carinho e pela grande ajuda ao longo da minha vida, sempre. A ela, devo tudo.

A minha querida avó *in memoriam*, Giovanna, por ter me ensinado o significado do amor, a importância da honestidade e o caminho da liberdade que estou percorrendo junto com ela, ainda, para sempre.

A meu pai, Giuseppe, pelo suporte que me proporcionou ao longo da minha vida, me incentivando para alcançar todas as grandes etapas do meu percurso de vida.

A minha família por ter me suportado tanto nas horas repletas de felicidade quanto nos momentos obscuros que marcaram o meu viver.

Aos meus amigos, Luca, Alessandro, Momo, Michele, Mattia, Alessio, Alberto, Ricardo pelo amor incondicional que somente os irmãos sabem irradiar.

Ao meu orientador, professor Márcio Buzar, amigo, irmão, que me proporcionou uma ajuda incrível nessa etapa da minha vida e sempre esteve ao meu lado, batalhando comigo nessa aventura.

Ao professor João Pantoja, amigo, irmão, pela força de sempre, pelos conselhos valiosos, pela alegria que me proporcionou, pelo companheirismo de sempre e por todas as etapas que a gente alcançou juntos.

Ao professor José Humberto Matias de Paula, amigo, irmão, pela surpreendente visão que orientou esse trabalho, capaz de despertar sentimentos críticos inesperados e olhares que aumentaram a amplitude do meu raciocínio.

Ao engenheiro Marco Bessa, amigo, irmão, pela grande força e dedicação que me ajudou a desenvolver esse trabalho.

Ao arquiteto Leonardo Inojosa, amigo, irmão, pelo companheirismo, conselhos e proposições que ajudaram me tornar um profissional melhor.

Ao engenheiro Frederico Scheidt Paulino pelo levantamento documental do meu trabalho de dissertação e pela grande disponibilidade.

À Deus, para sempre, acima de tudo.

"Se a reta é o caminho mais curto entre dois pontos, a curva é o que faz o concreto buscar o infinito."
(Oscar Niemeyer, fonte: Em suas próprias palavras)

RESUMO

A obra do Oscar Niemeyer, reconhecida no panorama da arquitetura internacional, sempre atraiu a atenção dos arquitetos e engenheiros para descobrir a dicotomia e o paradigma que existe entre estrutura e arquitetura. O marco que o mestre deixou nas formas dos seus projetos, é algo traçado pelo sistema estrutural e é estritamente ligado ao papel do desenho arquitetônico. Entre as obras do Oscar Niemeyer da década de 2000, símbolo da ordem jurídica e do regime democrático, a Procuradoria Geral da República se destaca por ser constituída por um complexo arquitetônico de seis edificações. Às formas geométricas deste conjunto, são definidoras de um espaço monumental representado por dois edifícios principais, realizados por meio de duas tecnologias construtivas e soluções estruturais diferentes. O bloco A, sustentado por um sistema atirantado, e o bloco B, apoiado em pilares de concreto armado, demonstram como a estrutura é fortemente ligada à concepção da morfologia arquitetônica. Através de uma análise estrutural executada pelo programa SAP2000, foi feita a identificação dos modelos estruturais constituintes o projeto da Procuradoria para obtenção de dados numéricos que representem a inovação de construir o mesmo objeto arquitetônico através de duas concepções antitéticas. Esse estudo da obra em questão permitiu entender os padrões que caracterizam os aspectos formais da tecnologia estrutural utilizada pelo gênio do arquiteto brasileiro e os relativos métodos construtivos adotados.

Palavras chave: Estrutura, Arquitetura, Oscar Niemeyer, Procuradoria Geral da República.

ABSTRACT

Oscar Niemeyer's work, recognized in the landscape of international architecture, has always attracted the attention of architects and engineers to discover the dichotomy and paradigm that exists between structure and architecture. The landmark that the master left in the forms of his projects is something traced by the structural system and is strictly linked to the architectural design. Among the Works of Oscar Niemeyer of the 2000's, symbol of the juridical order and the democratic regime, the "Procuradoria Geral da República" stands out for being constituted by an architectural complex of six buildings. The geometric forms of this complex are defining a monumental space represented by two main buildings, realized by two constructive technologies and different structural solutions. The block "A", supported by a cable-stayed system, and the block "B", supported by reinforced concrete pillars, demonstrates how the structure is strongly linked to the design of architectural morphology. Through a structural analysis carried out by the SAP2000 program, it was possible to identify the structural models that constitute the "Procuradoria's" project to obtain numerical data that represent the innovation of constructing the same architectural object through two antithetical conceptions. This study of the work in question allowed to understand the patterns that characterize the formal aspects of the structural technology used by the genius of the Brazilian architect and the relative constructive methods adopted.

Key words: Structure, Architecture, Oscar Niemeyer, Procuradoria Geral da República.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procuradoria Geral da República, Brasília, DF; Fonte: Daniel Zukko.	23
Figura 2 - Oscar Niemeyer observando a maquete da escola em Belo Horizonte (MG). .	28
Figura 3 - Edifício Gustavo Capanema, sede do IPHAN no Rio de Janeiro (RJ).	29
Figura 4 - Edifício Obra do Berço no Rio de Janeiro (RJ). Fonte: DURAND e SALVATORI, 2011.....	30
Figura 5 - Oscar Niemeyer estuda o projeto da ONU em Nova Iorque. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	31
Figura 6 - Conjunto arquitetônico de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	34
Figura 7 - Cassino de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	35
Figura 8 - Clube de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.....	36
Figura 9 - Fachada posterior da Igreja de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	37
Figura 10 - Congresso Nacional de Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	38
Figura 11 - Palácio da Alvorada, Brasília. Fonte: www.upload.wikimedia.org	39
Figura 12 - Cortes transversais do Palácio. Fonte: Vasconcelos, 1992, p. 88.	40
Figura 13 - Desenho da armadura dos pilares do Palácio da Alvorada. Fonte: Vasconcelos, 1992.....	40
Figura 14 - Pilar do Palácio em obras. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal.	41
Figura 15 - Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.....	41
Figura 16 - Detalhe da solda adicional nas barras de aço do Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Vasconcelos, 1992.....	42
Figura 17 - Armação dos pilares do Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Arquivo público do Distrito Federal.....	42
Figura 18 - Supremo Tribunal Federal, Brasília. Fonte: www.saraivareporter.com	43
Figura 19 - Teatro Nacional “Claudio Santoro”, Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.	44
Figura 20 - Estrutura principal do Teatro Nacional “Claudio Santoro”, Brasília. Fonte: SOUZA, 2009.....	44
Figura 21 - Corte do Teatro Nacional “Claudio Santoro” mostrando os muros de contenção. Fonte: SOUZA, 2009.	45
Figura 22 - Catedral Metropolitana de Brasília. Fonte: o autor.	46
Figura 23 - Estrutura de escoramento das colunas da catedral. Fonte: www.vitruvius.com.br/revistas/	47
Figura 24 - Diagramas de forças cortantes e momentos fletores máximos. Fonte: PESSOA, 2002.	48
Figura 25 - Museu Nacional de Brasília. Fonte: www.techne.pini.com.br	48
Figura 26 - Corte longitudinal do Museu Nacional de Brasília. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.....	49
Figura 27 - Representação de um elemento de barra. Fonte: REBELO, 2000.	53

Figura 28 - Representação de uma treliça. Fonte: REBELO, 2000.	54
Figura 29 - Representação de um pórtico. Fonte: REBELO, 2000.	54
Figura 30 - Representação de um bloco. Fonte: REBELO, 2000.	54
Figura 31 - Representação de elementos de casca. Fonte: REBELO, 2000.	55
Figura 32 - Representação esquemática do apoio do 1º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.19.....	56
Figura 33 - Representação esquemática do apoio do 2º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.19.....	57
Figura 34 - Representação esquemática do apoio do 3º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.20.....	57
Figura 35 - Representação esquemática de vigas em relação a diversos apoios. Fonte: CARRIERI, 2007. P.21.....	58
Figura 36 - Representação esquemática de cargas distribuídas, superficial e linear. Fonte: REBELO, 2000.	59
Figura 37 - Tração simples de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.....	60
Figura 38 - Compressão simples e flambagem de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.....	61
Figura 39 - Força cortante atuando em uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.	61
Figura 40 - Momento fletor atuando em uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.	62
Figura 41 - Momento torções atuando na seção de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.....	62
Figura 42 - Desempenho com e sem manutenção para edificações residenciais. Fonte: Galimi e Camanho, 2016.....	65
Figura 43 - Definição das seções dos elementos estruturais no SAP2000. Fonte: o autor.	67
Figura 44 - Definição dos materiais e das geometrias no SAP2000. Fonte: o autor.	67
Figura 45 - Definição das combinações de carga no SAP2000. Fonte: o autor.	68
Figura 46 - Criação da estrutura no SAP2000. Fonte: o autor.....	68
Figura 47 - Análise estrutural no SAP2000. Fonte: o autor.....	69
Figura 48 - Comportamento de um cabo com carga concentrada no ponto médio. Fonte: REBELO, 2000.	70
Figura 49 - Fonte estaiada tipo harpa. Fonte: o autor.....	72
Figura 50 - Fonte estaiada tipo leque. Fonte: o autor.	72
Figura 51 - Vista noturna da ponte de Brooklin, fonte: www.wikipedia.it	74
Figura 52 - Ponte Grimsel, Suíça. Fonte: www.wikipedia.it	75
Figura 53 - Esforço normal da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.....	75
Figura 54 - Momento fletor da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.....	75
Figura 55 - Diagrama cortante da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.	76
Figura 56 - Diagrama de deslocamento da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.....	76

Figura 57 - Ponte de Sunniberg, Suíça. Fonte: www.wikipedia.it	77
Figura 58 - Esforço normal da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor. 77	77
Figura 59 - Diagrama do momento fletor da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor;.....	77
Figura 60 - Diagrama do cortante da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.....	78
Figura 61 - Diagrama do deslocamento da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.....	78
Figura 62 - Olimpiadächer, Munique, Alemanha. Fonte: www.archdaily.com.br	79
Figura 63 - Terminal aeroportuário Haj de Jeddah, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.som.com	80
Figura 64 - Estádio do Rei Fahd, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.tensinet.com . 81	81
Figura 65 - Detalhe do sistema atirantado do Estádio do Rei Fahd, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.tensinet.com	81
Figura 66 - Sede do Confea em Brasília. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.	83
Figura 67 - Vigas em balanço atirantadas. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.....	83
Figura 68 - Vigas em balanço atirantadas. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.....	84
Figura 69 - Edifício sede da SEBRAE. Fonte: www.techne.pini.com.br	84
Figura 70 - Passarelas atirantadas. Fonte: www.archdaily.com.br	85
Figura 71 - Conjunto da Procuradoria Geral da República. Fonte: http://www.panoramio.com . Credits: Rubens Craveiro.	86
Figura 72 - Vigas em concreto protendido e sistema de tirantes. Fonte: http://www.panoramio.com . Credits: Rubens Craveiro.	86
Figura 73 - Vista vespertina da Procuradoria Geral da República. Fonte: Rubens Craveiro.	87
Figura 74 - Localização do Conjunto arquitetônico da Procuradoria Geral da República. Fonte: Google Earth.....	88
Figura 75 - Localização dos blocos da PGR. Fonte: Arquivo da PGR.	88
Figura 76 - Bloco A. Fonte: Rubens Craveiro.	89
Figura 77 - Passarelas interligado o bloco A ao B.	90
Figura 78 - Fachada dos blocos A ao B. Fonte: Arquivo da PGR.	90
Figura 79 - Bloco B. Fonte: Rubens Craveiro.	91
Figura 80 - Bloco C, Auditório. Fonte: Robson Cesco.	92
Figura 81 - Passarela de concreto interligando o bloco C com o bloco A. Fonte: o autor. 92	92
Figura 82 - Fachada privada de aberturas, bloco C. Fonte: o autor.....	92
Figura 83 - Bloco C, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR. 93	93
Figura 84 - Corte longitudinal do Auditório, bloco C. Fonte: Arquivo da PGR.	93
Figura 85 - Construção do Auditório, bloco C. Fonte: Arquivo da PGR.	93

Figura 86 - Restaurante da PGR, bloco D. Fonte: o autor.	94
Figura 87 - Bloco D, em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.	94
Figura 88 - Bloco D, em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.	95
Figura 89 - Bloco D, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR.	95
Figura 90 - Corte longitudinal do Restaurante, bloco D. Fonte: Arquivo da PGR.	96
Figura 91 - Bloco E, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR.	96
Figura 92 - Corte longitudinal do Centro Médico, bloco E. Fonte: Arquivo da PGR.	97
Figura 93 - Bloco E. Fonte: Rubens Craveiro.	97
Figura 94 - Estrutura do Bloco E em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.	97
Figura 95 - Bloco F, Planta do térreo. Fonte: Arquivo da PGR.	98
Figura 96 - Bloco F, Planta do primeiro andar. Fonte: Arquivo da PGR.	98
Figura 97 - Corte longitudinal do Centro Médico, bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.	98
Figura 98 - Corte transversal do Centro Médico, bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.	99
Figura 99 - Vista aérea do Bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.	99
Figura 100 - Construção do Bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.	99
Figura 101 - Complexo da PGR. Fonte: o autor.	100
Figura 102 - Planta do térreo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	101
Figura 103 - Planta do mezanino, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	102
Figura 104 - Planta do 3° e 6° andares, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	103
Figura 105 - Planta do pavimento tipo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	103
Figura 106 - Passarelas de acesso internas, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	104
Figura 107 - Vazio interno entre núcleo rígido e andar, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	104
Figura 108 - Vazio interno entre núcleo rígido e andar, bloco A. Fonte: o autor.	105
Figura 109 - Planta de cobertura, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	105
Figura 110 - Fases de execução das fundações, bloco A. Fonte: SANTOS, 2008, p.3.	106
Figura 111 - Desenho esquemático de fundação, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	107
Figura 112 - Fundações em fase de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	107
Figura 113 - Fundações em fase de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	108
Figura 114 - Pilares provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	108
Figura 115 - Pilares provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	109
Figura 116 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	109
Figura 117 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	109
Figura 118 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	110
Figura 119 - Edificação em fase de construção, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	110
Figura 120 - Pilares provisórios de sustentação provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	110
Figura 121 - Sússekind e Oscar Niemeyer na obra do Sambódromo, Rio de Janeiro. ..	111

Figura 122 - Detalhe em corte de uma pétala da estrela estrutural. Fonte: Arquivo da PGR.....	111
Figura 123 - Vista das vigas estruturais de cobertura. Fonte: o autor.....	112
Figura 124 - Planta estrutural da estrela. Fonte: Arquivo da PGR.	112
Figura 125 - Corte AA da estrela estrutural. Fonte: Arquivo da PGR.....	112
Figura 126 - Tirantes constituintes o sistema estrutural principal do prédio. Fonte: Arquivo da PGR.....	113
Figura 127 – Cordoalhas de aço constituintes de um cabo de tirante. Fonte: Arquivo da PGR.....	114
Figura 128 - Seções dos tirantes interno (100x50 cm) e externo (125x55 cm). Fonte: o autor.....	114
Figura 129 - Protensão dos tirantes, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	115
Figura 130 - Núcleo rígido contendo a circulação vertical. Fonte: Arquivo da PGR.	115
Figura 131 - Corte AA ¹ , bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR.	116
Figura 132 - Corte BB ¹ , bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR.	117
Figura 133 - Planta estrutural das vigas de cobertura, Pavimento tipo, Mezanino e núcleo rígido, bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR, desenho do autor.....	118
Figura 134 - Perspectiva das vigas estruturais de cobertura, bloco A, PGR.....	119
Figura 135 - Perspectiva do pavimento tipo, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	120
Figura 136 - Perspectiva do núcleo rígido, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	121
Figura 137 - Perspectiva do mezanino, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	122
Figura 138 – Montagem tridimensional da estrutura do bloco A em perspectiva, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.	123
Figura 139 - Fachada do modelo tridimensional do bloco A.	124
Figura 140 - Perspectiva do modelo tridimensional do bloco A. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	124
Figura 141 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 1 (1,4G+1,4Q). Fonte: SAP 2000, desenho do autor.	126
Figura 142 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco A, PGR.....	127
Figura 143 - Diagrama em perspectiva do Momento Fletor das vigas de cobertura, bloco A, PGR.....	128
Figura 144 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo X. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.	128
Figura 145 - Vista do bloco B, PGR. Fonte: Rubens Craveiro.	129
Figura 146 - Planta do térreo, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.	129
Figura 147 - Planta do mezanino, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.	130
Figura 148 - Planta do 3° e 6° andar, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.	130
Figura 149 - Planta do pavimento tipo, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.....	131
Figura 150 - Edificação em fase de construção, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.....	132

Figura 151 - Edificação em fase de construção, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.....	132
Figura 152 - Pilares principais externos e internos, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR....	133
Figura 153 – Núcleo rígido participante da estrutura resistente, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.....	133
Figura 154 – Corte CC ¹ , bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.....	134
Figura 155 - Planta estrutural do Pavimento tipo, Mezanino e núcleo rígido, bloco B....	135
Figura 156 - Perspectiva do pavimento tipo, bloco b, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	136
Figura 157 - Perspectiva do núcleo rígido, bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	137
Figura 158 - Perspectiva do mezanino, bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	138
Figura 159 – Montagem tridimensional mostrando a estrutura do bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.	139
Figura 160 - Fachada do modelo tridimensional do bloco B. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	140
Figura 161 - Perspectiva do modelo tridimensional do bloco B. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	140
Figura 162 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 1 (1,4G+1,4Q). Fonte: SAP 2000, desenho do autor.	141
Figura 163 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 2. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.....	142
Figura 164 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).....	143
Figura 165 - Perspectiva do Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).....	143
Figura 166 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco B, PGR.....	144
Figura 167 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco B, PGR.....	144
Figura 168 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo X, bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.....	145
Figura 169 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo Y, bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.....	145
Figura 170 - Desenho esquemático do caminho das forças da estrutura atirantada, bloco A.	146
Figura 171 - Desenho esquemático do caminho das forças atuantes na estrutura convencional, bloco B.	146
Figura 172 - Protensão nas vigas principais de cobertura na vista de planta, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	147
Figura 173 - Protensão nas vigas principais de cobertura, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.....	147
Figura 174 – Detalhe de protensão do tirante externo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	148

Figura 175 - Detalhe das cordoalhas constituintes o tirante externo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.	148
Figura 176 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura sem protensão, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+Q,0V).	149
Figura 177 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura com protensão, Combinação 4 (1,0G+1,01+1,0V).....	150
Figura 178 - Diagrama de Deslocamento Elástico com retirada do anel dos pilares externos, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V), bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.	151
Figura 179 - Perspectiva de Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).....	152
Figura 180 - Diagrama de Forças Normais com retirada do anel dos pilares externos, Combinação 2 (1,4G+1,4Q), bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.....	152
Figura 181 - Mangueira do Planalto. Fonte: o autor.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de desempenho para edificações residenciais.	64
Tabela 2 - Coeficiente para cálculo da carga de ruptura do cabo. Fonte: ABNT NBR 6327:2004.....	70
Tabela 3 - Dimensões dos elementos estruturais da estrela do bloco A para análise estrutural.....	119
Tabela 4 - Dimensões dos elementos estruturais do pavimento tipo do bloco A para análise estrutural.....	120
Tabela 5 - Dimensões dos elementos estruturais do núcleo rígido do bloco A para análise estrutural.....	121
Tabela 6 - Dimensões dos elementos estruturais do mezanino do bloco A para análise estrutural.....	122
Tabela 7 - Dimensões dos elementos estruturais do pavimento tipo do bloco B para análise estrutural.....	136
Tabela 8 - Dimensões dos elementos estruturais do núcleo rígido do bloco B para análise estrutural.....	137
Tabela 9 - Dimensões dos elementos estruturais do mezanino do bloco B para análise estrutural.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS

- CEPLAN: Centro de Planejamento da UnB.
CIEPS: Centros Integrados de Educação Permanente.
DAU: Diretoria de Arquitetura e Urbanismo
DAC: Diretoria de Arquitetura e Construção.
DF: Distrito Federal.
IAB: Instituto de Arquitetos do Brasil.
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.
Novacap: Companhia Urbanizadora da Nova Capital.
PGR: Procuradoria Geral da República.
UnB: Universidade de Brasília.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS	18
SUMÁRIO	19
INTRODUÇÃO	20
1.1 Justificativa	26
2. OSCAR NIEMEYER E A FORMA DA SUA ARQUITETURA	28
2.2 As fases da carreira profissional	33
3. ARTE ESTRUTURAL, DEFINIDORA DA FORMA ARQUITETÔNICA	50
3.1 O Arquiteto e o Engenheiro	50
3.2 Conceitos de estrutura	52
3.2.1 Geometria e morfologia dos elementos estruturais	53
3.2.2 Vínculos, apoios e graus de liberdade	55
3.2.3 Cargas permanentes e cargas acidentais	59
3.2.4 Esforços internos à estrutura	59
3.3 Vida útil, desempenho e segurança de uma estrutura	63
3.4 Análise estrutural tridimensional de elementos finitos	66
3.5 As Estruturas atirantadas	69
3.5.1 Conceito de cabo	69
3.5.2 Tipologias	71
3.5.3 As pontes estaiadas	71
3.5.4 As tensoestruturas	79
3.5.5 Estruturas atirantadas em Brasília	82
4. A PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA	87
4.1 O Complexo Arquitetônico	88
4.2 A sustentação da forma: Arquitetura e Estrutura dos blocos A e B	100
4.2.1 O bloco A	101
4.2.2 O sistema estrutural e construtivo do bloco A	106
4.2.3 Análise do sistema estrutural do bloco A	118
4.2.4 O bloco B	129
4.2.5 O sistema estrutural e construtivo do bloco B	131
4.2.6 Análise do sistema estrutural do bloco B	135
4.2.7 Análise comparativa	146
4.2.8 Considerações finais	154
BIBLIOGRAFIA	157

INTRODUÇÃO

Brasília, cidade desenvolvimentista e de identidade nacional brasileira durante o governo do Juscelino Kubitschek, foi exaltada pelas estruturas do Oscar Niemeyer (OLIVEIRA, 2008).

A concepção arquitetônica do Oscar despertou sempre um grande interesse no panorama nacional e internacional a partir da sua divulgação, na década de 40', no livro *Brazil Builds* do Philip Goodwin¹ (1943).

Vasconcelos (1992) define a construção da capital do Brasil como um evento determinante na história da engenharia e arquitetura mundial, eternizando a genialidade do arquiteto brasileiro. Essa forma de atração pelas obras do arquiteto parece ter alcançado sua culminância no ano em que o Oscar comemorou o próprio centenário de vida.

A arquitetura do Niemeyer, que se destaca dos padrões convencionais pela plasticidade e sinuosidade das suas curvas, é considerada uma verdadeira simbiose entre a estrutura resistente e às formas (MÜLLER, 2003).

No seu prefácio ao livro *The Work of Oscar Niemeyer*, o autor Stamo Papadaki (1950) afirma:

“Uma vez que vivemos num momento em que os valores plásticos da arquitetura estão ainda em processo de formação, devemos estimular com o nosso mais irrestrito apoio aqueles poucos arquitetos – muito poucos mesmo – que são capazes de enriquecer o vocabulário plástico atual. O seu trabalho pode parecer individualista no sentido de não corresponder exatamente às condições particulares locais, ou no de não expressar fielmente o grau de cultura de uma determinada sociedade. Este é, entretanto, o tipo de individualismo que se pode denominar genérico e produtivo, representa um salto para a frente, porque é uma profética revelação daquilo que a Arquitetura pode significar para a sociedade do futuro [...] A visão deste mundo distante de harmonia recuperada é o presente generoso que nos oferece Oscar Niemeyer²”.

¹ Presidente da Comissão de Relações Exteriores, A.I.A, e da Comissão de Arquitetura do museu de Arte Moderna de Nova York, membro correspondente do instituto de arquitetos do Brasil;

² L. Costa, *A Obra de Oscar Niemeyer*, prefácio ao livro de Stamo Papadaki, *The Work of Oscar Niemeyer*, texto republicado em A. Xavier (org.), *Lúcio Costa: Sobre Arquitetura*, 1950;

³ MÜLLER, Fábio. *Catedral de Brasília, 1958-70: Redução e Redenção*; em: *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 10, n. 11, p. 9-33, Belo Horizonte, MG, 2003;

A relação com as estruturas marcou o trabalho do Niemeyer desde o começo da sua carreira de arquiteto, desenvolvendo para cada projeto novas soluções tecnológicas. Como explica Müller (2003), Oscar Niemeyer estava à procura constante de concisão e pureza para estabelecer um “*real comprometimento entre forma e estrutura*”³.

As formas ousadas das obras monumentais de Brasília, erguidas pelo gênio do arquiteto modernista, refletem a vontade do arquiteto de deixar prevalecer a “*beleza sobre a lógica*” (NIEMEYER, 2000).

Inojosa relata que a técnica construtiva e a concepção arquitetônica do Oscar evoluíram em conjunto, conseguindo alcançar desafios estruturais inesperados pela época (INOJOSA, 2010).

O próprio Niemeyer afirmava que a arquitetura é feita de tentativas e a concepção do objeto de estudo é realizada por meio de croquis que se concretizam, após da lógica construtiva, em obras definitivas (NIEMEYER apud WOLF, 1987).

É importante lembrar que, a estrutura portante de uma obra de arquitetura do Oscar, não está somente determinada por noções de estática, mas também por razões de origem simbólica e pela vontade de proporcionar profundidade e variedade de apreciação ao observador. Essa sua maneira de projetar o “*plasticismo simbólico*”, recebeu várias críticas movidas por parte de profissionais arquitetos e engenheiros, interessados somente na forma estrutural e no valor arquitetônico das suas obras.

Aos quem criticam as suas obras, Niemeyer esclarece que não pretende fazê-las resultar como decisões funcionalistas:

“Procuro orientar meus projetos, caracterizando-os sempre que possível pela própria estrutura. Nunca baseada nas imposições radicais do funcionalismo, mas sim, na procura de soluções novas e variadas, se possível lógicas dentro do sistema estático. E isso, sem temer as contradições de forma com a técnica e a função, certo de que permanecem, unicamente, as soluções belas, inesperadas e harmoniosas. Com esse objetivo, aceito todos os artificios, todos os compromissos, convicto de que a arquitetura não constitui uma simples questão de engenharia, mas uma manifestação do espírito, da imaginação e da poesia”⁴.

Ao longo da sua carreira, Oscar Niemeyer passou, como todos os artistas propriamente ditos, por várias mudanças no próprio estilo e na maneira de conceber a arquitetura.

⁴ Oscar Niemeyer, Módulo, n.21, pag.5, 1955;

Cinco fases abraçaram o trabalho profissional dele (INOJOSA, 2010):

- *Formação profissional;*
- *De Pampulha a Brasília;*
- *Brasília;*
- *Projetos no exterior (década de 60', 70', 80');*
- *Últimos projetos.*

Somente no começo dos anos de 1950, logo após ter realizado algumas viagens internacionais “*de Lisboa a Moscou*”, Oscar teve uma mudança na sua maneira de projetar, a partir da década de '70. Nessa fase, passa a ocorrer uma exploração mais consistente das possibilidades tecnológicas de grandes estruturas.

O uso de estruturas de concreto de grande porte há uma importante mudança de enfoque no trabalho do arquiteto a partir de meados dos anos de 1960. No período coincidente com a concepção de Brasília, o tema dominante dos partidos adotados por Niemeyer, especialmente nos edifícios públicos, se baseava no atendimento das questões plásticas, de perfeita concisão entre forma e estrutura.

Devido á longevidade do mestre e á grande qualidade do seu trabalho, pode se acrescentar mais uma fase na carreira do Niemeyer, ou seja, a fase dos últimos projetos, realizados após de ter completado 85 anos de idade.

Alguns desses projetos, que contaram com a parceria do engenheiro José Carlos Sussekind, são, pela maior parte, obras isoladas com programas de necessidades que exigem um único bloco, como auditórios, teatros e centros culturais (OTHAKE, 2007).

Fonseca (FONSECA, R., 2007), na própria dissertação, alega que foram realizados vários estudos de natureza arquitetônica sobre a obra do Oscar Niemeyer em Brasília, deixando do lado á evolução estrutural e tecnológica. Esse aspecto que condiciona esse tipo de “*discriminação*” sobre o histórico da engenharia estrutural das obras de Brasília, produzida por Niemeyer, é encarado por Vasconcelos no seu livro⁵ (VASCONCELOS, 1992) que valoriza e ressalta a importância que deveria ter em um patamar internacional.

O objeto de estudo á ser analisado nessa dissertação de mestrado, a Procuradoria Geral da República (PGR), um dos símbolos principais do poder jurídico no Brasil, consta em uma obra arquitetônica de autoria de Oscar Niemeyer, localizada na capital federal, projetada em 1996 e executada em 2002 (UCHIGASAKI, 2006).

⁵ Vasconcelos, Augusto Carlos de. O Concreto no Brasil – Recordes, Realizações, História, Volume 1. Editora Pini, 2ª edição, 1992;



Figura 1 - Procuradoria Geral da República, Brasília, DF; Fonte: Daniel Zukko.

Na visão popular, a arquitetura de Brasília, seja do ponto de vista urbanístico quanto de projetos arquitetônicos, é fundamentalmente modernista, constituída por linhas retas e formas geométricas.

Como explica Uchigasaki (2006), *“esta simplificada rotulação dificulta um olhar atento à complexidade da obra de Oscar Niemeyer que tem sido considerado por especialistas de muitas maneiras um artista plástico⁶”*.

O estudo dessa obra, que foi fruto de uma mente inovadora seja do ponto de vista arquitetônico que da inovação tecnológica, quer demonstrar a possibilidade de conceber duas edificações de igual forma e volumetria através de duas soluções estruturais diferentes, exaltando o valor simbólico:

“Os monumentos públicos propiciam uma teatralização social de valores, uma que, consagram as imagens da memória coletiva para além da temporalidade da vida cotidiana⁷”.

⁶ Tsuruko Uchigasaki, *Uma leitura do complexo arquitetônico da PGR: redescobindo o barroco ao olhar uma obra do Oscar Niemeyer*, Brasília, 2006;

⁷ Cristina Freire, *Além dos Mapas: Os Monumentos no Imaginário Urbano Contemporâneo*, São Paulo, Annablume, 1997. Pag.96;

O objetivo geral fundamental desta dissertação é analisar o sistema estrutural e construtivo da Procuradoria Geral da Republica, olhando para a maturidade da obra do Oscar Niemeyer (1996-2002) comparada com a experiência histórica das suas arquiteturas.

Os objetivos específicos estabelecidos para o desenvolvimento dessa dissertação visam:

- *Levantamento bibliográfico de algumas obras eternas do Oscar Niemeyer, procurando relaciona-las com o objeto de estudo;*
- *Comparação das características formais da Procuradoria com o repertório do arquiteto modernista na última década da sua produção artística (de 2000 até 2012);*
- *Análise histórica da Procuradoria Geral da Republica;*
- *Análise arquitetônica do objeto de estudo;*
- *Análise do sistema construtivo da obra;*
- *Análise estrutural dos prédios principais (A e B) constituintes o conjunto arquitetônico da PGR;*
- *Identificação e análise dos modelos estruturais simplificados constituintes a obra, por meio de softwares de cálculo estrutural (SAP 2000).*

O desenvolvimento da dissertação, traçado por cinco capítulos, incluindo esta *introdução*, aborda aspectos históricos, arquitetônicos, formais, funcionais, construtivos e estruturais da obra do Niemeyer.

O segundo capítulo, intitulado “*Oscar Niemeyer e a forma da sua arquitetura*”, foi elaborado a partir da biografia do arquiteto modernista. Por meio de uma abordagem histórica, baseada em livros quais “*As Curvas do Tempo – Memórias*” e “*Minha Arquitetura*” (NIEMEYER, 2000), tendo em vista como objetivo o entendimento dos paradigmas que marcaram a vida do Oscar, foi inserido um subcapítulo intitulado “*As fases da carreira profissional*”, que trata das etapas da produção artística do Niemeyer. Nesse trecho da dissertação foram descritas algumas obras arquitetônicas através de um “*approach*” focado nas características estruturais que representaram, na época, um papel de grande avanço tecnológico nas soluções utilizadas. As estruturas analisadas para demarcar esse capítulo são o Conjunto de Pampulha (1940-43), o Congresso Nacional (1958), o Palácio da Alvorada (1957), o Palácio do Planalto (1956), o Supremo Tribunal Federal (1957), o Teatro Nacional (1958) e a Catedral de Brasília (1958).

O terceiro capítulo, intitulado “*Arte Estrutural, definidora da forma arquitetônica*”, trata sobre a direta influência dos sistemas estruturais na arquitetura. Partindo de uma abordagem geral sobre elementos estruturais, sistemas e forças internas, serão elaborados conceitos de Arte Estrutural através do estudo de autores como David Billington e Gedion.

Após desse “*incipit*”, esse capítulo visa mostrar as tipologias de estruturas atirantadas e os exemplos da aplicação dessa tecnologia na capital federal brasileira, Brasília.

Uma das características mais marcantes da criação de Niemeyer, que a diferencia do que fazem os demais arquitetos, é possuir forte identidade formal.

Essa qualidade deriva da presença de estruturas formais claras como base da organização dos seus projetos, da utilização de formas elementares na configuração dos seus elementos constituintes e do fato de que o número de elementos em seus projetos é sempre limitado. Essas três características definem uma obra altamente sintética, fácil de entender e de memorizar - por isso de alto poder simbólico.

Intitulado “*A Procuradoria Geral da República*”, o quarto capítulo representa o foco e a essência dessa dissertação. Divididos em nove subcapítulos, foi feita uma análise do histórico da PGR, da arquitetura, do sistema construtivo e estrutural da obra em questão. O último item, que representa a comparação qualitativa e quantitativa das características estruturais, foi elaborado graças ao auxílio do software computacional de análise estrutural SAP 2000 (versão 17).

O capítulo quinto, “*Conclusões*”, põe na mesa acadêmica todas as considerações finais, os resultados obtidos e os avanços de pesquisa realizados através dessa dissertação de mestrado, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.

1.1 Justificativa

A produção artística e arquitetônica do Oscar Niemeyer na capital federal do Brasil, descrita e analisada por várias figuras em nível tanto nacional quanto internacional, ainda não tem muitos estudos sobre as soluções tecnológicas adotadas pelo arquiteto brasileiro (FONSECA, 2007).

Esse aspecto que condiciona esse tipo de “discriminação” sobre o histórico da engenharia estrutural das obras de Brasília, produzida por Niemeyer, é encarado por Vasconcelos no seu livro⁸ que valoriza e ressalta a importância que deveria ter em um patamar internacional.

Além disso, outro fator preocupante sobre esse assunto, consta no fato que não tem documentação oficial de cálculos estruturais, análises e detalhes sobre as maiorias dos prédios históricos de Brasília. Com certeza, esses estudos técnicos e específicos permitiriam de criar um vasto arquivo de informações fundamentais para o vasto mundo da arquitetura e a da engenharia.

A importância de uma obra está marcada pelo valor simbólico, formal e arquitetônico que ela pode transmitir para as gerações atuais e futuras. Com certeza, a Procuradoria Geral da República, é um prédio que remete a valores importantes de justiça, direitos sociais e democracia. Além disso, na comprovada produção do Oscar Niemeyer, nenhuma obra foi construída pensando em mostrar duas tecnologias diferentes aplicadas a dois blocos participantes do mesmo conjunto.

As formas geométricas, simples e harmoniosas escolhidas pelo arquiteto, demonstram que a estrutura é fortemente ligada com a morfologia arquitetônica.

Há muitas décadas os autores da modernidade tentam divulgar e nos fazer entender que ser moderno tem a ver com a ideia de inovação constante.

Hoje muitos se dão conta de que não foi e não é assim. A obra da maioria dos arquitetos modernos importantes se caracteriza pela constância em busca da própria identidade formal.

Mies Van der Rohe, por exemplo, *“passou toda a sua vida projetando o mesmo edifício, ainda que cada vez, devido à sua busca de autenticidade, a obra tivesse uma identidade diferente”*⁹.

Apesar de tudo que já se escreveu sobre a obra do arquiteto, provavelmente ainda não se tinha apontado uma das suas características mais salientes: a “universalidade”, conceito que pode ser estendido em pelo menos dois significados.

⁸ Vasconcelos, Augusto Carlos de. O Concreto no Brasil – Recordes, Realizações, História, Volume 1. Editora Pini, 2ª edição, 1992;

⁹ Denise C. Solot, Paulo Mendes da Rocha, *Estrutura: êxito da forma*, Viana e Mosley, Rio de Janeiro, 2004;

Por um lado, a universalidade de uma obra tem a ver com a facilidade com que o observador consegue sintetizar um determinado “ícone”. Uma das características mais relevantes da arte moderna foi sempre exigir o envolvimento do observador para o seu desenvolvimento, o qual de alguma forma recria a obra ao interagir com ela.

Para que isso seja possível são necessárias duas coisas: que o observador tenha algum conhecimento básico do assunto e que a obra proporcione o seu acesso a ela.

Por outro lado, como a obra do arquiteto se caracteriza essencialmente por utilizar formas elementares, isoladamente ou em conjunto, o papel do observador é simplificado, não importa a matriz cultural pela qual ele provém.

Aí reside a segunda razão da aceitação universal das obras do Oscar Niemeyer em um nível de consideração internacional.

Portanto, se essa obra possui as qualidades necessárias para ser eternizada, se faz parte de uma corrente cultural moderna e se continua se erguendo através de um desempenho estrutural satisfatório, o nosso interesse deve se estender para todo o panorama da arte moderna brasileira e internacional como reminiscência secular na história da arquitetura.

2. OSCAR NIEMEYER E A FORMA DA SUA ARQUITETURA

“Oscar Niemeyer, sem duvidas, é um dos maiores arquitetos de todos os tempos. As suas obras integram a memoria cultural comum da humanidade¹⁰”.



Figura 2 - Oscar Niemeyer observando a maquete da escola em Belo Horizonte (MG).
Fonte: www.archdaily.com.br.

Oscar Ribeiro de Almeida de Niemeyer Soares nasceu em 1907 na cidade do Rio de Janeiro (RJ), onde vivenciou grande parte da própria vida. Através das próprias palavras (NIEMEYER, 2000), ainda jovem, Niemeyer começou a pratica do desenho representando xicaras, bules e estatuetas na época do colégio Santo Antônio Maria Zaccaria, dos padres barnabitas (INOJOSA, 2010).

No ano de 1928, o jovem Oscar se casou com Annita Baldo, filha de imigrantes italianos. Um ano depois, em 1929, entrou para Escola Nacional de Belas Artes no Rio de Janeiro, onde se tornou engenheiro/arquiteto, em 1934. No terceiro ano de faculdade, entrou trabalhar no escritório do Lúcio Costa e Carlos Leão como estagiário (INOJOSA, 2010), relatando que “da arquitetura só me deram bons exemplos” (NIEMEYER, 2000, p. 43).

¹⁰ Celso Amorim, diplomata brasileiro, ministro das Relações Exteriores durante o período de 1993-1995 e de 2003-2010 durante o governo do presidente Lula;

Em 1936, foi escolhido para colaborar com o arquiteto modernista Le Corbusier, que estava participando do projeto do Ministério da Educação do Rio de Janeiro. Essa edificação, que hoje tem o nome de Edifício Gustavo Capanema, representa a sede do IPHAN no Rio de Janeiro. Devido á sua parceria com o mestre do modernismo, no seu livro *“Teoria da Arquitetura”*, a autora Petra Lamers-Schütze relata que “poucos arquitetos que tiveram uma intervenção com tal força provocatória e inovadora no discurso sobre arquitetura do Movimento Moderno, quer por meio da publicação das suas realizações e dos seus projetos, quer por meio da sua abundante obra teórica” (LAMERS-SCHÜTZE, 2006).



Figura 3 - Edifício Gustavo Capanema, sede do IPHAN no Rio de Janeiro (RJ).
Fonte: www.portal.iphan.gov.br.

Com certeza, a colaboração com Le Corbusier neste projeto, influenciou toda a visão do Oscar Niemeyer sobre a arquitetura. O Edifício Gustavo Capanema mantém todos os cinco pontos¹¹ fundamentais da Arquitetura Moderna, sem deixar do lado as características típicas dos arquitetos brasileiros da época (INOJOSA, 2010).

Um ano depois, em 1937, Oscar Niemeyer projetou a arquitetura da Obra do Berço no bairro da Lagoa, na capital carioca.

¹¹ Le Corbusier, J. Verso un`architettura, Milano, Longanesi, 1973;



Figura 4 - Edifício Obra do Berço no Rio de Janeiro (RJ). Fonte: DURAND e SALVATORI, 2011.

Em 1940, Niemeyer teve a oportunidade de conhecer, o então prefeito de Belo Horizonte (MG), Juscelino Kubitschek. Convidado e incentivado pelo político, realizou o seu primeiro grande projeto, o Conjunto da Pampulha, formado por um Cassino, a Casa de Baile, o late Clube e a Igreja de São Francisco de Assis. Através do Conjunto de Pampulha, Niemeyer surpreendeu o mundo reutilizando o racionalismo formal predominantemente modernista e propondo uma arquitetura repleta de inovação. Como relata Faria (FARIA, 2007), essas obras arquitetônicas consagram o começo do “Estilo Brasileiro”, uma arquitetura toda brasileira.

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

(NIEMEYER apud WOLF, 1987, p. 20)

Na Pampulha, graças à liberdade artística concedida pelo JK, Oscar Niemeyer conseguiu expressar certa “autonomia plástica e programática” (GONÇALVES, 2010). Em 1945 ingressou no Partido Comunista Brasileiro, do qual iria se desligar em 1990. A primeira viagem à Europa aconteceu em 1954, ano no qual participou do projeto para reconstrução de Berlim durante o pós-guerra. No ano seguinte, constituiu a revista “Módulo”, no Rio de Janeiro, e assumiu a direção do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da NOVACAP, empresa construtora de Brasília.

No final dos anos 40', o arquiteto conseguiu alcançar fama mundial através de obras de nível internacional como a sede da ONU em Nova York.

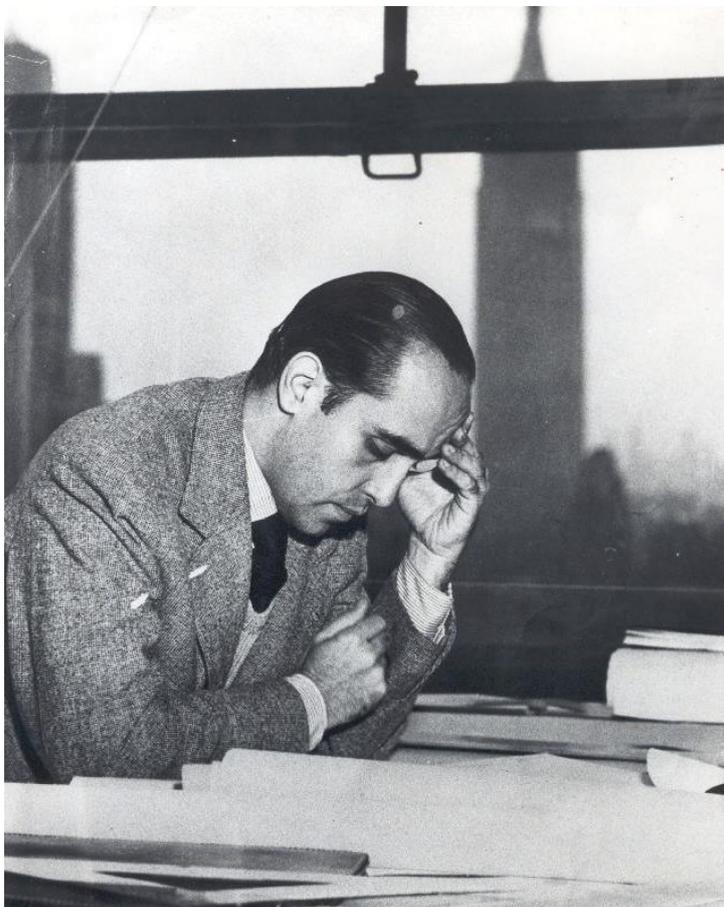


Figura 5 - Oscar Niemeyer estuda o projeto da ONU em Nova Iorque. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

No ano de 1956, a convite do então Presidente da República Juscelino Kubitschek, o arquiteto brasileiro projetou várias obras para a nova capital do Brasil, Brasília, inaugurada em 21 de abril de 1960. Entre eles, foram realizados projetos imortais como o Palácio da Alvorada, o Itamaraty, o Congresso Nacional de Brasília, o Museu Nacional, o Palácio do Planalto, a Catedral de Brasília, a Praça dos Três Poderes, o Superior Tribunal Federal (STF) e o Teatro Nacional. Atualmente, a capital federal é considerada o mais completo conjunto modernista internacional, reconhecido pela UNESCO como patrimônio mundial da humanidade. Enfrentando os projetos da nova capital brasileira, que precisavam de soluções estruturais e programas de necessidades sempre mais complexos (GONÇALVES, 2010), Niemeyer relatou que o tempo da concepção arquitetônica era bem restrito, “elaborando em quinze dias projetos que normalmente exigiriam dois ou três meses de trabalho” (NIEMEYER, 1961, p. 41).

A partir dessa época até os nossos dias, Niemeyer produziu uma impressionante quantidade de obras de arte, tanto no Brasil quanto no exterior, demonstrando a força da arquitetura modernista de uma maneira gritante, baseando-a na sensibilidade plástica. Depois de Brasília, Niterói (RJ) é a cidade que tem um maior número de obras do Oscar Niemeyer. Entre elas, a mais conhecida é com certeza o Museu de Arte Contemporânea, inaugurado em 1991.

Após de uma grande carreira como arquiteto e urbanista, Oscar Niemeyer faleceu no Rio de Janeiro, no dia 5 de dezembro de 2012.

“Não conseguiu concretizar o seu desejo de comemorar 105 anos de vida, mas foi por muito pouco. Enfim, sua vida foi um sopro bem longo. Não é fácil lembrar-se de algum arquiteto de fama mundial que tenha vivido mais de um século. Alguns foram longevos como Wright e Le Corbusier, mas não tanto. Nenhum deles se transformou em herói nacional como ocorreu com ele aqui no Brasil. Niemeyer representou e sintetizou o desejo de modernização, de inovação, de criatividade do maior país da América Latina. O Movimento Moderno internacional foi radicalmente renovado por ele nos anos de 1940, abriu o caminho para uma arquitetura do Terceiro Mundo que se libertou dos estilos e das pressões provenientes dos centros metropolitanos. Transformou-se na voz e no símbolo dos jovens arquitetos da América Latina, que lutavam pela sua independência cultural. Além da sua contribuição como arquiteto, foi um homem politicamente engajado, sempre identificado com as causas justas. Perdeu-se o último dos principais protagonistas da cultura arquitetônica do século 20¹²”.

Um das maiores satisfações do Oscar Niemeyer foi aquela de experimentar novas formas ousadas através do concreto armado, graças aos grandes avanços tecnológicos e dos sistemas construtivos. A tentativa de busca da leveza na arquitetura do mestre obrigou os engenheiros a elevar os próprios limites, através de cálculos estruturais para extrapolar do material, concreto armado, todas as potencialidades e para criar curvas sempre mais ousadas. Juntando e conjugando as lições do Le Corbusier com a realidade cultural brasileira e com a exuberante sensualidade da sua cidade, Rio de Janeiro, Oscar Niemeyer acabou criando uma arquitetura original e diferente, baseada na liberdade plástica das formas, valorizando ao máximo o potencial do concreto armado e das técnicas construtivas.

A sua contribuição mais importante dentro do pensamento arquitetônico contemporâneo, consiste na defesa da liberdade construtiva, na valorização do próprio gênio individual e na concepção do que a arquitetura é, antes de tudo, a manifestação artística por excelência do homem.

¹² Segre, R., revista aU, ano 28, nº226, Janeiro de 2013, Pini editora, Pag. 48;

"A arquitetura de Oscar Niemeyer tem um lugar decisivo, absolutamente singular, na história da arte contemporânea [...] ao longo de sua vida, Niemeyer foi firmando uma posição desassombrada, de homem engajado na evolução política da civilização, na luta pela paz mundial e - apesar de uma lúcida visão da fragilidade humana - na esperança de um tempo de justiça e fraternidade [...] A admirável simplicidade com que Oscar Niemeyer reafirma sempre: 'a vida é mais importante que a arquitetura', marca, desde o nascimento, os três destinos da Fundação que leva o seu nome: a beleza, o humanismo e a liberdade¹³".

2.2 As fases da carreira profissional

A carreira profissional do Oscar Niemeyer, estudada por vários autores, pode ser dividida em cinco fases principais: formação profissional ou fase inicial; de Pampulha a Brasília; Brasília; projetos no exterior (décadas de 1960 a 1980) e últimos projetos. Em todas as fases é possível notar que a técnica e os conceitos estruturais são questões de grande importância em toda a obra de Niemeyer (INOJOSA, 2010).

As quatro primeiras fases foram relevadas, de forma acadêmica, por Katinsky em Sabbag, 1987 (INOJOSA, 2010). A quinta e última fase, correspondente aos últimos projetos do Oscar Niemeyer, foi analisada e estudada por Ohtake (2007).

Marco Valle (2000) e Eduardo Dias Comas (2002), nas teses de doutorado deles, definiram também uma divisão cronológica das fases da obra do Niemeyer, considerando em conjunto os projetos dos arquitetos modernistas da época (GONÇALVES, 2010).

O mesmo Oscar, no seu livro *"Diálogos Pré-Socráticos"*, alude às cinco fases que caracterizaram a própria carreira, começando pela época da Pampulha e desconsiderando a fase inicial de formação profissional (NIEMEYER, 1998, p.266).

A segunda fase da arquitetura do Niemeyer, que poderíamos chamar de Pampulha a Brasília, determina o início de uma arquitetura típica da identidade brasileira. Nesse contexto, com certeza, se inserem as obras arquitetônicas do Conjunto de Pampulha (1940-43) que articulam no próprio desenho, elementos de caráter nacional brasileiro (FARIA, 2007), no qual é definido *"um jogo de retas e curvas"*¹⁴.

¹³ Campofiorito, I. , Olhares sobre o Moderno. Arquitetura, Patrimônio, Cidade. Editora Casa da Palavra, 1991;

¹⁴ NIEMEYER, Oscar. *Oscar Niemeyer - Minha Arquitetura 1937-2004*. Editora Revan. Rio de Janeiro, RJ. 2004;

Essa fase representa a elaboração da plasticidade formal típica das obras do Oscar Niemeyer (GONÇALVES, 2010). A manipulação hábil dos elementos formais e dos princípios compositivos funcionalistas, sintetizados em um conjunto único, simplesmente superou a dicotomia que estava se estabelecendo no panorama da arquitetura moderna.

Dentro do Conjunto de Pampulha, se destaca a igreja de São Francisco de Assis que, declara uma forte relação com a arquitetura barroca mineira através de uma característica de identidade estrutural, presente no movimento do formalismo arquitetônico livre. A obra arquitetônica do Oscar Niemeyer tem como ponto de partida e elemento estruturador, o formalismo livre, originado pela desilusão da modernidade das máquinas e explicado através dos dramas das guerras mundiais.

Esse formalismo é muito evidente nas escolhas do arquiteto que visam a uma arquitetura menos rígida e retilínea, para alcançar formas orgânicas e sinuosas. Podemos observar como a plasticidade livre condiciona o Conjunto de Pampulha que foi o primeiro trabalho do arquiteto, com 33 anos de idade.

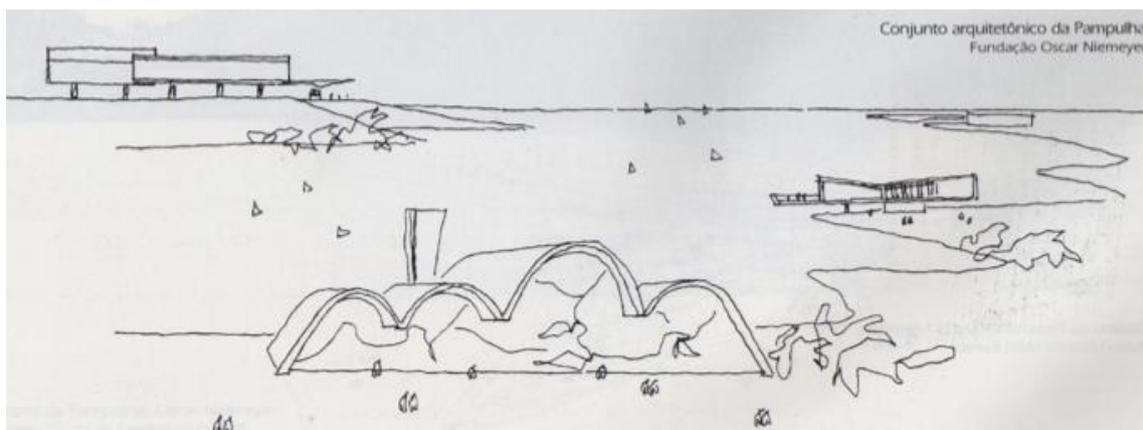


Figura 6 - Conjunto arquitetônico de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

O Conjunto está constituído por uma série de edificações construídas em 1940, ao redor de uma lacuna artificial chamada Pampulha, que são a Casa do Baile, o Clube, o Casino e a igreja de São Francisco de Assis.

Na época, a administração municipal propôs a ideia de criar um luxuoso ponto de atração para realizar esportes aquáticos. Podemos considerar a obra arquitetônica de Pampulha como a principal reação contra a hegemonia do estilo racional retilíneo do vanguardismo internacional e como ponto de partida para a formação de uma identidade artística e arquitetônica puramente brasileira.

O Conjunto das obras de Pampulha contribuiu realmente para definir essa identidade e linguagem arquitetônica nacional, rumo a ser conhecido em nível internacional como Estilo Brasileiro.

Recentemente, durante uma entrevista especial para o *diário “O Estado de São Paulo”*, ao perguntar sobre a cidade de Brasília como maior obra do arquiteto, Oscar Niemeyer respondeu:

“Não. Foi a Igreja de Pampulha. Meu primeiro trabalho como arquiteto. Nela está presente uma arquitetura mais livre e criativa que procuro realizar. Porém, tentei fazer todas minhas obras com grande carinho, e é isso o que importa¹⁵”.

(OSCAR NIEMEYER, 2007)

As obras de Pampulha alternam em seu desenho elementos de caráter nacional e internacional. Desta forma é promovida a confluência entre racionalismo e organicismo, que tinham um bom respaldo pela crítica na época da construção.

Niemeyer projetou a obra como fosse um conjunto, porém pensou em cada elemento de forma independente, autônoma e em diálogo com o próprio entorno.

O edifício Cassino, agora museu de Arte de Pampulha após a interdição do jogo no Brasil em 1946, está localizado em cima de uma península e sua arquitetura é composta pela alternância de volumes planos e curvos, de jogos de luz e sombra. Um semicírculo envidraçado define a fachada posterior e se antepõe à sala dos jogos, ortogonal e simétrica.

Segundo Comas, o Oscar Niemeyer teria conseguido projetar *“um conjunto de repouso e lazer na Pampulha ao governador”*, deixando somente um cassino na área onde surgiam as edificações (COMAS, 2002, p.212).



Figura 7 - Cassino de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

¹⁵ Entrevista concedida à Camila Anauate para o Suplemento do Turismo do diário “O Estado de São Paulo”, 13 de março de 2007;

Para o Iate Clube e a Casa Kubitschek, Oscar Niemeyer aproveitou das volumetrias desses edifícios para dar a ideia de que fossem fundidos entre eles.

Tanto o exterior quanto o interior dos prédios foram projetados como uma continuidade e a fachada principal foi concebida como a proa de um iate. As curvas do conjunto delineiam um dos motivos principais da nova arquitetura do arquiteto carioca.



Figura 8 - Iate Clube de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

Na Igreja de São Francisco de Assis, considerada o prédio principal do Conjunto, Niemeyer utilizou uma nova solução construtiva; ao invés de uma estrutura independente sustentada por pilares de concreto armado, o arquiteto utilizou uma casca parabólica de concreto reforçado que atua o papel de cobertura e das paredes verticais.

A fachada posterior da capela está composta por azulejos brancos e azuis, realizados pelo artista moderno brasileiro Cândido Portinari. Oscar Niemeyer conseguiu conferir à igreja um caráter assimétrico e flexível, onde as possibilidades plásticas e escultóricas do concreto armado se fundem na liberdade criativa do arquiteto.

Assim como a arquitetura barroca combinou de forma nova elementos clássicos e renascentistas, Oscar Niemeyer estabeleceu um diálogo entre o desenho das curvas, livre e sensual, e a rigidez das linhas retas do estilo vanguardista internacional.

Da mesma forma que o Barroco se relaciona mais com o mistério do divino e menos com a certeza do humanismo, o mestre explora uma realidade superior, superando as certezas da lógica construtiva, por meio de uma arquitetura ousada, concebida para a escala humana.

Assim Niemeyer, afirma:

“...para os problemas difíceis e as vezes esmagadores que a vida nos oferece¹⁶”.

(OSCAR NIEMEYER APUD NORMA EVENSON, 1973)



Figura 9 - Fachada posterior da Igreja de Pampulha (MG). Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

A terceira fase, representada por Brasília, foi caracterizada pela ruptura com a tradição da arquitetura. A busca de monumentalidade e a eternidade na história, em contrapartida com a transitoriedade da vida, são as linhas guias dessa etapa.

“...Na concepção desses palácios, preocupou-me também a atmosfera que dariam à Praça dos três poderes. Não a pretendia fria e técnica, com a pureza clássica, dura, já esperada das linhas retas. Desejava vê-la, ao contrário, plena de formas, sonho e poesia”.

(OSCAR NIEMEYER, 2007)

As obras de Brasília possuem muitas realizações importantes na área de engenharia de estruturas, sendo muitas originais e inovadoras para a época. Contudo, alguns detalhamentos se perderam, e hoje são obtidos somente através de pesquisas.

A princípio, apenas o engenheiro Joaquim Cardozo fez os cálculos das obras concebidas por Oscar Niemeyer. Após o período inicial de três anos, outros arquitetos e engenheiros participaram de importantes projetos. Sobre o sistema estrutural, houve simultaneamente obras com estrutura de concreto armado, de concreto protendido e de aço.

¹⁶ Apud Norma Evenson, *Two Brazilian Capitals: Architecture and Urbanism in Rio de Janeiro and Brasília*, New Haven and London, Yale University Press, 1973, p. 204;

Essa época, com certeza, corresponde à maior evolução das dinâmicas estruturais nas suas obras (INOJOSA, 2010). O concreto armado, que assume um papel muito importante, foi modelado nos palácios de Brasília de uma forma inusitada.

Os edifícios mais significativos, produzidos pelo Oscar Niemeyer em Brasília, foram o Congresso Nacional (1958), o Palácio da Alvorada (1957), Palácio do Planalto (1956), Supremo Tribunal Federal (1958), Teatro Nacional (1958), a Catedral Metropolitana de Brasília (1959) e o Museu Nacional (1970).



Figura 10 - Congresso Nacional de Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

O Congresso Nacional é constituído pelo Senado, pelas torres administrativas e pela Câmara dos Deputados.

Neste complexo arquitetônico cuja estrutura é de concreto armado, podemos comprovar o revolucionário jogo de contrastes formais: as cúpulas formam uma antítese com as retas verticais das torres de aço e vidro. Como relata INOJOSA (2010) na própria dissertação, o engenheiro Joaquim Cardoso foi responsável pelo cálculo estrutural do Congresso Nacional.

“O projeto abrange todos os serviços relativos à Câmara e ao Senado. O objetivo de reunir as duas casas do Congresso num só edifício, visa dar solução mais racional e econômica ao problema, sem prejuízo da independência que lhes é indispensável, permitindo, ainda, adotar para os serviços comuns (garagem, restaurante biblioteca, salas de estar etc.) instalações mais perfeitas e amplas. Por outro lado, estufados num só bloco, Senado e Câmara, constituirão um conjunto monumental capaz de dominar, como desejável, as demais construções da cidade ¹⁷”.

¹⁷ NIEMEYER, Oscar. [Congresso Nacional]. s.d. Fundação Oscar Niemeyer. Coleção Oscar Niemeyer;

Já de forma diferente, o Palácio da Alvorada se destaca pelos seus pilares de forma parabólica que, de maneira surreal, sustentam um prédio marcado pela leveza estrutural.



Figura 11 - Palácio da Alvorada, Brasília. Fonte: www.upload.wikimedia.org.

"Na solução do Palácio Residencial de Brasília, procuramos adotar os princípios da simplicidade e pureza que, no passado, caracterizaram grandes obras da Arquitetura. Para isso, evitamos as soluções recortadas, ricas de forma e elementos construtivos, (marquises, balcões, elementos de proteção, cores, materiais, etc.), adotando um partido compacto e simples, onde a beleza decorresse apenas de suas proporções e da própria estrutura. Dedicamos às colunas, em virtude disso, a maior atenção, estudando-as cuidadosamente nos seus espaçamentos, forma e proporção, dentro das conveniências da técnica e dos efeitos plásticos que desejávamos obter. Estes nos levaram a uma solução de ritmo contínuo e ondulado, que confere à construção leveza e elegância, situando-a como que simplesmente pousada no solo¹⁸".

O Palácio da Alvorada foi a obra pioneira em Brasília, sendo construído entre 1956 e 1957. Oscar Niemeyer queria que os pilares externos conferissem ao edifício uma sensação de leveza, como se flutuasse em um espelho de água. Para alcançar isso, o arquiteto e seu calculista Joaquim Cardozo tiveram que esquecer as técnicas construtivas tradicionais, as limitações do material e pensar como se estivessem criando um novo modelo de estrutura.

Cardozo criou apoios internos que recebessem a maior parte das cargas incidentes, aliviando assim as solicitações das colunas de fachada, com função estrutural secundária (INOJOSA, 2010).

¹⁸ PALÁCIO residencial de Brasília. Módulo, Rio de Janeiro, v.3, n.7, p.21, fev. 1957;

Através dos seus cortes transversais (Figura 12), é possível perceber que as lajes mais pesadas, suportadas pelos pilares internos, se encontram na parte central do Palácio. As varandas externas são curvadas e parecem ser mais leves em correspondência das colunas secundárias. Essas soluções estruturais foram adotadas também nos projetos do Palácio do Planalto e do Supremo Tribunal Federal (STF).

O formato inusitado do pilar de fachada do Palácio da Alvorada está representado na figura 13, mostrando a armadura interna.

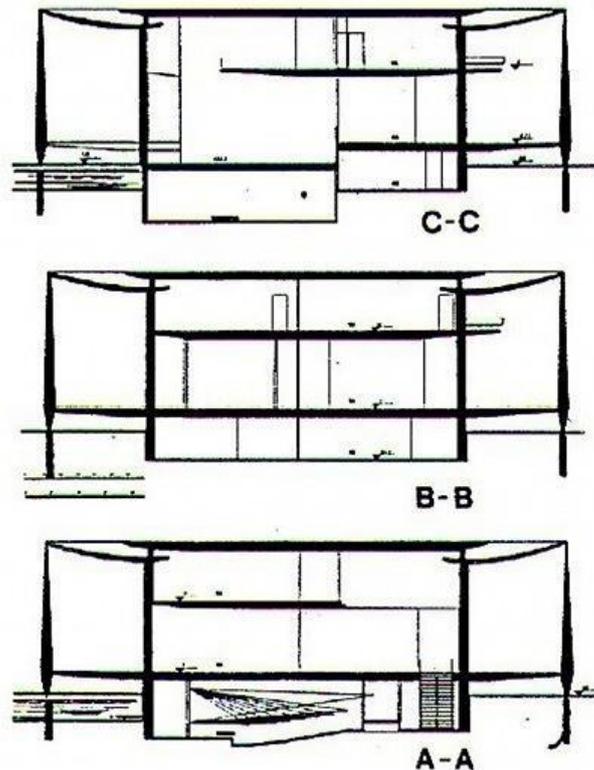


Figura 12 - Cortes transversais do Palácio. Fonte: Vasconcelos, 1992, p. 88.

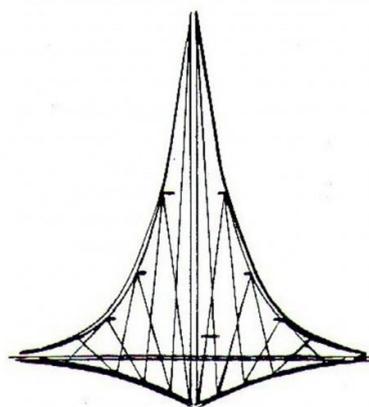


Figura 13 - Desenho da armadura dos pilares do Palácio da Alvorada. Fonte: Vasconcelos, 1992.

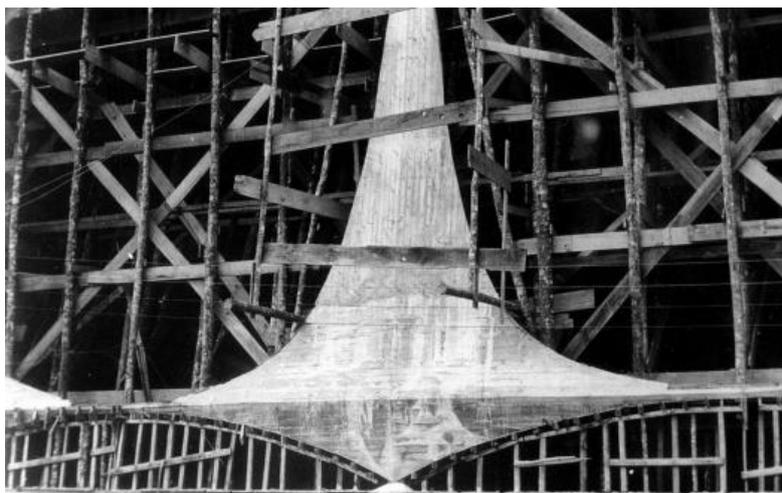


Figura 14 - Pilar do Palácio em obras. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal.

Na hora de projetar o Palácio do Planalto, localizado na Praça dos Três Poderes, Oscar Niemeyer buscou imprimir ao prédio um caráter de monumentalidade e desenhou pilares inusitados (como os pilares do Palácio da Alvorada) em forma de ângulo quase reto.



Figura 15 - Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

"Plasticamente, o projeto se subordina às conveniências de unidade que a Praça dos Três Poderes requer, procurando manter o sentido de pureza e criação predominante em todas as construções de Brasília ¹⁹".

¹⁹ NIEMEYER FILHO, Oscar. Palácio do Planalto e Palácio do Supremo Tribunal. Módulo, Rio de Janeiro, v.2, n.10, p.8, ago.1958;

Como no Palácio da Alvorada, o Planalto funciona com dois sistemas de pilares, um interno que recebe as solicitações maiores e um secundário (colunas de fachada) que recebe apenas a carga das lajes de cobertura (laje nervurada que diminui sua espessura em direção à borda) e do piso.

Durante a concretagem das colunas externas, considerada a ousadia da forma, Joaquim Cardoso propôs aumentar a aderência do aço com o concreto, como mostra a figura 16.

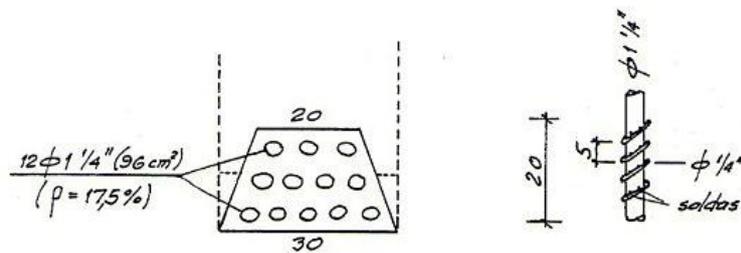


Figura 16 - Detalhe da solda adicional nas barras de aço do Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Vasconcelos, 1992.

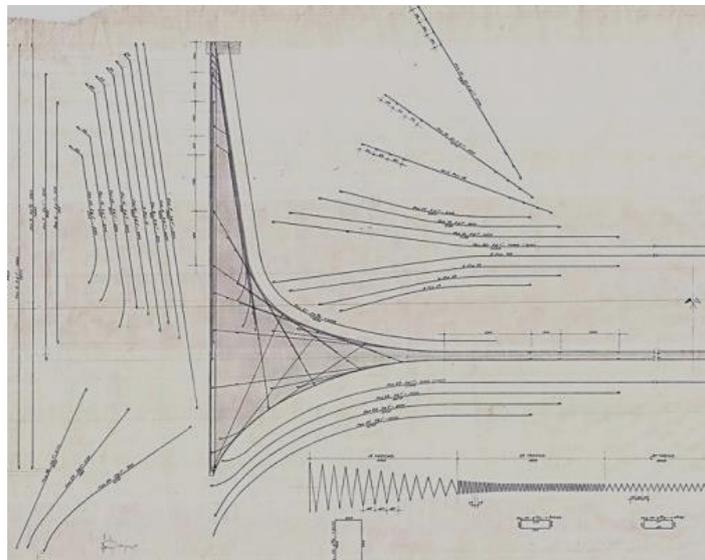


Figura 17 - Armação dos pilares do Palácio do Planalto, Brasília. Fonte: Arquivo público do Distrito Federal.

O prédio do Supremo Tribunal Federal, realizado em concreto armado em 1958, é similar aos outros dois palácios (da Alvorada e do Planalto): pilares externos com formas arrojadas e função estrutural secundária, recebendo apenas as cargas provenientes da cobertura e da parte externa da primeira laje de piso. O funcionamento da parte estrutural é bastante semelhante ao do Palácio do Planalto.

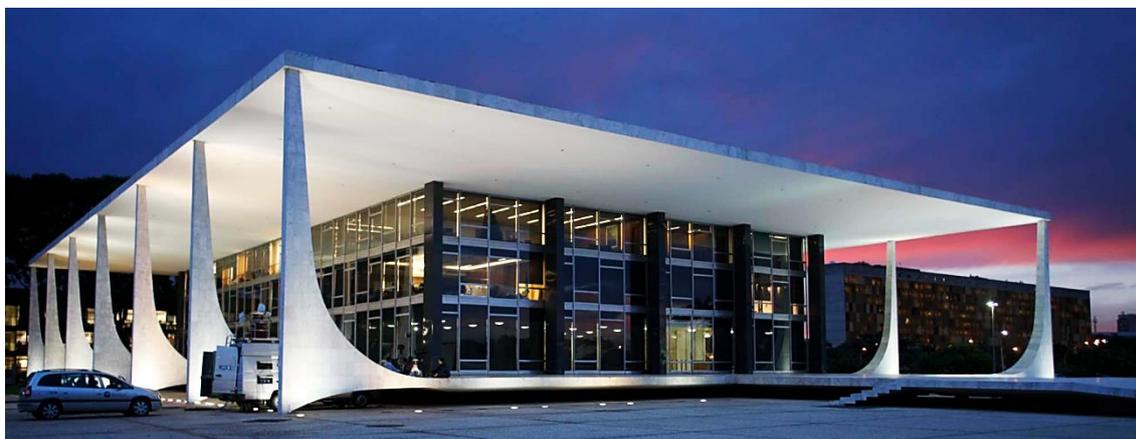


Figura 18 - Supremo Tribunal Federal, Brasília. Fonte: www.saraivareporter.com.

"O Palácio do Supremo Tribunal compreende os serviços relativos a mais alta corte judiciária do país..."

"... A singeleza do projeto e as proporções relativamente reduzidas deste edifício não impediram que o partido adotado lhe conferisse as características de dignidade e nobreza reclamadas, características essas que as galerias externas acentuam convenientemente²⁰."

O Teatro Nacional "Cláudio Santoro", localizado no Setor Cultural Norte da capital brasileira, é uma obra de autoria do Oscar Niemeyer e o cálculo estrutural foi executado pelo engenheiro Bruno Contarini.

Segundo Leonardo Inojosa (2010, pag. 69) o projeto do teatro, que incluía também "uma biblioteca, salas de musica, cinemas e o museu", foi inserido no programa do "conjunto Cultural de Brasília".

²⁰ NIEMEYER FILHO, Oscar. Palácio do Planalto e Palácio do Supremo Tribunal. Módulo, Rio de Janeiro, v.2, n.10, p.8, ago. 1958.



Figura 19 - Teatro Nacional "Claudio Santoro", Brasília. Fonte: Fundação Oscar Niemeyer.

Projetado em 1958 e edificado em 1961, o Teatro Nacional tem forma de tronco de pirâmide e consta de quatro fachadas principais.

As fachadas norte e sul, que contêm as vigas pré-moldadas escondidas pelos relevos da arte plástica do Athos Bulcão, se contrapõem às fachadas leste e oeste, envidraçadas e constituintes os suportes para os painéis de vedação.

A estrutura do teatro é toda em concreto protendido, uma inovação pela época, e é definida por oito vigas que se apoiam em quatro pilares principais retangulares, conforme a figura 20.

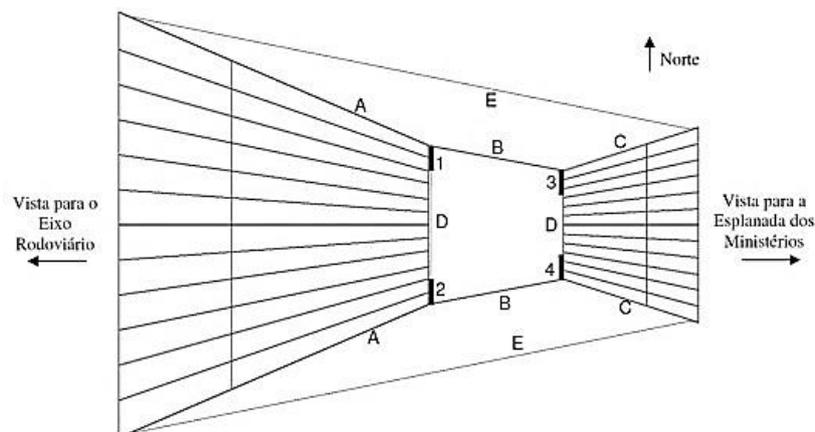


Figura 20 - Estrutura principal do Teatro Nacional "Claudio Santoro", Brasília. Fonte: SOUZA, 2009.

"Nos Teatros Oficiais de Brasília, nosso objetivo foi manter o critério de simplicidade e liberdade plástica, que acreditamos caracteriza os edifícios dessa cidade. Desejávamos em primeiro lugar que os teatros atendessem as determinações do Plano Piloto, que os localizou junto à Plataforma, e, que se apresentassem como um exemplo de bom funcionamento. Mas nos preocupava também que constituíssem uma obra de interesse arquitetônico, uma obra que fugisse à rotina que a repetição de formas vem estabelecendo e fosse, embora modesta, uma contribuição à técnica e à arte teatral. Preocupou-nos principalmente não limitar, por questões de equilíbrio arquitetônico, os espaços internos, o que muitas vezes tem levado os arquitetos, em virtude da aceitação dos partidos clássicos, à redução de áreas indispensáveis e, com esse objetivo adotamos uma solução em que a forma externa constitui como que um invólucro dentro do qual se acomodam amplas áreas de trabalho, previstas de maneira quase provisória - portanto, de construção econômica - aptas às atualizações que a técnica solicitar no futuro. O projeto dos teatros sofreu diversas modificações, tanto na concepção urbanística de seus elementos quanto na solução dos teatro propriamente dita. O primeiro partido por nós fixado previa dois teatro independentes. Um destinado à Ópera e Ballet e o outro, menor, Comédia, Ópera e Música de Câmara. Naquele estudo, o Teatro de Comédia tinha um sentido novo e revolucionário que muito nos agradava, pois eliminava a clássica localização da plateia e do palco de forma irremovível, sem dúvida um obstáculo para a elaboração das peças teatrais, da cenografia e da própria representação, e adotava como princípio básico a disposição variável da plateia, permitindo todas as modalidades de teatro, desde o de arena até o clássico grego. Estabelecia, com essa finalidade, um sistema de pistões que levantavam a plateia nos pontos desejados possibilitando que os cenários em alguns casos envolvessem o público para integrá-lo no espetáculo, evitando assim a separação ainda hoje existente entre esse e os artistas, e criando para os teatrólogos e cenaristas um novo campo de especulação profissional²¹".

Como demonstra o corte da figura 21, os palcos do teatro se encontram abaixo do nível de terra (0,0 m) e o empuxo do terreno é combatido com muros de arrimo autoportantes de concreto armado.

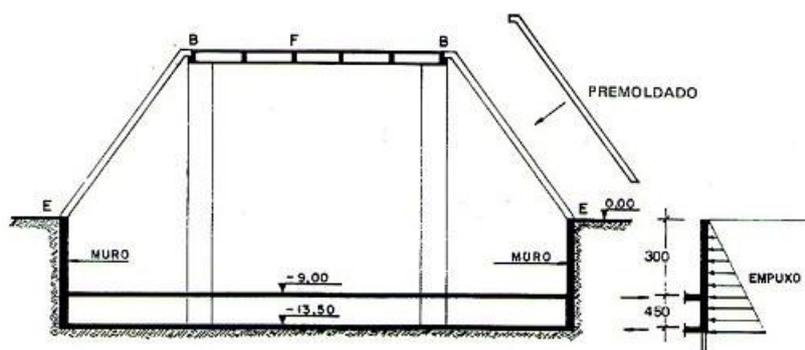


Figura 21 - Corte do Teatro Nacional "Claudio Santoro" mostrando os muros de contenção. Fonte: SOUZA, 2009.

²¹ NIEMEYER, Oscar; CALVO, Aldo. *Teatros oficiais no Setor Cultural de Brasília*. Módulo, Rio de Janeiro, v. 3, n. 17, p. 5-6, abr. 1960.

Projetada por Oscar Niemeyer e calculada por Joaquim Cardozo, a Catedral Metropolitana de Brasília foi construída entre 1959 e 1970. Essa obra de arte, com certeza, representa um dos marcos principais do gênio do Oscar que conseguiu imprimir um caráter de monumentalidade à catedral.

A estrutura resistente, constituída por dezesseis vigas/colunas curvas que culminam no topo da coroa em um anel de tração (60 m de diâmetro), é definidora da forma arquitetônica (INOJOSA, 2010).



Figura 22 - Catedral Metropolitana de Brasília. Fonte: o autor.

Segundo Pessoa (2002, apud INOJOSA, 2010, p. 55), a construção da Catedral de Brasília, naquela época, valorizou de forma brilhante a imagem dos engenheiros e arquitetos brasileiros.

"O projeto de uma catedral é sem dúvida um dos temas mais atraentes para o arquiteto. Seu estudo permite a maior liberdade de concepção, dada a simplicidade do programa com relação ao ritual sacro. Não se trata - e isto é fundamental - de resolver pequenos ambientes, para o que qualquer sistema construtivo seria aplicável, mas sim de criar os grandes espaços livres que caracterizam uma catedral. O problema é assim conduzido para o setor das grandes estruturas, integrando-se, conseqüentemente, na especulação e emprego da técnica mais avançada. Essa característica, que as catedrais estabelecem, permite aos estudiosos da arquitetura sacra, inclusive, uma ideia exata e cronológica da evolução e das diversas etapas por que passa a técnica construtiva. E, nessa evolução progressiva, estão presentes os exemplos mais preciosos da arquitetura religiosa, desde as primeiras construções em pedra, e as geniais conquistas da arte romana e gótica, até a época presente. Para a Catedral de Brasília, procuramos encontrar uma solução compacta, que se apresentasse externamente - de qualquer ângulo - com a mesma pureza. Daí a forma circular adotada, que além de garantir essa característica, oferece à estrutura uma disposição geométrica, racional e construtiva. Assim, vinte e um montantes, contidos em uma circunferência de setenta metros de diâmetro, marcam o desenvolvimento da fachada, numa composição e ritmo como de ascensão para o infinito. Entre eles, placas de vidro refratário de cor neutra serão

usadas, de modo a manter o interior em ambiente de suave recolhimento, no qual as formas do púlpito e do coro se destacam como elementos de escala e composição plástica. A entrada em rampa leva, deliberadamente, os fiéis a percorrer um espaço de sombra antes de se atingir a nave, o que acentua pelo contraste os efeitos de luz procurados. A Catedral de Brasília terá quarenta metros de altura, capacidade para quatro mil pessoas e um conjunto anexo com cerca de dez mil metros quadrados de construção²².

Segundo Inojosa (2010), a catedral foi edificada em duas fases distintas. Durante a primeira fase, foi realizada toda a estrutura principal e a laje de cobertura (não estrutural) como coroamento dos pilares curvos. A segunda fase determinou o acabamento interno e externo da arquitetura da catedral, incluindo o espelho d'água, rampa e vedação transparente.

Vários autores como Pessoa (2002) e Inojosa (2010) analisaram essa obra do ponto de vista estrutural e arquitetônico. Selecionando alguns trechos de trabalhos que visam entender o comportamento estrutural da catedral, podemos ver a representação da estrutura de escoramento das colunas principais na figura 23 e dois diagramas das forças cortantes e dos momentos fletores atuando na estrutura no eixo vertical Y (figura 24).

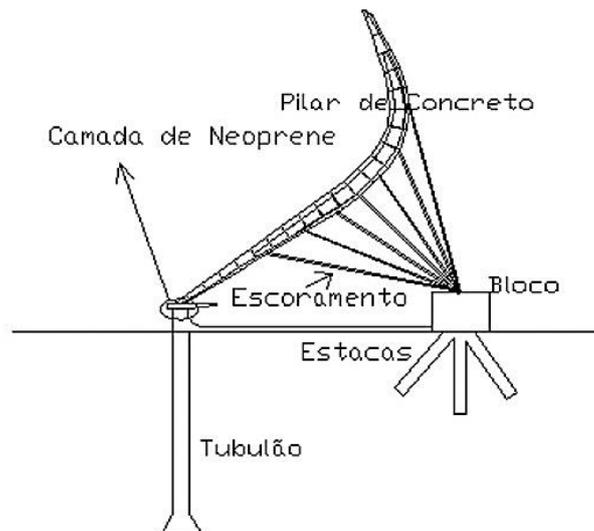


Figura 23 - Estrutura de escoramento das colunas da catedral. Fonte: www.vitruvius.com.br/revistas/²³

²² NIEMEYER, Oscar. A catedral de Brasília. Módulo, v.2, n.11, p.8-9, dez.1958;

²³ LEYENDECKER DE ANDRADE, Luana; LUNA DE MELO, Carlos Eduardo. Histórico do concreto em Brasília. Uma visão sobre a estrutura de obras em concreto armado na Capital. *Arquitextos*, São Paulo, ano 14, n. 161.02, Vitruvius, out. 2013

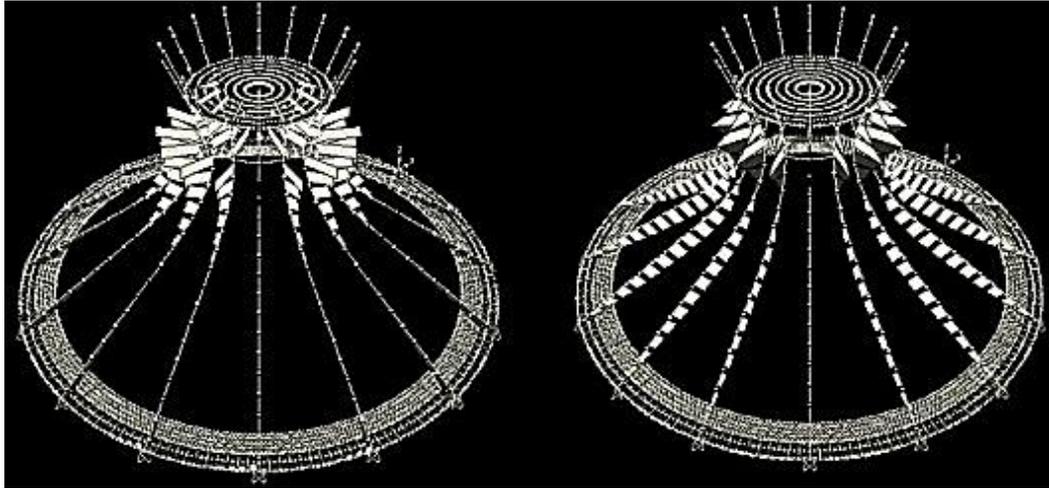


Figura 24 - Diagramas de forças cortantes e momentos fletores máximos. Fonte: PESSOA, 2002.

Ao entrar na Catedral de Brasília, o observador é raptado pela magnificência do ambiente interno e pela pureza da cor branca do acabamento interno.

O Museu Nacional Honestino Guimarães de Brasília, obra tarda do Oscar Niemeyer, é constituído por uma estrutura de concreto armado em forma de cúpula de casca dupla (GONÇALVES, 2010). O projeto, concebido pelo arquiteto carioca em 1970, passou por três transformações projetuais, sendo inaugurado somente em 2006.



Figura 25 - Museu Nacional de Brasília. Fonte: www.techne.pini.com.br.

Na arquitetura do mestre é evidente que o Sistema Estrutural reveste um papel fundamental na definição da própria morfologia e na sinuosidade da obra construída²⁴.

²⁴ INOJOSA, Leonardo da Silveira Pirillo. BUZAR, Márcio Augusto Roma. DE GREGÓRIO, Marcos Henrique Ritter. *Museu Nacional de Brasília: Reflexões sobre a Interação Arquitetura x Estrutura*. Revista Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo, Volume n° 15, Brasília, Julho de 2015.

O cálculo estrutural desse museu foi executado pela contribuição do engenheiro José Carlos Sussekind, figura extremamente importante na última fase de produção do Oscar Niemeyer.

O arquiteto, nessa fase da própria carreira, já conhecia muito bem as propriedades estruturais do concreto armado, permitindo alcançar uma plasticidade digna de uma obra de arte ousada do ponto de vista estrutural.

Como relata Inojosa (2010) na própria dissertação, o projeto definitivo do Museu Nacional foi aprovado em 2002 por Niemeyer que decidiu aumentar o tamanho da cúpula para 80 metros de diâmetro enquanto, “após estudos de uma maquete que representava quase toda a Esplanada dos Ministérios” (INOJOSA, 2010, p. 70), a obra estava “muito pequena diante do conjunto” (SÜSSEKIND, 2002, apud INOJOSA, 2010, p. 70).

Observando o corte longitudinal do museu na figura 26, podemos individualizar dois blocos constituintes a estrutura espacial: a base e a cúpula.

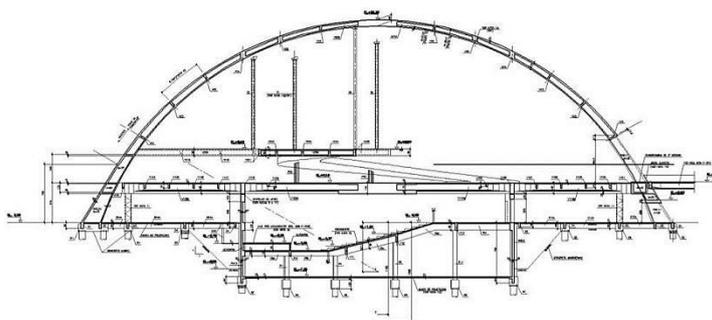


Figura 26 - Corte longitudinal do Museu Nacional de Brasília. Fonte: Casuarina Consultoria LTDA.

De acordo com Gonçalves (2010), os pavimentos da edificação tem uma estrutura convencional de pilares como elemento vertical e lajes nervuradas como elemento horizontal.

Portanto, após de ter abordado as obras principais que caracterizaram as melhores soluções técnicas e estruturais da arquitetura do Oscar Niemeyer, no terceiro capítulo será produzida uma análise sobre conceitos de sistemas estruturais que introduzirá o leitor para o fulcro desta dissertação: o sistema estrutural e construtivo da Procuradoria Geral da República.

3. ARTE ESTRUTURAL, DEFINIDORA DA FORMA ARQUITETÔNICA

3.1 O Arquiteto e o Engenheiro

“Se arquitetura é fundamentalmente arte, não o é menos fundamentalmente construção. É, pois, a rigor, construção concebida com intenção plástica. Intenção esta que a distingue, precisamente, da simples construção. Ela não atua, porém, essa intenção plástica, de uma forma abstrata, mas condicionada sempre por fatores de natureza variável de tempo e de lugar, tais como a época, o meio físico e social, os materiais empregados, a técnica decorrente do emprego desses materiais, o programa, etc. Pode-se, assim, definir Arquitetura como construção concebida com uma determinada intenção plástica, em função de uma determinada época, de um determinado meio, de um determinado material, de uma determinada técnica e de um determinado programa”.

(LUCIO COSTA)

Quem concebe a arquitetura, quem a estrutura?

O arquiteto é um artista plástico, interessado somente na elegância e na estética dos seus projetos?

O engenheiro é um profissional que calcula apenas a estrutura de uma edificação?

Essas perguntas são apenas algumas das que sempre fomentaram uma forte discussão entre os profissionais da área, cientistas e críticos de arte.

Mario Salvadori relata que arquiteto e engenheiro são as duas figuras mais importantes no panorama da construção civil e, ao mesmo tempo, que nenhum arquiteto conseguiria conceber formas ousadas sem consultar um engenheiro estrutural (SALVADORI, 1963, p. 6).

Conceber uma estrutura significa compreendê-la, entendê-la e ser capaz de explicá-la (FAY, 2006, p.30). Antes de tudo, a concepção estrutural é uma fase que antecede o dimensionamento.

De acordo com Liliana Fay (2006), conceber uma estrutura envolve a percepção com o espaço físico, o entendimento do caminho das forças e a identificação dos materiais que de forma melhor se adaptam ao sistema estrutural.

A profunda ligação que une arquiteto e engenheiro, fundamenta-se através da otimização dos gastos financeiros devidos aos altos custos dos materiais, da procura de tecnologias sempre mais avançadas e da criação de estruturas complexas que atendam requisitos satisfatórios de segurança e desempenho.

Esses princípios, definidos por David Billington no seu livro *“The Tower and the Bridge”*, se estruturam em três elementos que são o da eficiência, da economia e da estética.

Definindo a teoria baseada nos princípios da Arte Estrutural, os aspectos que caracterizam os três princípios devem ser utilizados como referência para a concepção de uma estrutura. Quem procura por esses elementos padrões da Arte Estrutural, tem que prestar atenção na utilização da quantidade de recursos de matéria a disposição, na conservação do aspecto econômico e na motivação estética, síntese final de um produto de arte e engenharia.

Gedion, no seu *“Espaço, Tempo e Arquitetura”*, se perguntava sobre quais seriam os princípios que o arquiteto e o engenheiro deveriam seguir e qual relação coexistiria entre essas duas figuras.

Um arquiteto que enfrenta a concepção formal da própria arquitetura deverá saber lidar com questões ligadas a conceitos de física, tecnologia dos materiais, sistemas construtivos e sistemas estruturais. Uma arquitetura de sucesso arraiga a sua essência na estrutura que compõe a própria forma.

Portanto, se a estrutura sustenta a forma e se funde na arquitetura, apesar das diferenças que existem na formação do arquiteto e do engenheiro, diremos que os dois universos tem uma ligação indissolúvel.

3.2 Conceitos de estrutura

As estruturas, definidas como as partes mais resistentes de uma edificação, exercem o papel de absorver e transmitir os esforços sofridos para o solo, sendo fundamentais para manter a segurança, o desempenho e a durabilidade de uma construção.

Uma estrutura é constituída por elementos estruturais, que, conectados entre eles, criam os sistemas estruturais. Portanto, para garantir que todos os elementos trabalhem em conjunto e de forma correta, as estruturas são compostas por materiais semirrígidos, chamados materiais estruturais.

A transmissão das forças verticais, sejam elas permanentes ou acidentais, é garantida através de elementos horizontais, como vigas (principais e secundárias) e lajes, que transferem os esforços para elementos verticais (pilares, paredes portantes, cabos de aço) até as fundações (que descarregam no solo).

Desta maneira, a estrutura de uma edificação tem como finalidade assegurar a forma espacial concebida através da arquitetura, assegurando integridade física à construção.

Uma estrutura, dependendo dos vínculos que caracterizam as suas ligações, pode ser definida hipostática, isostática ou hiperestática. Todos os elementos estruturais que caracterizam um sistema estrutural estão ligados através de vínculos que lhes permitem diferentes graus de liberdade, a depender das condições de apoio (CARRIERI, 2007).

Uma estrutura hipostática consta em um sistema instável que não possui um equilíbrio estático das forças. Esse tipo de estrutura consta de um número de reações de apoio inferior ao número de equações de equilíbrio estático. Portanto, *“as estruturas hipostáticas são inadmissíveis para as construções”* (SUSSEKIND, 1981).

Uma estrutura isostática tem o número de reações necessário para impedir qualquer movimento. Portanto, essa tipologia, é determinada por iguais números de reações de apoio e equações de equilíbrio. Nessa estrutura, ocorre uma situação de equilíbrio estável.

Diferentemente das primeiras, as estruturas hiperestáticas tem um número de reações de apoio superior ao necessário para impedir qualquer movimento das peças. A estrutura será chamada de hiperestática, continuando o equilíbrio a ser estável.

3.2.1 Geometria e morfologia dos elementos estruturais

A forma de um elemento estrutural, junto com a resistência característica do material utilizado, determina a capacidade de suportar cargas, sejam elas permanentes ou acidentais.

Quanto as suas relações geométricas, os elementos estruturais podem ser classificados em barras (frame), blocos (block) e cascas, membranas ou placas (shell).

Um elemento de barra é caracterizado por ter a dimensão de comprimento (l) consideravelmente significativa em relação às outras duas (b e h).

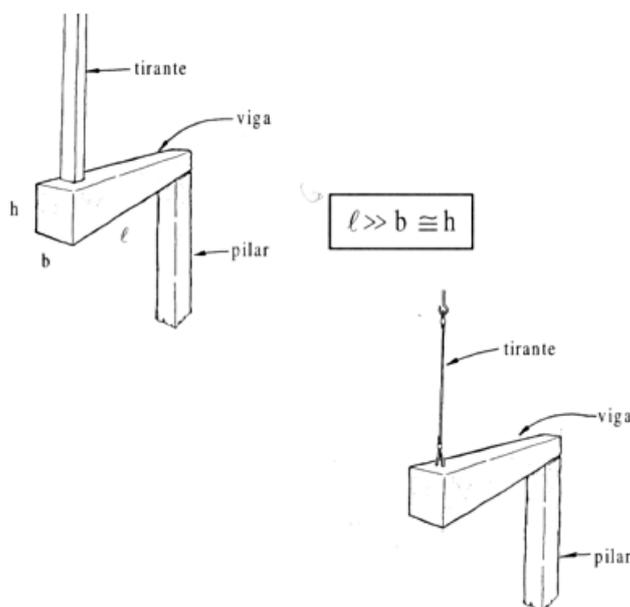


Figura 27 - Representação de um elemento de barra. Fonte: REBELO, 2000.

Os elementos estruturais que se enquadram nesse modelo são pilares, vigas e cabos ou tirantes (FAY, 2006). Cada um desses elementos reage bem a diferentes esforços de compressão, flexão e tração, dependendo do tipo de material que os compõem.

Os elementos de barra, interligados entre eles, formam sistemas estruturais simples ou complexos, dependendo da posição que irão se inserir no espaço físico.

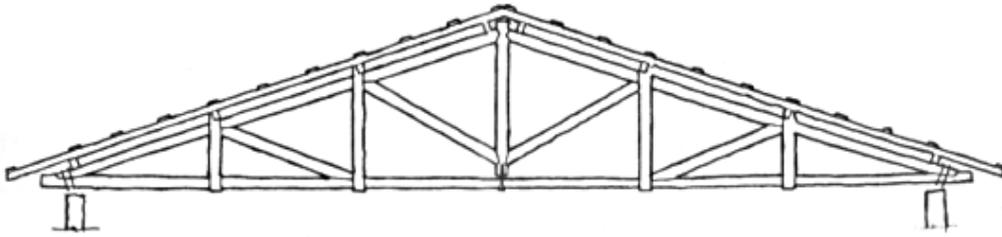


Figura 28 - Representação de uma treliça. Fonte: REBELO, 2000.

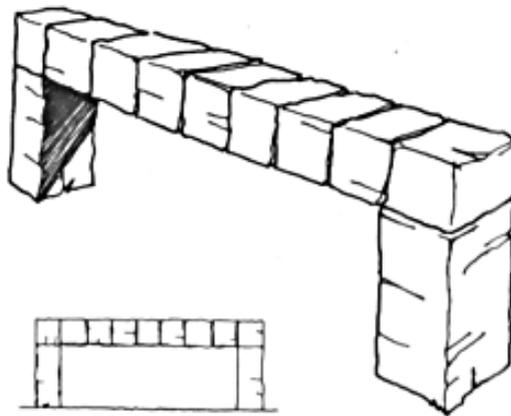


Figura 29 - Representação de um pórtico. Fonte: REBELO, 2000.

Diferentemente dos elementos de barra, o bloco é caracterizado por ter as três dimensões (l , h e b) com a mesma ordem de grandeza.

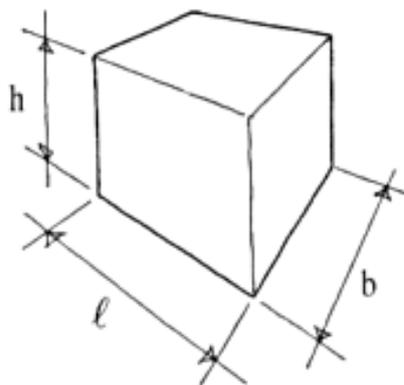


Figura 30 - Representação de um bloco. Fonte: REBELO, 2000.

O elemento de casca (shell) se caracteriza por ter duas das suas dimensões (l e b) muito mais significativas em relação à espessura (h). Os elementos arquitetônicos que se enquadram no modelo de casca são as lajes, membranas e cascas em geral.

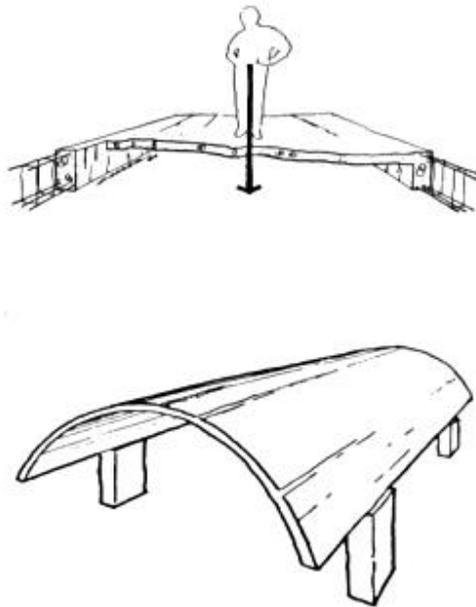


Figura 31 - Representação de elementos de casca. Fonte: REBELO, 2000.

O conhecimento desses elementos e a própria classificação ajudou o desenvolvimento desta dissertação de mestrado ao utilizar o programa computacional de modelagem SAP 2000.

3.2.2 Vínculos, apoios e graus de liberdade

A partir do momento que, no espaço físico, uma translação (vertical e horizontal) pode ser definida através de três eixos triortogonais e, uma rotação, como resultante de três rotações (x, y e z), pode-se dizer que uma estrutura possui seis graus de liberdade (SUSSEKIND, 1981).

Considerando que os vínculos de apoio limitam os movimentos de translação e rotação dos elementos estruturais, os graus de liberdade restringem-se em três:

- Translação Vertical; 
- Translação Horizontal; 
- Rotação; 

Portanto, os apoios são vínculos que tem a função de limitar os graus de liberdade das estruturas, “despertando com isto reações nas direções dos movimentos impedidos” (SUSSEKIND, 1981).

Os tipos de vínculos teóricos são três:

- **Charriot** ou apoio do 1º gênero;
Este apoio garante o deslocamento livre ao longo do eixo x , impedindo o movimento no eixo y . Manifesta-se uma força de reação de apoio R na direção do único movimento impedido.

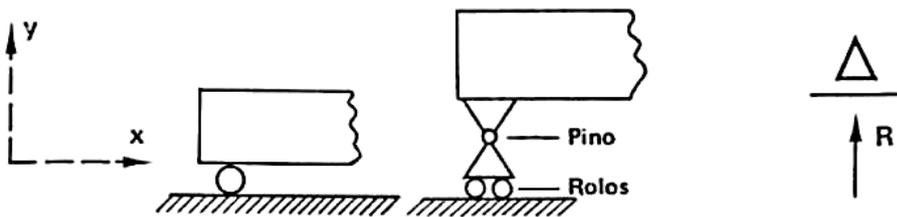


Figura 32 - Representação esquemática do apoio do 1º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.19.

- **Rótula** ou apoio de 2º gênero;

Esse tipo de apoio impede todas as translações no plano, deixa livre somente a rotação. Portanto, uma rótula consegue limitar o movimento em relação às duas direções, permitindo a rotação do sistema em torno de um ponto.

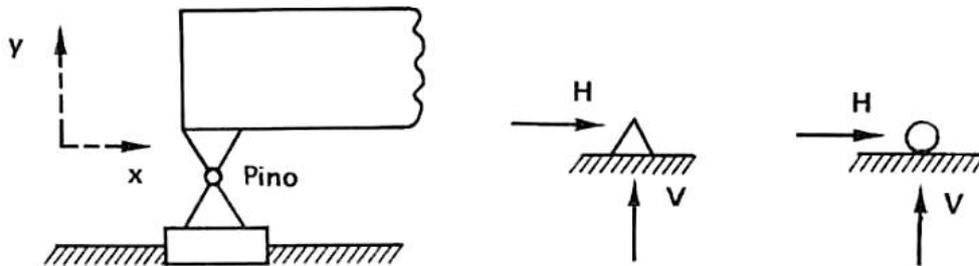


Figura 33 - Representação esquemática do apoio do 2º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.19.

- **Engaste** ou apoio do 3º gênero;

O engaste impede o movimento em relação às duas direções (eixos x e y) e a rotação. Esse apoio não permite alguma forma de movimento e absorve reações horizontais, verticais e momentos.

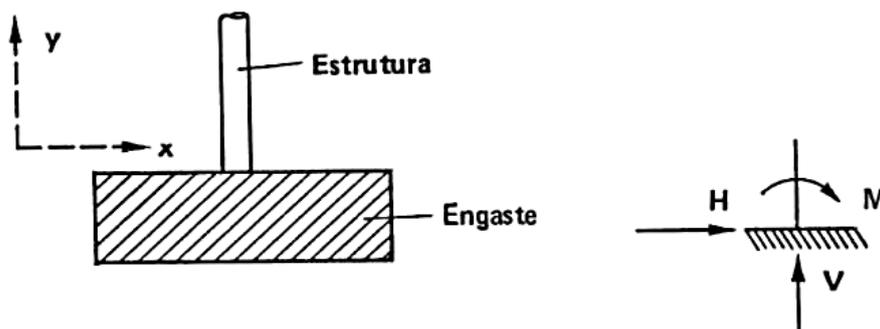


Figura 34 - Representação esquemática do apoio do 3º gênero. Fonte: SUSSEKIND, 1981 p.20.

O entendimento básico das tipologias de estruturas, movimentos que podem ser exercidos pelas peças estruturais e tipologias de apoios, levará o arquiteto raciocinar de forma mais crítica sobre o objeto de estudo representado pela obra do Oscar Niemeyer, a Procuradoria Geral da Republica.

Na figura 35, são representados alguns exemplos esquemáticos de como as vigas se comportam em relação a diferentes apoios.

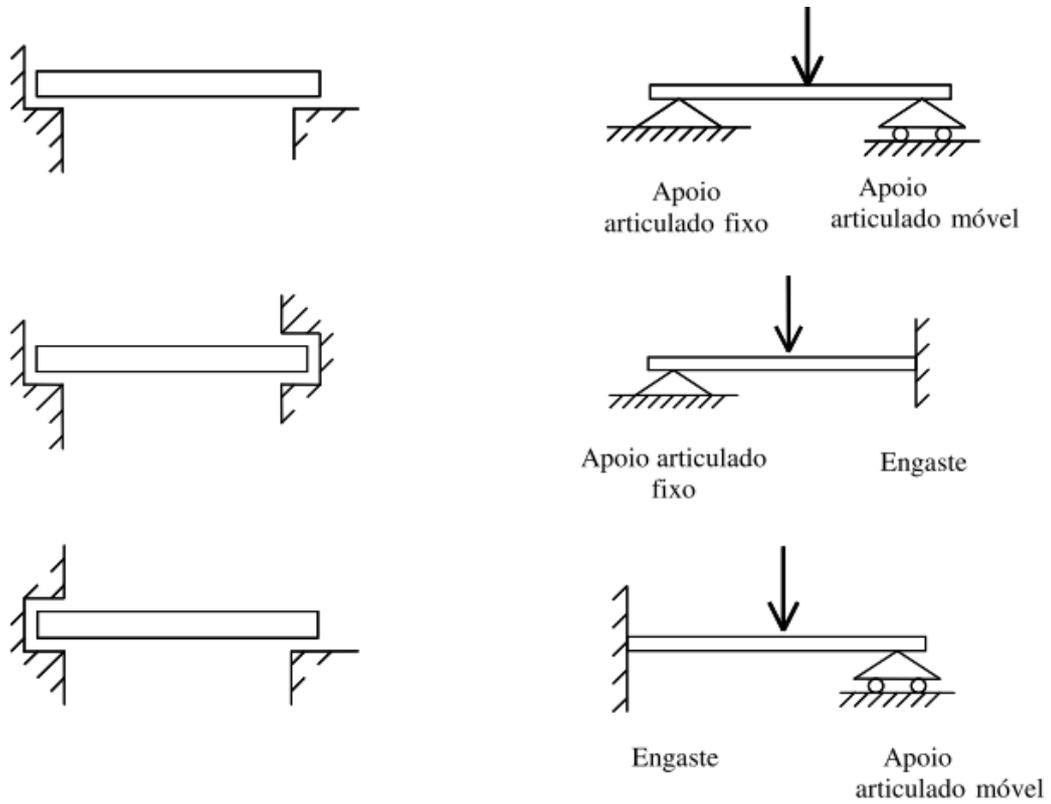


Figura 35 - Representação esquemática de vigas em relação a diversos apoios. Fonte: CARRIERI, 2007. P.21.

3.2.3 Cargas permanentes e cargas acidentais

As cargas podem ser de tipo “*permanente*” (C_g) ou “*acidental*” (C_q).

As permanentes são relativas aos pesos dos materiais atuantes sobre a estrutura que a constituem.

As cargas acidentais, todavia, são relativas às sobrecargas atuantes durante ações temporárias.

A distribuição das cargas sobre uma determinada estrutura, elemento ou sistema, pode assumir diferentes configurações, sendo elas distribuídas ou pontuais (FAY, 2006). Uma carga distribuída sobre uma área (laje) chama-se carga distribuída superficial.

Diferentemente, se a força insiste de forma distribuída sobre um elemento estrutural linear, como uma viga, irá se chamar carga distribuída linear.

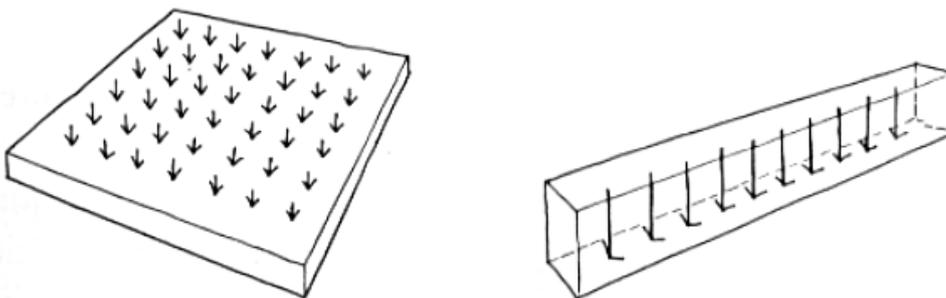


Figura 36 - Representação esquemática de cargas distribuídas, superficial e linear. Fonte: REBELO, 2000.

As forças que atuam de forma pontual são chamadas de cargas concentradas.

3.2.4 Esforços internos à estrutura

Os esforços internos relativos a um elemento estrutural são denominados de “*ativos*” enquanto determinam tensões internas ao sistema de equilíbrio (FAY, 2006). Essas tensões, que representam um esforço reativo, podem ser de tipo normal ou tangencial.

Por meio da comparação dessas tensões reativas com os esforços ativos, podem ser dimensionadas as seções dos elementos estruturais. Os esforços podem ser subdivididos em:

- *Tração simples ou axial;*
- *Compressão simples ou axial e flambagem;*
- *Força cortante;*
- *Momento fletor;*
- *Momento torçor.*

A *tração simples* (T) acontece quando uma barra, submetida a forças externas normais à sua seção na direção do seu eixo, sofre um alongamento Δ . A força de tração se distribui ao longo da seção da peça solicitada e o equilíbrio interno das forças será alcançado caso o material resista às tensões geradas pela tração.

O aço é um material que se presta bem para esses tipos de tensões (tração simples ou axial).

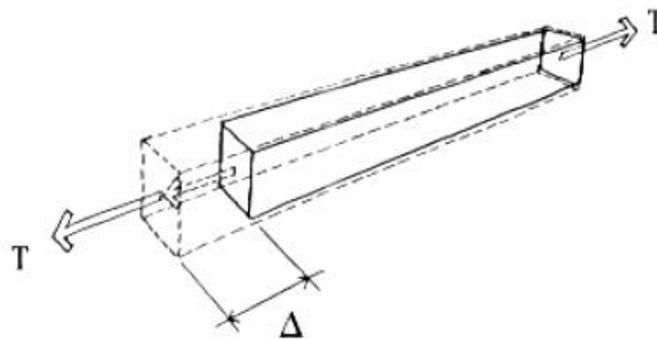


Figura 37 - Tração simples de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.

O esforço de *compressão simples* (C) acontece quando uma barra, submetida a forças externas normais à sua seção ao longo do próprio eixo, sofre um encurtamento Δ .

Quando a peça estrutural perde a estabilidade na direção do próprio eixo sem ter atingido ainda a fase de ruptura à compressão (colapso), verifica-se o fenômeno chamado *flambagem*. O concreto é um material que reage bem a compressão.

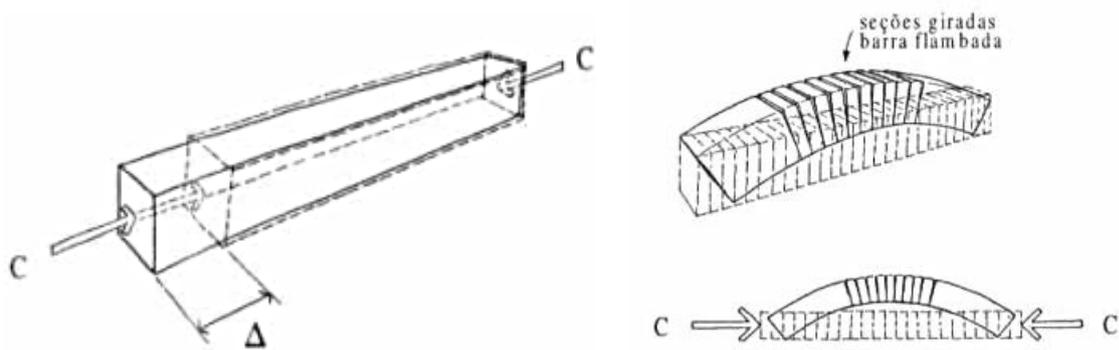


Figura 38 - Compressão simples e flambagem de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.

A força cortante (Q), que acontece ao longo de todo comprimento da barra, maximizando a própria intensidade próxima aos apoios, é uma tensão paralela à seção da peça estrutural. O equilíbrio interno das forças será alcançado quando o material terá uma resistência suficiente para reagir às esforços de tração e compressão. O concreto armado é um material adaptado para resistir aos esforços cortantes.

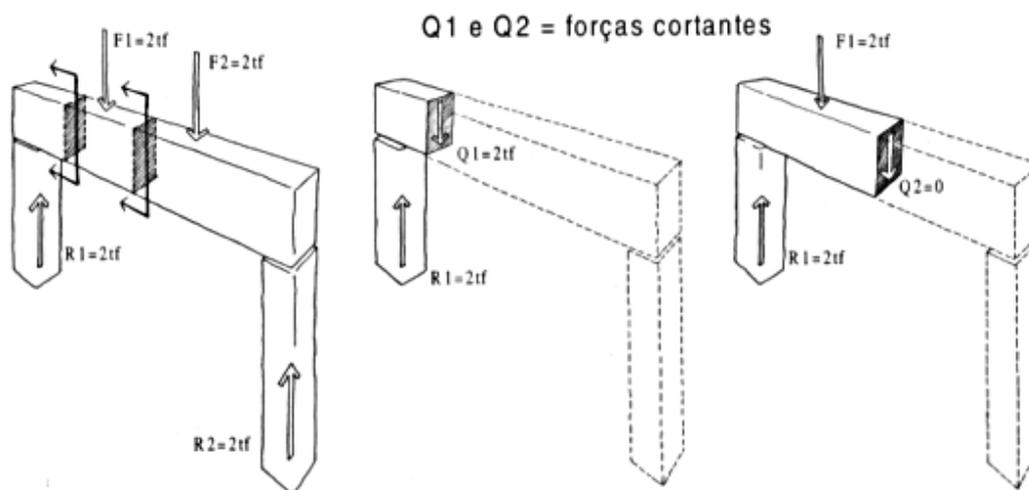


Figura 39 - Força cortante atuando em uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.

O momento fletor (M) é um esforço gerado por um giro. Esse giro, determinado por duas forças (F) que atuam em um binário no sentido oposto uma da outra, depende do braço do momento ($D =$ distancia entre as linhas de ação das forças) e do valor das forças devidas ao binário (FAY, 2006).

As deformações que derivam do momento fletor são chamadas de flechas.

Portanto: $M = F \times D$

Onde:

M = Momento fletor;

F = Força gerada pelo movimento binário;

D = Braço do momento.

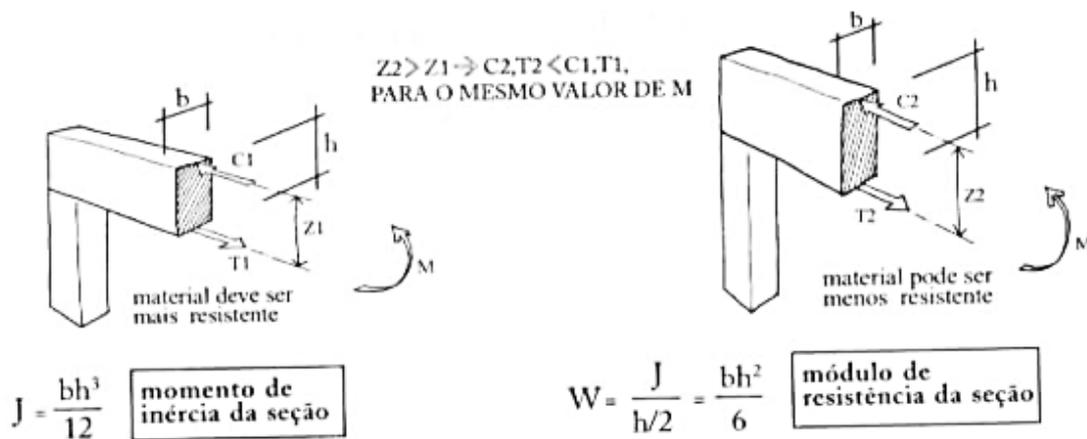


Figura 40 - Momento fletor atuando em uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.

O momento torçor (M_t) acontece quando uma seção gira entorno do eixo longitudinal (que se mantém reto) da peça estrutural, provocando tensões de cisalhamento.

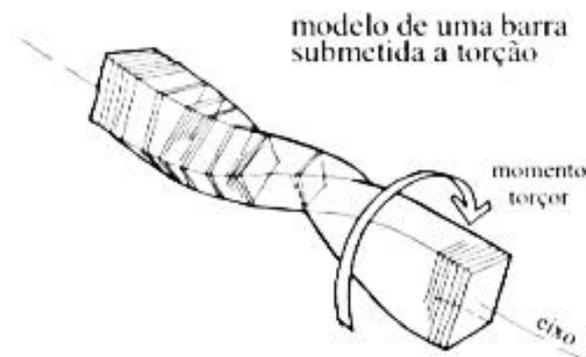


Figura 41 - Momento torçor atuando na seção de uma peça estrutural. Fonte: REBELO, 2000.

3.3 Vida útil, desempenho e segurança de uma estrutura

Segundo PRADO (1998, p. 08), planejar as fases de execução de uma obra antes de iniciá-la, cuja finalidade é garantir a qualidade da vida útil das construções, constitui o verdadeiro fulcro de todas as arquiteturas de sucesso.

A procura da durabilidade de uma edificação, devida á aumento da qualidade de vida dos usuários e á concorrência sempre maior do mercado, é uma tendência que domina o panorama atual da construção civil (GALIMI e CAMANHO, 2016).

Portanto, a vida útil de uma estrutura, pode ser definida como:

“...o período de tempo em que o edifício e seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento aos níveis de desempenho previstos, considerando-se a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção”.

(ABNT NBR 15575:2013).

Esse conceito, que mensura a expectativa de duração de uma estrutura ou das suas partes, tem uma limitação concreta, devida ao surgimento de patologias pontuais ou difusas. A Norma Brasileira de Desempenho representa o principal documento normativo que aborda todas as temáticas de desempenho em edificações habitacionais (residenciais e não) e tenta estabelecer uma metodologia de avaliação de tecnologias e sistemas construtivos.

A categoria dos profissionais da área de engenharia civil, incluindo profissionais (engenheiros e arquitetos), mestres de obras e funcionários especializados, está cada vez mais focada na busca de novas tecnologias e métodos construtivos para realizar obras que sejam compatíveis com as exigências do mercado moderno. Para garantir um nível de excelência nas edificações residenciais e não, é necessário estabelecer um rigor ético e profissional em todas as fases de vida do projeto, desde a concepção arquitetônico-estrutural.

Após de vários acidentes relacionados á construção civil no Brasil e no exterior, que causaram graves danos econômicos e sociais, a comunidade internacional dos engenheiros se mobilizou para normatizar o conceito de durabilidade e aumento da vida útil das construções.

O desempenho de uma edificação, conhecido como o comportamento em uso de uma determinada estrutura, abrange as condições mínimas de habitabilidade necessárias para os usuários.

A NBR 15575:2013 estabelece 12 critérios de desempenho para edificações residenciais (conforme a tabela 1), baseados e adaptados a partir da normativa internacional ISO 6241:1984.

O conceito de desempenho, junto à manutenção periódica, influencia de forma direta a vida útil de uma estrutura e as diferentes partes de uma edificação.

A Norma brasileira de desempenho reforça e ressalta o fato que é indispensável salientar a importância da realização integral das ações de manutenção executadas diretamente pelo usuário, para poder atingir a vida útil (VU) determinada pelo projetista (ABNT NBR 15575:2013).

A tabela 1 mostra os critérios de desempenho necessários para edificações residenciais, na norma brasileira e na ISO 6242:1984 europeia.

ITENS	NBR 15575:2013	ISO 6242:1984
I	Desempenho estrutural	Estabilidade estrutural e resistência a cargas estáticas, dinâmicas e cíclicas
II	Segurança contra incêndio	Resistência ao fogo
III	Segurança no uso e na operação	Resistência à utilização
IV	Estanqueidade	Estanqueidade
V	Desempenho térmico	Conforto higrotérmico
VI	Desempenho acústico	Conforto acústico
VII	Desempenho luminoso	Conforto visual
VIII	Durabilidade e manutenção	Durabilidade
IX	Saúde, higiene e qualidade do ar	Higiene
X	Funcionalidade e acessibilidade	Conforto tátil
XI	Conforto tátil e antropodinâmico	Conforto antropométrico
XII	Adequação ambiental	Qualidade do ar

Tabela 1 - Critérios de desempenho para edificações residenciais.

O gráfico, representado na figura 42, demonstra a relação qualitativa e quantitativa que existe entre a curva do nível de desempenho de uma construção e seu tempo de vida útil.

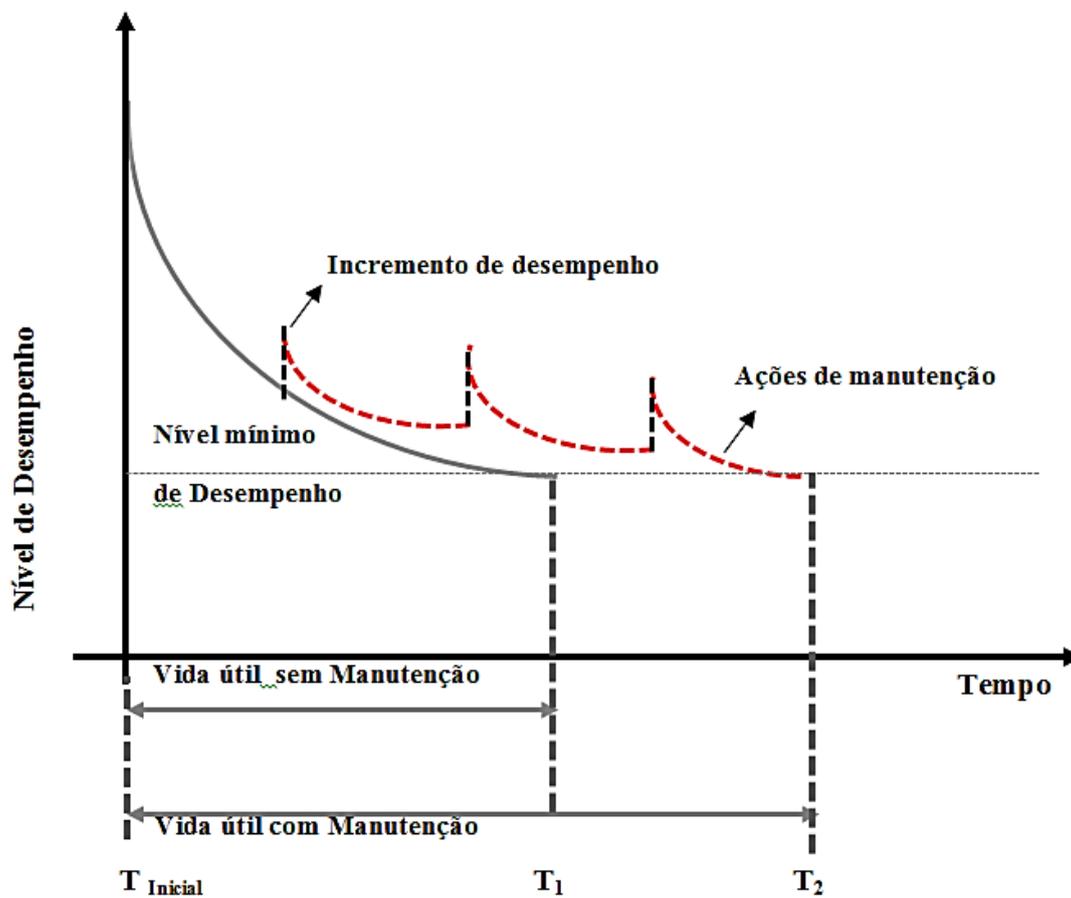


Figura 42 - Desempenho com e sem manutenção para edificações residenciais. Fonte: Galimi e Camanho, 2016.

3.4 Análise estrutural tridimensional de elementos finitos

O programa computacional SAP2000, utilizado ao longo desta dissertação de mestrado acadêmico, é um sistema de análise estrutural tridimensional de elementos finitos e uma ferramenta de auxílio ao projeto, para arquitetos e engenheiros que trabalham com obras públicas, privadas, industriais, infraestrutura de transporte e instalações.

Anteriormente ao utilizo deste ambiente de modelagem 3D foi feita uma revisão geral sobre elementos construtivos e sistemas estruturais, abordando:

- *Conceitos de estrutura (Cap.3.2);*
- *Geometria e morfologia dos elementos estruturais (3.2.1);*
- *Vínculos, apoios e graus de liberdade (3.2.2);*
- *Cargas permanentes e cargas acidentais (3.2.3);*
- *Esforços internos à estrutura (3.2.4);*
- *Vida útil, desempenho e segurança de uma estrutura (3.3).*

Todos esses conceitos, utilizados como base teórica, permitiram um entendimento mais aprofundado das ferramentas do SAP2000 e a aplicação empírica durante a modelagem do objeto de estudo, a Procuradoria Geral da República.

A partir da sua plataforma de modelagem gráfica baseada em objetos tridimensionais até o grande numero de opções de análise²⁵ e de projeto integrado, o SAP2000 tem demonstrado ser um programa estrutural dinâmico, produtivo e prático para arquitetos.

Os conceitos de estrutura e as tipologias foram importantes para distinguir uma estrutura *hipostática, isostática e hiperestática*.

A escolha da geometria dos elementos e peças estruturais é o primeiro passo para começar a modelagem de um pórtico simples até um sistema mais complexo.

Portanto, através do exemplo de um pórtico simples, serão apresentadas de forma esquemática as fases principais que acompanharam o desenvolvimento da modelagem da PGR.

²⁵ Análise de grandes deformações, análises de *Eigen* e *Ritz*, com base na rigidez de casos não lineares, análise de catenária de cabos, análise de não-linearidade física com rótulas, elemento de casca não-linear com múltiplas camadas, análise de flambagem, análise de colapso progressivo, métodos de energia para o controle de tração, amortecedores dependente de velocidade, os isoladores de base, a plasticidade de apoio e análise não-linear de construção segmentada. Análises não-lineares podem ser estáticas e dinâmicas com cargas que variam no tempo (*time-history*), com opções para análise dinâmica FNA não-linear ao longo do tempo e integração direta.

A primeira fase deve determinar:

- Reajuste das unidades em quilograma-força (*kgf*) e metros (*m*);
- Definição de matérias a ser utilizados;
- Definição das seções (*frame sections*) e das geometrias.

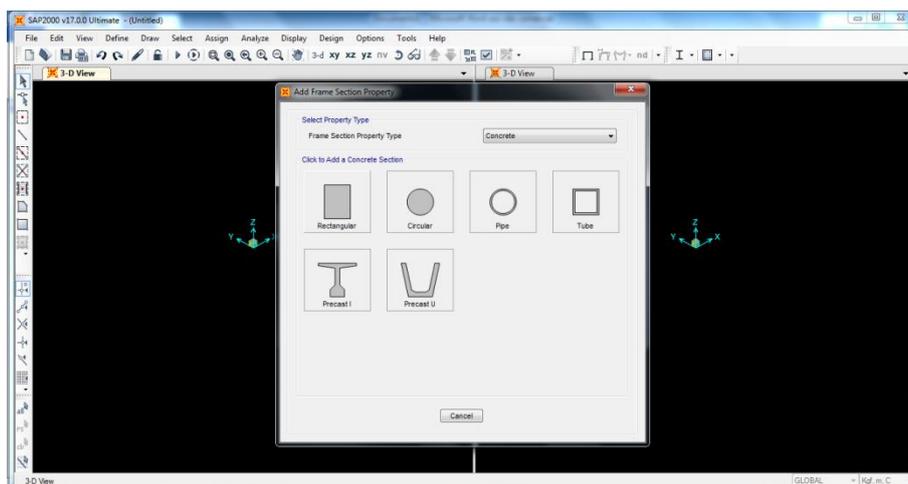


Figura 43 - Definição das seções dos elementos estruturais no SAP2000. Fonte: o autor.

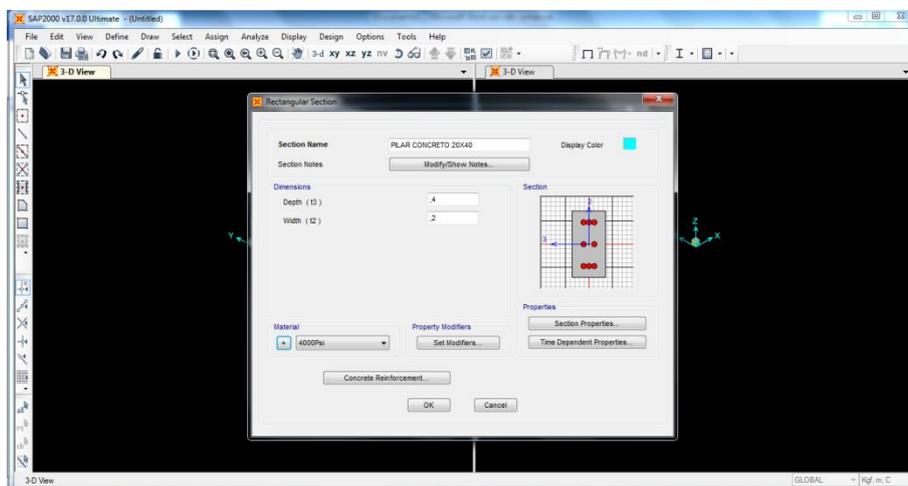


Figura 44 - Definição dos materiais e das geometrias no SAP2000. Fonte: o autor.

Após de ter definido as características morfológicas das peças, a segunda fase prevê o carregamento da estrutura, determinando:

- Definição de tipos de cargas, permanentes (*dead*) e acidentais (*live*);
- Definição das combinações de carga para os estados limites últimos;

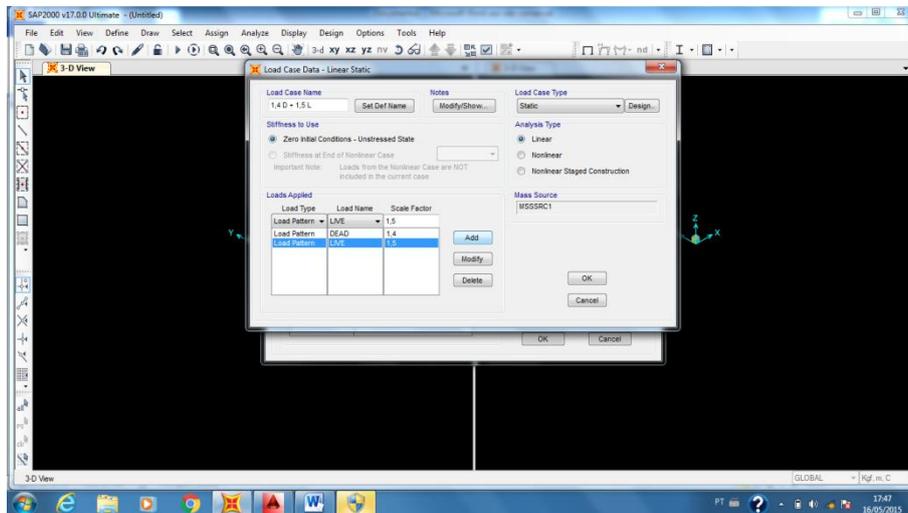


Figura 45 - Definição das combinações de carga no SAP2000. Fonte: o autor.

Na terceira fase, definidas as geometrias das peças e as cargas, devemos importar os elementos de barras (*frame*) e de casca (*shell*), previamente desenhados no programa *AutoCAD 2014* (versão utilizada pelo autor para desenhar o modelo através da modelagem 3D própria do sistema). Portanto, foram executadas as seguintes operações:

- Identificação do elemento desenhado no *AutoCAD 2014* correspondente ao elemento que será modelado no SAP2000;
- Importação de todos os elementos constituintes a estrutura objeto de análise.

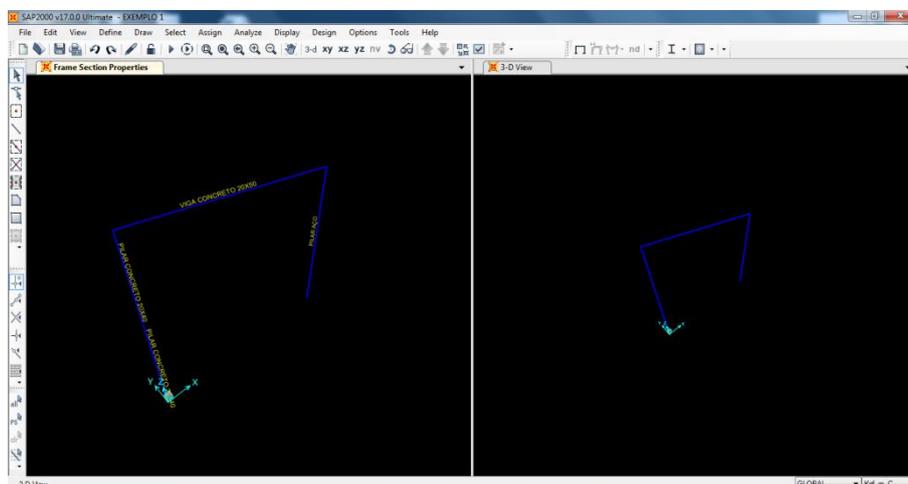


Figura 46 - Criação da estrutura no SAP2000. Fonte: o autor.

A estrutura, agora visual, deve ser submetida a vínculos e carregada de forma realística. Portanto, a quarta fase visa:

- Inserção de vínculos nos vários nós da estrutura;
- Carregamento da estrutura através de cargas permanentes e acidentais;
- Análise estrutural.

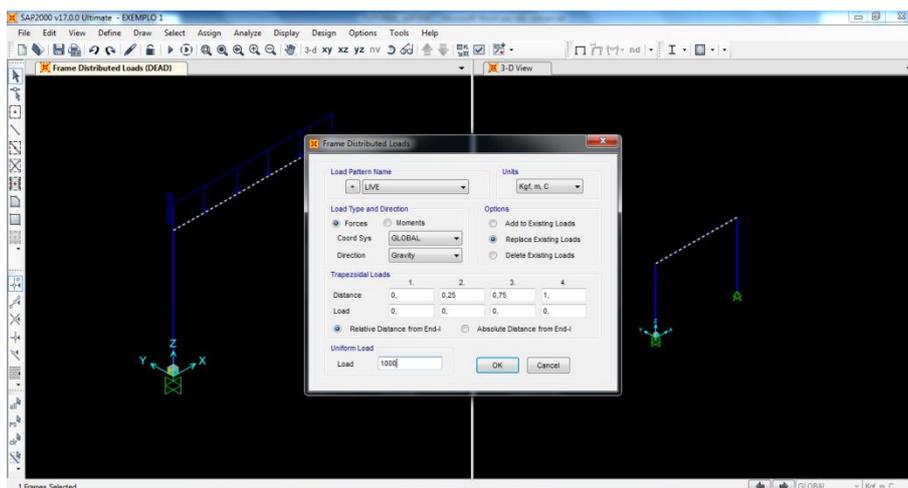


Figura 47 - Análise estrutural no SAP2000. Fonte: o autor.

3.5 As Estruturas atirantadas

3.5.1 Conceito de cabo

O avanço tecnológico do aço de alta resistência determinou a realização de grandes estruturas que utilizam cabos pré-tensionados e protendidos para transmissão de elevadas forças de tração.

O elemento estrutural chamado de "cabo", resistente ao esforço interno solicitante de tração, consta em uma barra linear cuja geometria de comprimento é tão influente em relação à sua seção transversal que se torna um elemento extremamente flexível. Não apresentando rigidez à compressão e flexão, se deforma totalmente caso receba esses tipos de esforços.

As formas assumidas pelos cabos dependem do carregamento que nele atua, caracterizando-se assim como uma estrutura pouco estável quando sujeito a variações no carregamento.

Os cabos são utilizados em vários tipos de estruturas. Nas pontes pênses e nos teleféricos são os principais elementos portantes, nas linhas de transmissão conduzem a energia elétrica, vencendo vãos entre as torres e são empregados como elemento portante de coberturas de grandes vãos (SUSSEKIND, 1987).

Liliana Fay relata que para entender o comportamento de um cabo deve-se colocar um fio preso a uma barra fixa por meio de anéis na altura dos seus extremos. Se aplicada uma carga concentrada P no seu ponto médio, a morfologia do cabo mudará adquirindo uma forma triangular. A figura 48 mostra que a distancia entre o vértice do triangulo e a base, representada pela barra, constituirá uma determinada flecha.

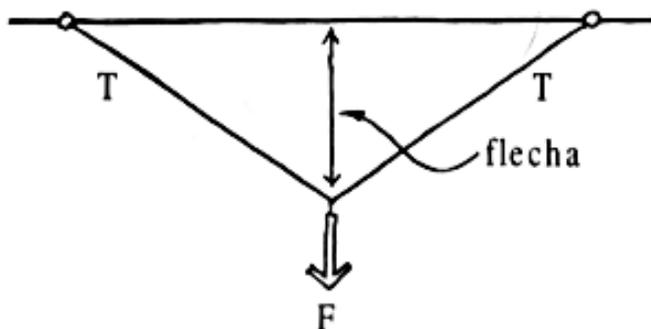


Figura 48 - Comportamento de um cabo com carga concentrada no ponto médio. Fonte: REBELO, 2000.

No Brasil, a normativa que regula o utilizo de cabos de aço na engenharia civil é a ABNT NBR 6327:2004. No texto da ABNT são especificadas as características do elemento estrutural, as dimensões permitidas, as cargas de ruptura e todas aquelas informações que um profissional da área precisa para a aplicação de cabos.

	Alma de fibra	Almas de aço	
		1 770 N/mm ²	1 960 N/mm ² 2160 N/mm ²
6 x 7	0,90	0,97	0,99
6 x 19 8 x 19 6 x 37/ 8 x 37	0,86	0,92	0,95
Não-rotativo	0,82	0,88	0,90

Tabela 2 - Coeficiente para cálculo da carga de ruptura do cabo. Fonte: ABNT NBR 6327:2004.

3.5.2 Tipologias

Entrando no específico das estruturas que utilizam elementos tracionados (cabos de aço, tirantes) como principais responsáveis do equilíbrio das forças, podem-se distinguir duas tipologias de estruturas:

- *Estruturas suspensas;*
- *Estruturas atirantadas.*

A tipologia das estruturas suspensas é caracterizada por ter cabos de aço exercendo a função principal de suporte, assumindo uma morfologia devida aos pontos de ancoragem e aos pontos intermédios (TRINIDADE, 1994). Pontes suspensas e coberturas suspensas são as principais tipologias arquitetônicas criadas através dessa tecnologia construtiva.

A outra tipologia arquitetônica composta por tirantes de aço é representada pelas estruturas atirantadas. Essas estruturas, diferentemente das suspensas, utilizam um conjunto de cabos para cumprir uma função estrutural intermediária e estabilizar o equilíbrio de uma estrutura, *“como, por exemplo, nas torres e mastros atirantados”* (TRINIDADE 1994, p.6).

As estruturas atirantadas, concebidas para vencer grandes vãos²⁶, constituem um sistema flexível complexo que implica uma forte interação entre todos os elementos da construção.

Entre as estruturas atirantadas mais utilizadas na construção civil, com certeza, se destacam as pontes estaiadas, coberturas atirantada ou tensoestruturas e prédios que utilizam essa tecnologia de forma parcial para sustentação de andares ou passarelas.

3.5.3 As pontes estaiadas

Uma ponte estaiada é uma ponte regida por meio de cabos de sustentação, que partem de um ou mais mastros, para chegar até os tabuleiros da mesma.

Essas pontes são a solução intermediária ideal entre uma ponte pênsil, que requer uma maior estrutura de cabos e uma ponte fixa, que precisa de uma estrutura de sustentação mais complexa e cara (DE MIRANDA, 1980).

²⁶ Birnstiel, C., Analysis and Design of Cable Structures, Computer and Structures, Vol.2, 1972;

Existem dois tipos básicos de pontes estaiadas:

- O tipo "*Harpa*" é caracterizado por possuir cabos que correm paralelos a partir do mastro, de modo que a altura do ponto de fixação do cabo no mastro seja proporcional à distância entre o próprio mastro e o ponto de fixação deste cabo no tabuleiro. O sistema se distingue por apresentar uma distribuição uniforme dos estais ao longo de todo o comprimento do mastro, fazendo com que os estes tenham a mesma inclinação e conferindo simetria e ordem ao sistema.

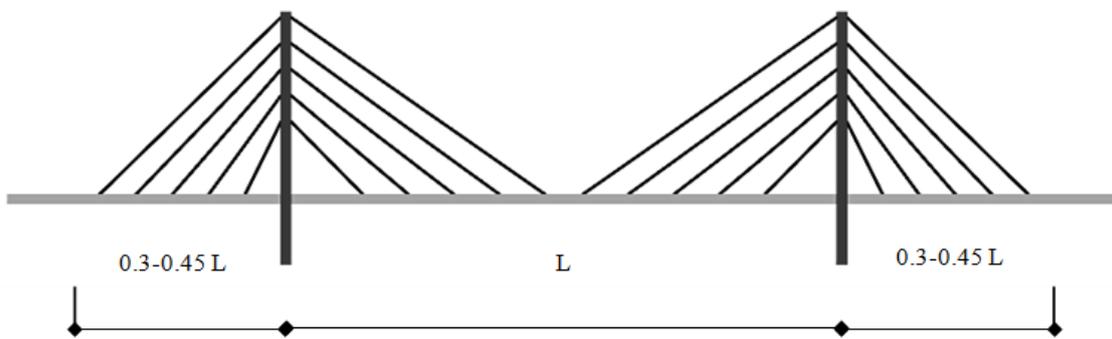


Figura 49 - Fonte estaiada tipo harpa. Fonte: o autor.

- O tipo "*Leque*" é caracterizado por agrupar os cabos na parte de cima do mastro e, concentrados neste ponto, os estais são direcionados para atingir o ponto de ligação com o tabuleiro da ponte. Este tipo de sistema apresenta problemas no detalhamento da região pontual de concentração dos estais no mastro, enquanto as ancoragens exigem um mínimo espaço físico para inserção dos mesmos.

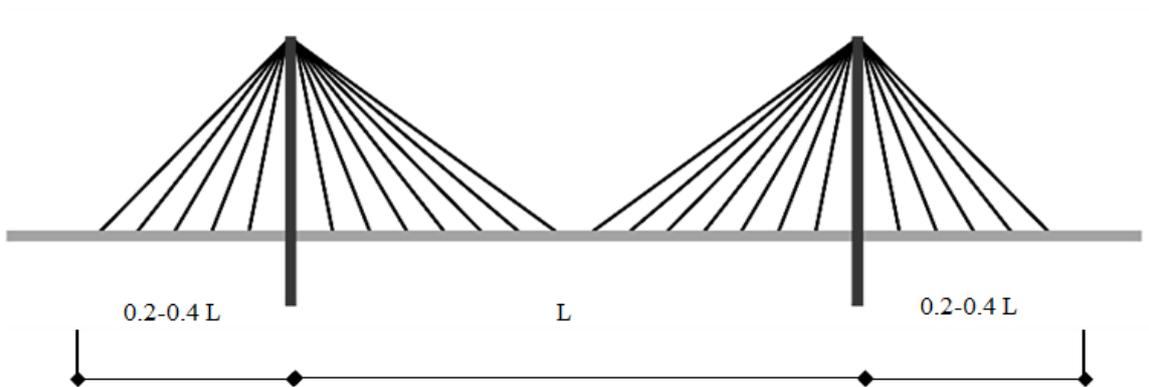


Figura 50 - Fonte estaiada tipo leque. Fonte: o autor.

As pontes realizadas com a tecnologia estaiada se tornam muito atrativas do ponto de vista artístico e arquitetônico remetendo a uma característica de uma leveza estrutural, principalmente utilizadas para vencer grandes vãos, de 200 metros a 1000 metros.

No caso em que a ponte necessite vencer maiores distâncias e vãos, é preferível do ponto de vista econômico, utilizar outros tipos de tecnologias para a concepção das mesmas.

Analisando o sistema estrutural das pontes estaiadas, podemos distinguir três principais elementos que a compõem:

- *Sistema de Estaiamento (Cabos ou Estais):* O sistema de estaiamento é formado por “estais” que ligam o tabuleiro ao mastro. Os sistemas de pontes estaiadas se diferenciam por causa da diversa disposição das estais ao longo do mastro. O “estai”, cabo ou tirante, é o elemento principal de uma ponte estaiada e transmite as cargas dinâmicas que acontecem no tabuleiro para o Mastro ou Pilar. Além disso, os estais são formados por três elementos distintos:
 - *Elementos de tensionamento* (conjunto de barras de aço que seguram o tabuleiro, ligando ele diretamente ao mastro);
 - *Sistema de ancoragem* (garante a justa tensão dos estais na altura do tabuleiro, ajudando os elementos estruturais a trabalhar em conjunto);
 - *Sistemas de proteção* (protegem os estais contra as ações climáticas de raios ultravioleta, chuva e futura corrosão. Geralmente são tubos feitos em polietileno).

- *Tabuleiro:* Esse elemento é a parte da ponte onde são recolhidas as cargas dinâmicas e onde passam esses tipos de forças (carros, caminhões, pedestres, etc.). O tabuleiro pode ser constituído por concreto, aço ou misto e pode ter diferentes geometrias (formas).

- *Pilares ou Mastros:* São os elementos verticais que, tramite os estais, permitem a sustentação do tabuleiro e garantem o funcionamento correto do sistema. Podem ser constituídos por diferentes materiais como alvenaria em pedra ou concreto armado e aço.

A exigência de criar um atravessamento físico de um rio, de um trato de mar ou de um espaço vazio entre duas montanhas, sempre foi procurada pelo homem desde a antiguidade. Apesar de ter referências e traços nas civilizações mais antigas, podemos afirmar que o começo da produção das pontes estaiadas consta a partir do século XVIII.

O primeiro exemplo real de experimentação de uma ponte estaiada foi feito em madeira em 1784 por um carpinteiro alemão, Immanuel Löscher.

Depois desse tipo de concepção estrutural em madeira, a tecnologia do aço levou ao desenvolvimento de uma verdadeira prática em projetar pontes estaiadas com vãos sempre maiores e sempre mais marcadas por sua leveza. O primeiro grande projeto deste tipo de ponte, reconhecida em nível internacional e considerada como uma obra de arte é a Ponte de Brooklyn do Roebling em Nova York.



Figura 51 - Vista noturna da ponte de Brooklyn, fonte: www.wikipedia.it

Concebida com os mesmos princípios de dimensionamento da ponte do Niágara, essa estrutura hiperestática, construída em 1883, possui um vão central de 486,50 metros e um comprimento total de 1059,90 metros.

Roebling projetou a Ponte de Brooklyn de maneira tal que o vão central fosse sustentado completamente pelos estais parabólicos e os trechos próximos aos pilares monumentais, por cabos protendidos (DE MIRANDA, 1980). Os estais dessa ponte exercem um papel muito importante enquanto são projetados para aguentar as cargas permanentes e acidentais.

Em 2005, Christian Menn projetou uma ponte estaiada cruzando o lago Grimsel, com 352 metros de comprimento e suportados por dois mastros invertidos na forma de

“Y” de 75 metros de altura. A sua pista de rolamento é projetada com uma fina laje de 10 metros de largura e com 1,2 metros de espessura, realizada em dois planos inclinados com tirantes fixos nas bordas do convés onde proporcionam rigidez à torção do deck.



Figura 52 - Ponte Grimsel, Suíça. Fonte: www.wikipedia.it

A expressão estética desta ponte é caracterizada pela sua forma simples e pura, na relação da sua pista de rolamento com seus mastros, com o arranjo dos tirantes e a sua ancoragem em forma de cristais na montanha. O design desta ponte consiste no resultado de um processo de redução dos elementos estruturais para atender aos requisitos funcionais e ambientais dado pelas condições climáticas nos Alpes suíços.

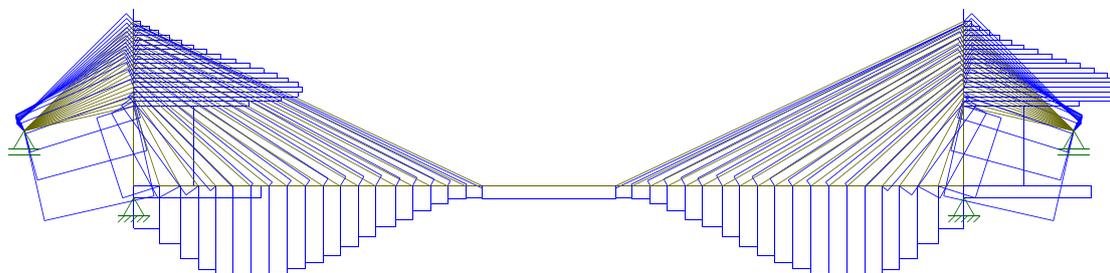


Figura 53 - Esforço normal da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

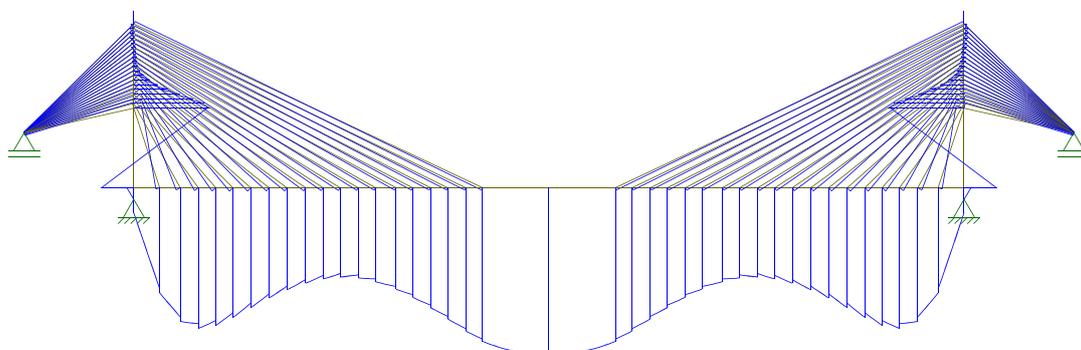


Figura 54 - Momento fletor da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

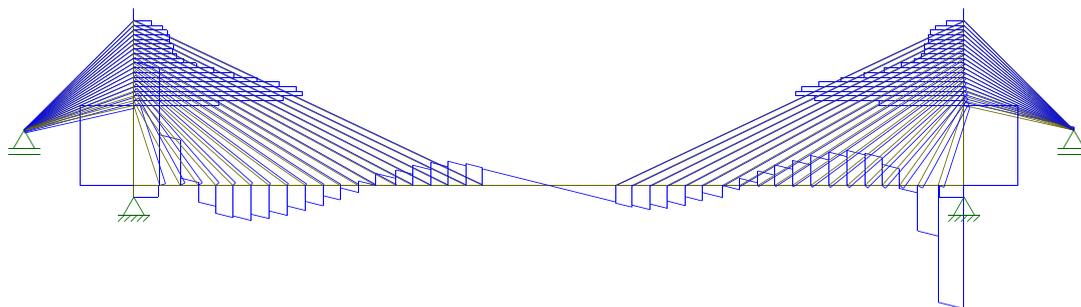


Figura 55 - Diagrama cortante da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

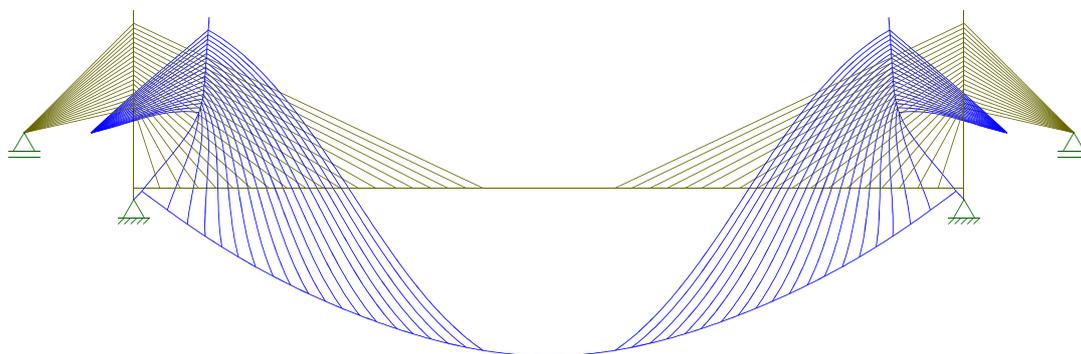


Figura 56 - Diagrama de deslocamento da Ponte Grimsel, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

Outra importante obra de ponte estaiada é representada pela ponte de Sunniberg (1998), localizada na cidade de Kloisters, na Suíça, é considerada um marco da leveza estrutural.

Com um design inovador, a ponte do Christian Menn transmite uma sensação de total equilíbrio com a paisagem.

Reconhecida como uma evolução dos projetos do Menn é uma das maiores pontes executadas sobre os Alpes. Realizada com a tecnologia do tipo harpa, apresenta uma distribuição uniforme dos estais ao longo dos três vãos principais e dos dois vãos laterais. Com 526 metros de comprimento, o tabuleiro segue um raio de curvatura de 503 metros e uma inclinação de 3,2%, além de possuir uma largura total de 12,37 metros.

O plano curvo desta ponte, executado pelo fato da plataforma ser projetada em concreto armado, resulta em uma laje monolítica sem expansão e articulações nos pilares. Permitindo que os pilares fossem comprimidos tanto lateralmente como longitudinalmente pelo pavimento, o que resulta na forma esbelta e visualmente discreta na paisagem.



Figura 57 - Ponte de Sunniberg, Suíça. Fonte: www.wikipedia.it.

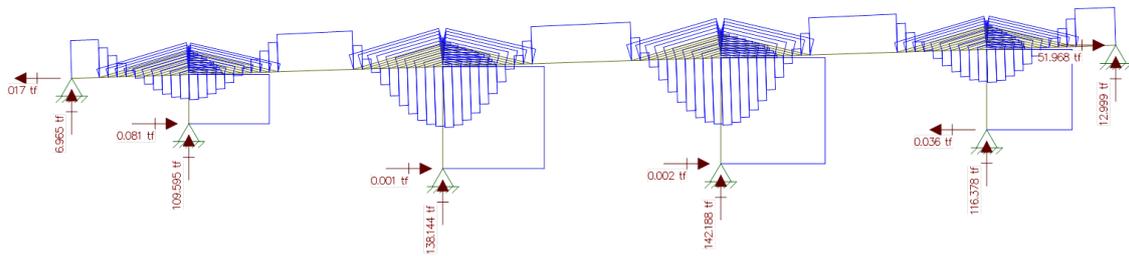


Figura 58 - Esforço normal da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

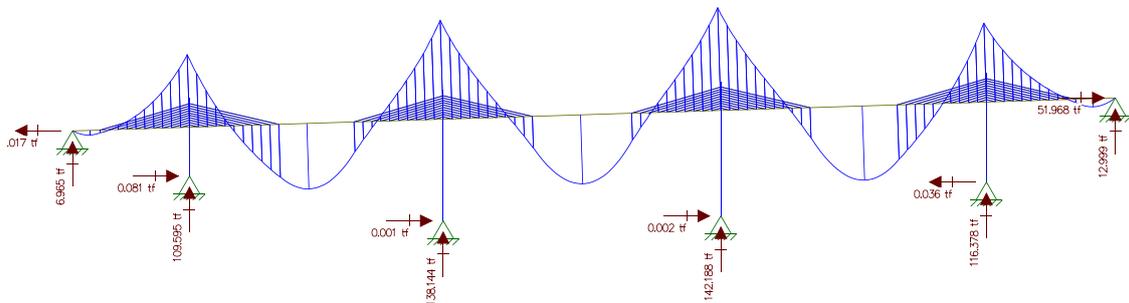


Figura 59 - Diagrama do momento fletor da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor;

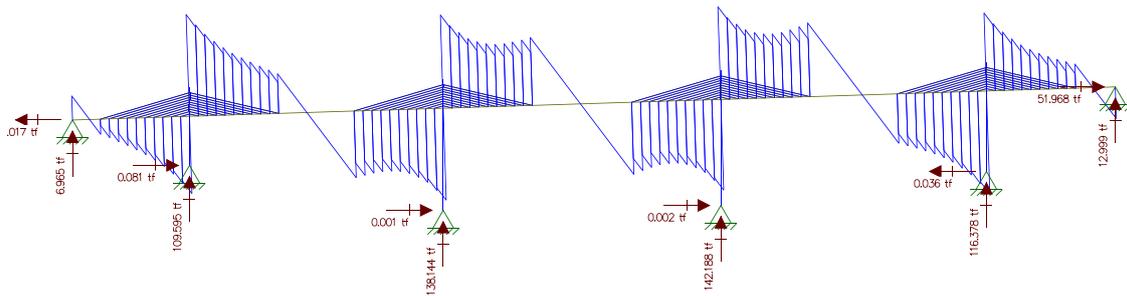


Figura 60 - Diagrama do cortante da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

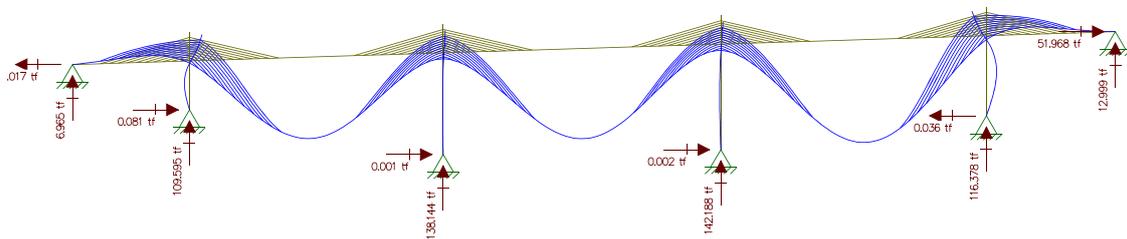


Figura 61 - Diagrama do deslocamento da Ponte Sunniberg, Suíça. Programa Ftool, Fonte: o autor.

Os projetos apresentados de pontes marcam a expressa eficiência técnica com requintes de esbeltes e transparência. Eles enfatizam a importância de compreender como os sistemas estruturais funcionam.

Um conceito que podemos observar como base sólida para a elaboração de um projeto de qualidade estética e estruturas simples, mas elegante, é o respeito aos requisitos funcionais dos pontos de vista técnicos, estéticos e econômicos.

Fornecendo desempenho técnico, guiados pelos princípios básicos da mecânica e das ciências naturais, esta abordagem continua a ser muito eficiente e útil, em particular nos dias de hoje, quando projetos de pontes muitas vezes baseadas em uma ideia metafórica têm produzido estruturas que são excessivamente caras de se construir e manter.

3.5.4 As tensoestruturas

As tensoestruturas ou coberturas atirantadas, fazem parte das estruturas atirantadas compostas de mastros metálicos, cabos de aço de alta resistência e membranas de cobertura constituídas de um material sintético para vedá-las (BORGES FILHO, 2006).

As tensoestruturas podem ser utilizadas para obras de caráter transitório (tendas, coberturas para grandes eventos, etc.) e grandes obras, tais como as coberturas de estádios esportivos e aeroportos.

A aplicação deste tipo de tecnologia requer um conhecimento aprofundado sobre sistemas atirantados, elementos estruturais de cabos e simulações computacionais para avaliar o comportamento físico das estruturas em questão.

O desempenho de uma tensoestrutura, para que seja satisfatório, deve garantir um esforço de tensão de tração constante na membrana de cobertura, mesmo em casos onde não haja carregamentos atuantes.

De acordo com Shaeffer et al (1996), o pioneiro das tensoestruturas foi o alemão Frei Otto.

Entre as obras mais conhecidas do Frei Otto é importante lembrar-se do *Deutscher Pavillion* (Pavilhão Alemão), construído para a Exposição Mundial de 1967 em Montreal e da cobertura do *Olimpiadächer* (Estádio Olímpico de futebol), para as Olimpíadas de 1972 em Munique na Alemanha (BORGES FILHO, 2006).



Figura 62 - Olimpiadächer, Munique, Alemanha. Fonte: www.archdaily.com.br.

As tensoestruturas, de acordo com Borges Filho (2006), podem ser divididas em cinco categorias:

- *Estruturas em membrana com apoios concentrados;*
- *Estruturas em membrana com apoios em arcos;*
- *Domos pneumáticos de perfil baixo;*
- *Domos de cabo ou cable domes;*
- *Estruturas conversíveis.*

As estruturas em membrana com apoios concentrados constam em um sistema feito de mastros e de cabos pré-tensionados para içar os apoios que servirão como estrutura da membrana.

O terminal aeroportuário *Haj de Jeddah*, em Riyadh, Arábia Saudita, construído em 1982, possui a maior cobertura atirantada (420.000 m²) por meio da tecnologia com apoios concentrados (BERGER, 1999).

Outra grande estrutura em membrana com apoios concentrados, edificada em 1985 é representada pelo *Estádio do Rei Fahd*, em Riyadh, Arábia Saudita. O projeto arquitetônico consta em uma área de 49.000 m² e representa a maior cobertura de estádio do mundo (BERGER, 1999).



Figura 63 - Terminal aeroportuário Haj de Jeddah, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.som.com.



Figura 64 - Estádio do Rei Fahd, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.tensinet.com.

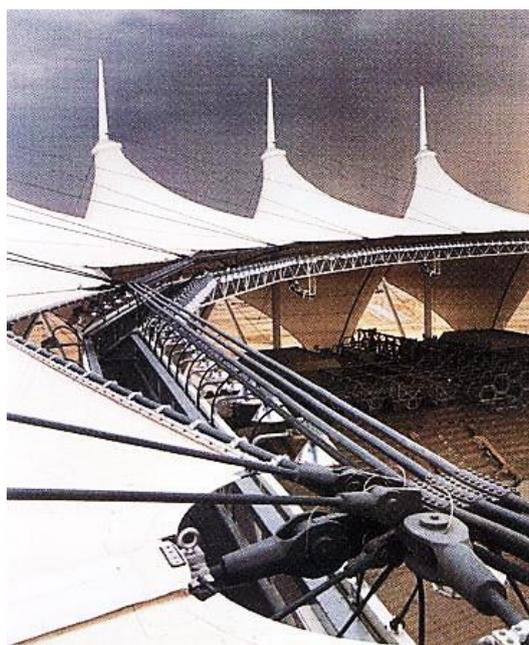


Figura 65 - Detalhe do sistema atirantado do Estádio do Rei Fahd, em Riyadh, Arábia Saudita. Fonte: www.tensinet.com.

O conhecimento da tecnologia das coberturas atirantadas, ao longo dessa pesquisa de mestrado, resultou fundamental para entender o desempenho estrutural exercido pelo bloco A do objeto de estudo, a Procuradoria Geral da Republica.

3.5.5 Estruturas atirantadas em Brasília

Como relata Roberto dos Santos (2008) na própria tese, entre os vários sistemas construtivos conhecidos e utilizados no Brasil, o sistema que emprega o concreto armado é, sem dúvida, o mais usado.

Este material apresenta custos-benefícios consideráveis do ponto de vista da mão de obra especializada de um dos poucos sistemas tecnológicos desenvolvidos no Brasil e “*é peça chave na estruturação do campo da arquitetura e da engenharia*” (SANTOS, 2008).

Além de uma questão econômica e prática, o uso do concreto armado é símbolo de uma arquitetura modernista internacional que influenciou profundamente as obras do Oscar Niemeyer.

Portanto, a capital brasileira, plasmada pelas mãos do mestre para ostentar as questões de pureza, plasticidade e brutalidade do concreto, apresenta poucas arquiteturas desenvolvidas por meio de tecnologias atirantadas. Essa ausência no panorama brasileiro é principalmente devida aos altos custos gerados por essa tecnologia. Os fatores que limitam esse tipo de técnica são:

- Alto custo e escassez de mão de obra especializada;
- Alto custo das práticas de protensão dos cabos de aço ou tirantes;
- Maior custo do material (cabos de aço);
- Menor conhecimento dessa tecnologia aplicada à arquitetura e ao dimensionamento dos elementos estruturais.

As construções atirantadas de Brasília representam uma mínima porção das arquiteturas presentes na capital federal. Foram individuadas três principais edificações que em parte ou globalmente, são constituídas por elementos atirantados e protendidos.

O primeiro edifício, realizado em 2007, é representado pela sede do Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA). Essa arquitetura é constituída por dois blocos, sendo o principal composto por uma “caixa” de quatro andares e o secundário contém toda a circulação vertical (escadas e elevadores).

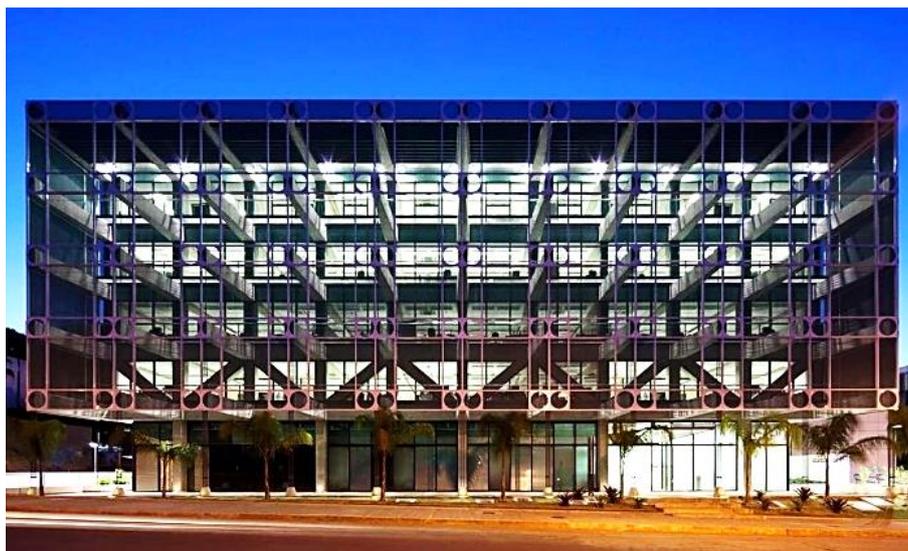


Figura 66 - Sede do Confea em Brasília. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.

O pavimento térreo abriga a entrada, saguão, recepção e o Plenário com seus respectivos ambientes de apoio. Os demais pavimentos (1º, 2º, 3º e 4º) são destinados para usos administrativos.

A estrutura principal mista (concreto e aço) consta em vigas metálicas apoiadas na estrutura de concreto, com balanços internos de 3,75m. O desequilíbrio causado pelo carregamento das extremidades internas dos balanços é compensado pelo “atirantamento” das extremidades externas dos balanços (de 4,00m). Os tirantes de todos os andares estão amarrados nas paredes laterais da fundação (Pedro Paulo de Melo Saraiva Arquitetos Associados).



Figura 67 - Vigas em balanço atirantadas. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.



Figura 68 - Vigas em balanço atirantadas. Fonte: PPMS Arquitetos Associados São Paulo.

O segundo edifício que integra soluções atirantadas à estrutura principal é representado pela sede do SEBRAE. Inaugurado em 2010, o conjunto arquitetônico é caracterizado por beleza e leveza estrutural. O programa de necessidade da sede do SEBRAE está diretamente ligado com a disposição dos ambientes localizados no nível térreo. No pavimento térreo inferior e superior são abrigadas as funções coletivas e as atividades que recebem um público externo.



Figura 69 - Edifício sede da SEBRAE. Fonte: www.techne.pini.com.br.

As funções administrativas e logísticas estão concentradas nos pavimentos superiores. Nos pavimentos inferiores está localizada a garagem e as atividades administrativas relacionadas a serviços e manutenção predial²⁷.

A estrutura utilizada na sede do SEBRAE é tipicamente mista. Para os dois pavimentos de escritórios foi utilizada uma estrutura em aço. As duas treliças longitudinais, enrijecidas por pórticos transversais estão apoiadas sobre pilares de concreto armado.

A ligação entre os dois blocos em cada nível, acontece através de duas passarelas de concreto vinculadas às vigas superiores por meio de cabos de aço.



Figura 70 - Passarelas atirantadas. Fonte: www.archdaily.com.br.

O terceiro projeto que constitui o arquivo das estruturas atirantadas em Brasília, é representado pelo objeto de estudo, a Procuradoria Geral da República.

Com certeza, o bloco A, é a maior edificação que utiliza a tecnologia do concreto protendido e de tirantes em aço, exercendo um papel extremamente importante que resulta na sustentação de todos os pavimentos. O sistema estrutural deste prédio consiste em um núcleo rígido de concreto armado de alto desempenho, coroado por uma estrela de oito pontas (de concreto protendido, sistema de oito vigas) pelas quais se departem tirantes de aço pré-tensionados. Todo o peso da edificação é transferido ao solo através do sistema núcleo rígido que descarrega as solicitações para as fundações.

²⁷ PORTAL VITRUVIUS. Sede do Sebrae Nacional em Brasília DF. *Projetos*, São Paulo, ano 11, n. 125.03, Vitruvius, maio 2011, <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/11.125/3884>;



Figura 71 - Conjunto da Procuradoria Geral da República. Fonte: <http://www.panoramio.com>. Credits: Rubens Craveiro.



Figura 72 - Vigas em concreto protendido e sistema de tirantes. Fonte: <http://www.panoramio.com>. Credits: Rubens Craveiro.

4. A PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA



Figura 73 - Vista vespertina da Procuradoria Geral da República. Fonte: Rubens Craveiro.

A arquitetura brasileira teve o seu ápice e seu grande destaque no cenário da construção internacional, apresentando novas soluções estéticas e construtivas através das obras de arquitetos modernistas como Oscar Niemeyer, João Filgueiras Lima (Lelé) e Lucio Costa.

A substituição de elementos estruturais lineares e estáticos por formas orgânicas e plásticas, onde o rumo principal era a imposição de formas curvas e sensuais, que conferiam às arquiteturas uma expressão inovadora, revelou novas metas na engenharia e demonstrou as qualidades plásticas potenciais do concreto.

Inaugurada em agosto de 2002, a sede da Procuradoria Geral da República é umas das obras que marca a recente retomada dos projetos de caráter monumental, idealizada por Oscar Niemeyer, para a capital federal brasileira. Além da surpreendente volumetria imponente, que se ergue no começo da via L4 sul em Brasília pelos seus traços arrojados, a Procuradoria se destaca pelo uso da tecnologia do concreto de alto desempenho (CAD, 50 MPa) pretendido que possibilitou a construção de uma estrutura mais leve, resistente e sem interferências visuais.

O inteiro conjunto da Procuradoria teve o projeto estrutural concebido pelo engenheiro brasileiro José Carlos Sússekind que acompanhava todas as obras de Oscar Niemeyer depois do falecimento do engenheiro Joaquim Cardozo.

4.1 O Complexo Arquitetônico

Com 71.873,73 m² de área construída, o conjunto arquitetônico da Procuradoria Geral da República se localiza no começo da via L4 Sul, próximo à Esplanada dos Ministérios, numa posição estratégica do Setor de Administração Federal Sul (SAFS), Quadra 4, Lote 3, Conjunto C.

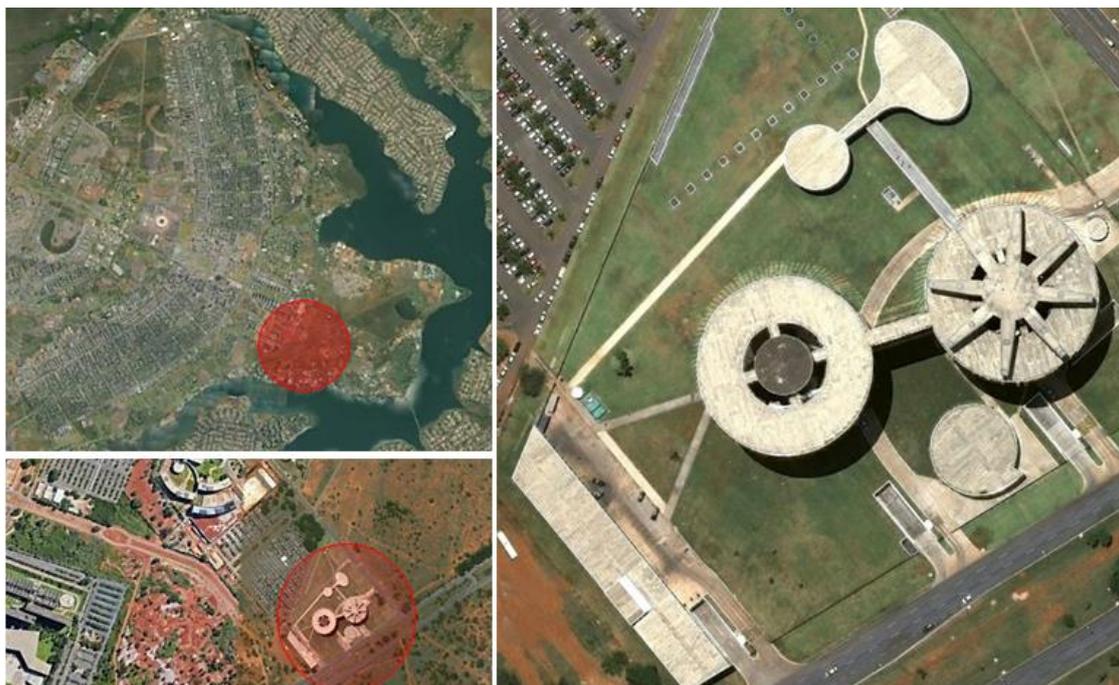


Figura 74 - Localização do Conjunto arquitetônico da Procuradoria Geral da República. Fonte: Google Earth.

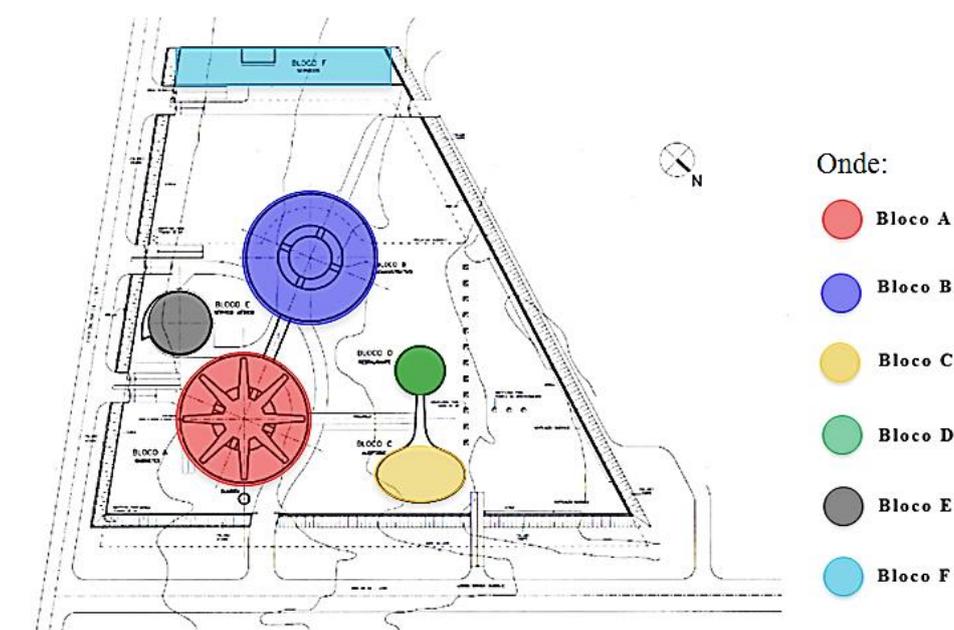


Figura 75 - Localização dos blocos da PGR. Fonte: Arquivo da PGR.

O conjunto arquitetônico da PGR é formado por cinco volumes de concreto armado, interligados entre eles através de passarelas de concreto e por uma edificação linear adicional (bloco F), sede da fiscalização de engenharia e arquitetura.

A figura 75 mostra a localização e a denominação dos seis prédios que formam a Procuradoria Geral da República, para que o leitor da dissertação saiba reconhecer a posição das diversas unidades.

Como relata Uchigasaki (2006) na própria dissertação, a ordem das letras conferidas aos blocos da Procuradoria mostra uma hierarquia não apenas em termos arquitetônicos, mas também funcionais. Não é a caso que o bloco principal, bloco A, esteja construído com uma tecnologia diferenciada (atirantada) e, além disso, contenha os gabinetes dos procuradores da República.

- *Bloco A:*

O *bloco A* abriga todos os gabinetes dos procuradores proporcionando uma vista, um conforto sensorial e uma posição privilegiados.



Figura 76 - Bloco A. Fonte: Rubens Craveiro.

O *bloco A*, caracterizado por ter uma volumetria cilíndrica e um aspecto monumental, é coroado por uma “estrela” de concreto protendido de oito pontas. A fachada única, envidraçada e composta por módulos, reflete o céu do Planalto Central Brasileiro, onde se encontra a capital brasileira, Brasília.

A edificação completa possui oito pavimentos, sendo o quinto e o oitavo interligados ao bloco B através de passarelas mistas (aço e concreto), como mostra a figura 77.



Figura 77 - Passarelas interligando o bloco A ao B.
Fonte: Lucio Lobo Junior.

A conexão inferior, no nível do mezanino, é garantida por uma passarela de concreto armado, sustentada por pilares de concreto devido ao comprimento do vão a ser vencido. A circulação vertical é viabilizada através do núcleo rígido central do bloco A que, além de conter elevadores e corpos de escadas, sustenta a carga do prédio inteiro.

A ausência de pilares e colunas convencionais suportando a edificação por baixo (figura 78), concebida por Oscar Niemeyer, confere ao prédio um visual totalmente inusitado, como se o prédio estivesse flutuando em cima do solo de Brasília.

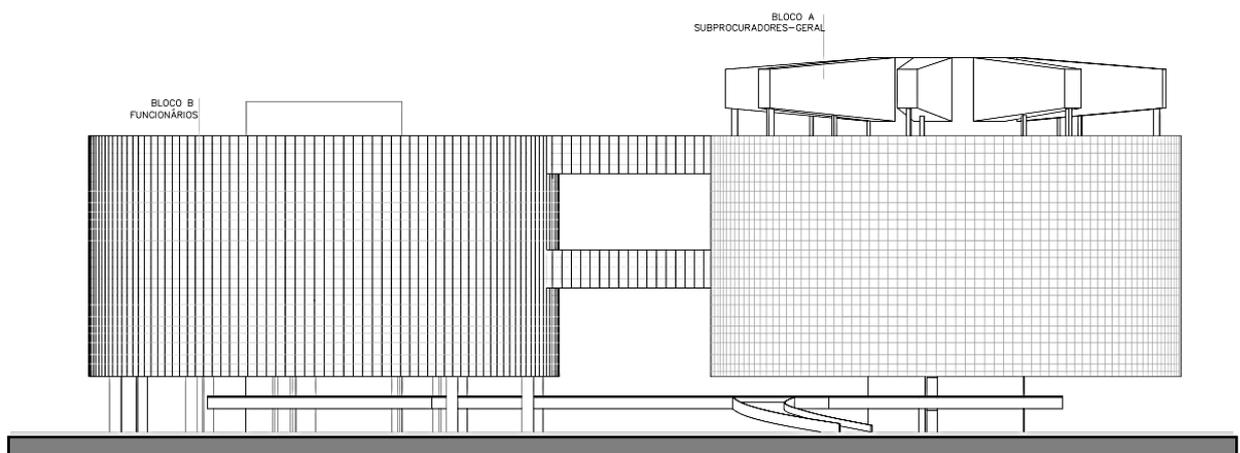


Figura 78 - Fachada dos blocos A ao B. Fonte: Arquivo da PGR.

- *Bloco B:*

O *bloco B*, que possui a mesma volumetria do A, consta em um cilindro de vidro, com diâmetro de 50 metros. Diferentemente do bloco A, o prédio B, chamado de “*Prédio Funcionários*” (UCHIGASAKI, 2006, p. 14), abriga a parte administrativa da Procuradoria Geral da República.

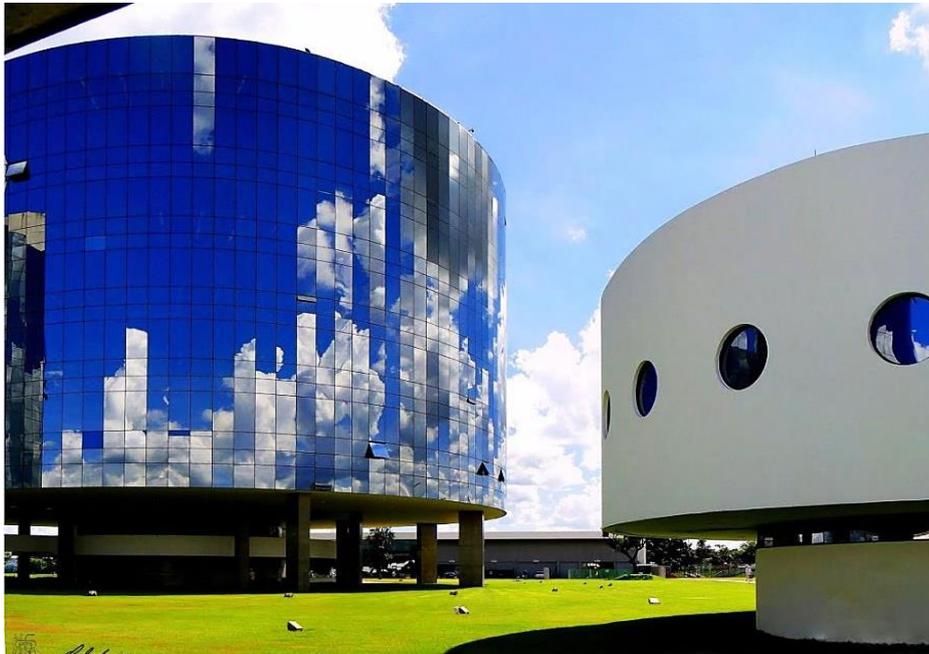


Figura 79 - Bloco B. Fonte: Rubens Craveiro.

Tendo a mesma área construída do A, o prédio funcionários é constituído por oito andares e a circulação vertical é contida dentro do núcleo rígido.

A única característica formal que o diferencia do bloco A, é representada pela falta das vigas estruturais coroando o topo do cilindro e pelo sistema estrutural convencional com pilares. A sustentação da edificação, portanto, é assegurada através de elementos verticais de concreto armado de alto desempenho (pilares) subindo do subsolo até o último pavimento do bloco B.

- *Bloco C:*

O *bloco C*, com uma área útil de 893,68 m² e dois pavimentos totais (térreo e andar superior), abriga o Auditório do conjunto da PGR.

O formato da planta do Auditório (figura 81), inusitado em relação aos outros prédios, é elíptico. A fachada “contínua” e totalmente diferente daquela das edificações principais do conjunto, não possui aberturas. Essa contraposição na solução arquitetônica marca a dicotomia estética e funcional que coexiste nas obras de Oscar.



Figura 80 - Bloco C, Auditório. Fonte: Robson Cesco.

O bloco C, interligado ao A por meio de uma passarela de concreto armado (figura 82), comunica-se com o bloco D através de um corredor/passarela.



Figura 81 - Passarela de concreto interligando o bloco C com o bloco A. Fonte: o autor.



Figura 82 - Fachada privada de aberturas, bloco C. Fonte: o autor.

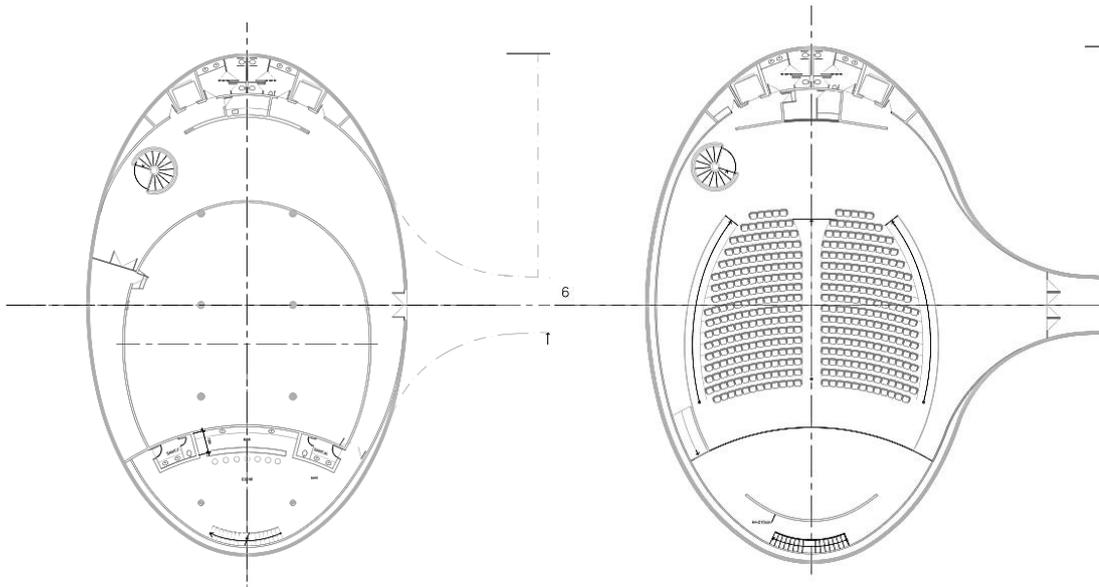


Figura 83 - Bloco C, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR.

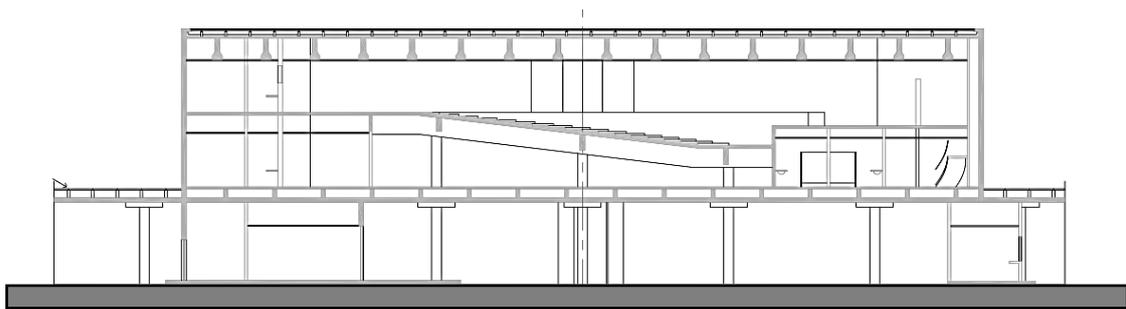


Figura 84 - Corte longitudinal do Auditório, bloco C. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 85 - Construção do Auditório, bloco C. Fonte: Arquivo da PGR.

- *Bloco D:*

O bloco D representa o restaurante da Procuradoria Geral da República. Unido ao Auditório por meio de uma passarela, o prédio possui planta circular e a iluminação natural é permitida graças a aberturas circulares contínuas ao longo da fachada. O Restaurante do bloco D possui dois pavimentos, um térreo e um superior que abriga a cozinha e o restaurante para os funcionários da PGR.



Figura 86 - Restaurante da PGR, bloco D. Fonte: o autor.



Figura 87 - Bloco D, em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 88 - Bloco D, em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.

A estrutura do bloco D, como para todos os outros prédios do conjunto da Procuradoria, a não ser o bloco A, é convencional com pilares, representada na figura 90, produzida em concreto armado de alto desempenho.

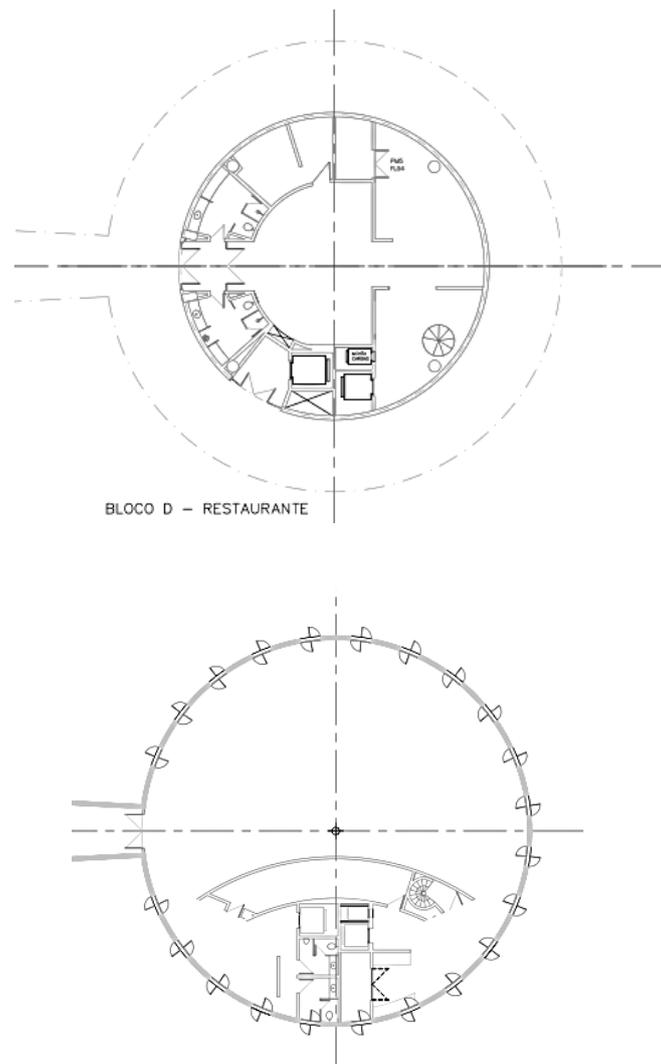


Figura 89 - Bloco D, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR.

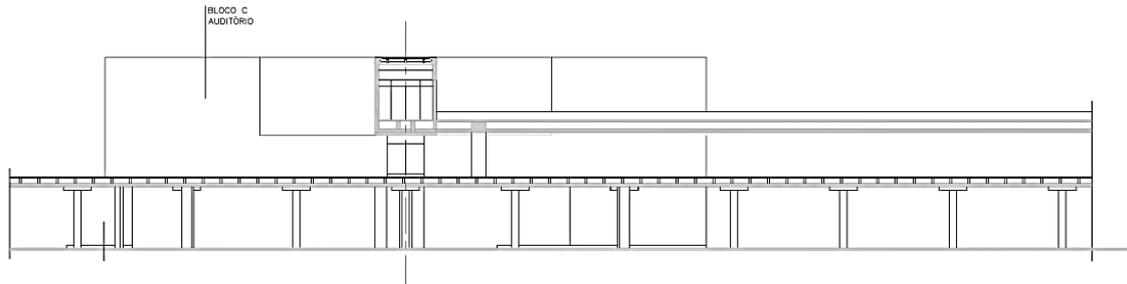


Figura 90 - Corte longitudinal do Restaurante, bloco D. Fonte: Arquivo da PGR.

- *Bloco E:*

O bloco E, de planta cilíndrica, abriga um centro médico reservado para os funcionários da Procuradoria Geral da República. Para essa edificação, Oscar Niemeyer optou por uma arquitetura de fachada espelhada, que remetesse aos prédios principais A e B. A planta do bloco E é circular, como mostra a figura 91.

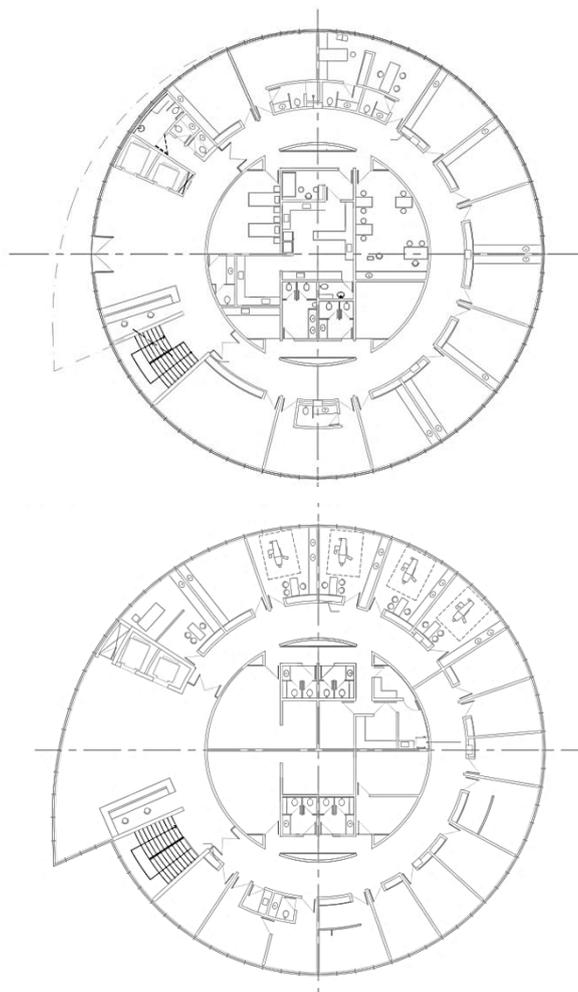


Figura 91 - Bloco E, Planta do térreo e do primeiro pavimento. Fonte: Arquivo da PGR.

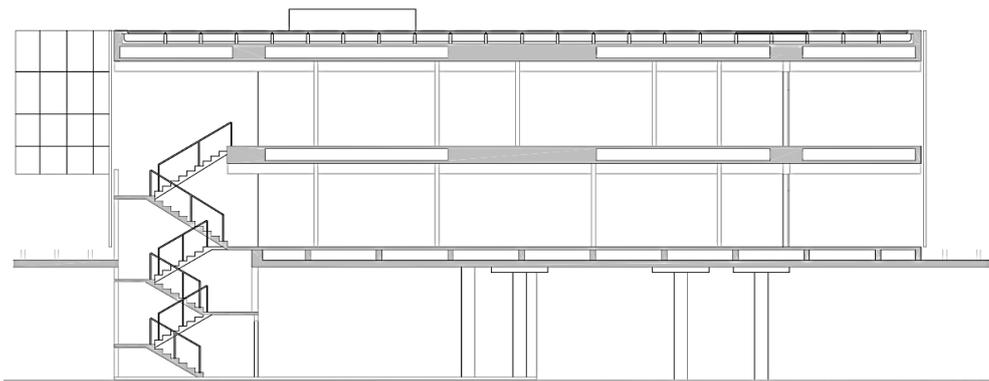


Figura 92 - Corte longitudinal do Centro Médico, bloco E. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 93 - Bloco E. Fonte: Rubens Craveiro.

O bloco E, que possui uma estrutura convencional de concreto protendido, tem dois pavimentos e é a única edificação a não ser ligada fisicamente (através de passarelas) com os outros blocos do conjunto.

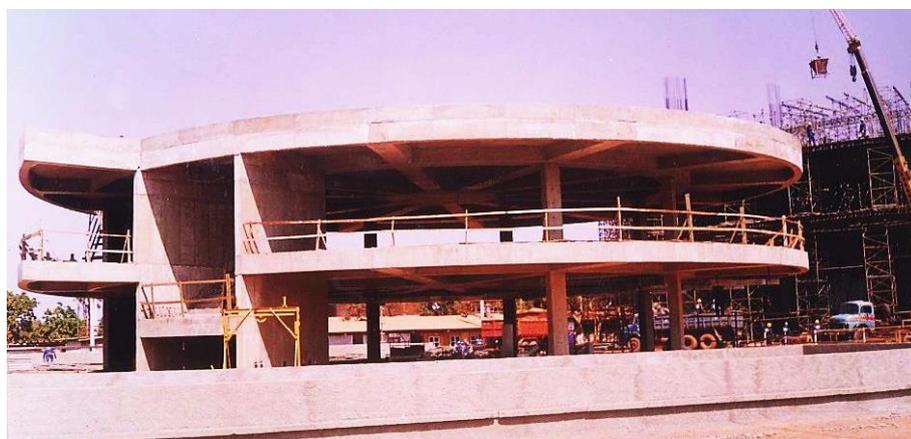


Figura 94 - Estrutura do Bloco E em fase de construção. Fonte: Arquivo da PGR.

- *Bloco F:*

Departamento e sede da fiscalização de engenharia e arquitetura, o bloco F foi o último prédio do conjunto da PGR a ser construído. A edificação possui três andares, planta trapezoidal linear (figura 95 e 96) e fachada envidraçada.

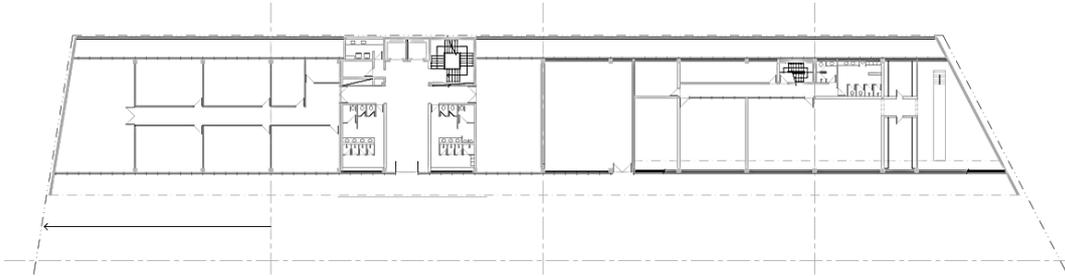


Figura 95 - Bloco F, Planta do térreo. Fonte: Arquivo da PGR.

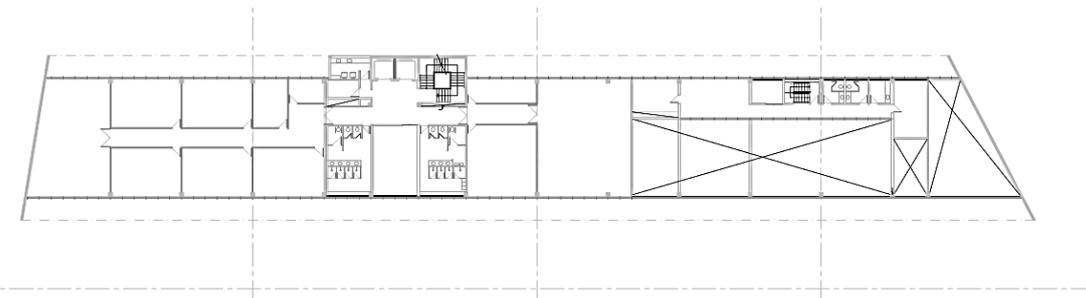


Figura 96 - Bloco F, Planta do primeiro andar. Fonte: Arquivo da PGR.

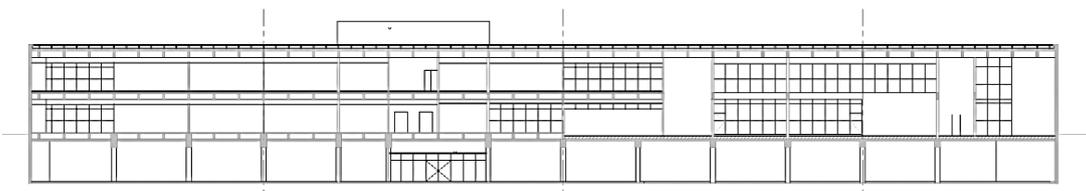


Figura 97 - Corte longitudinal do Centro Médico, bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.

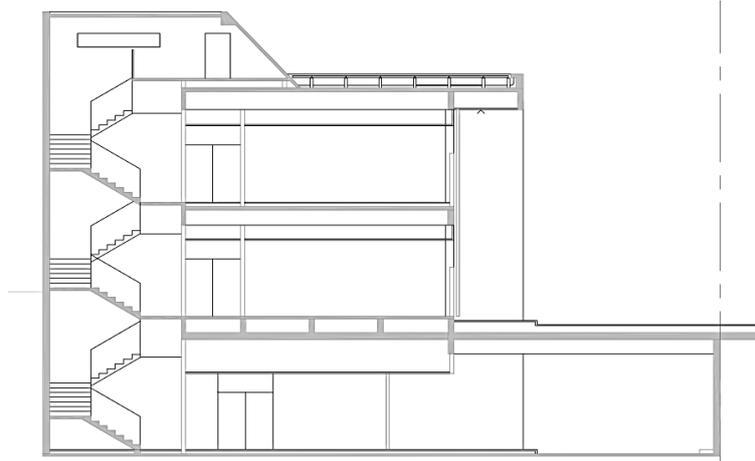


Figura 98 - Corte transversal do Centro Médico, bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 99 - Vista aérea do Bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.

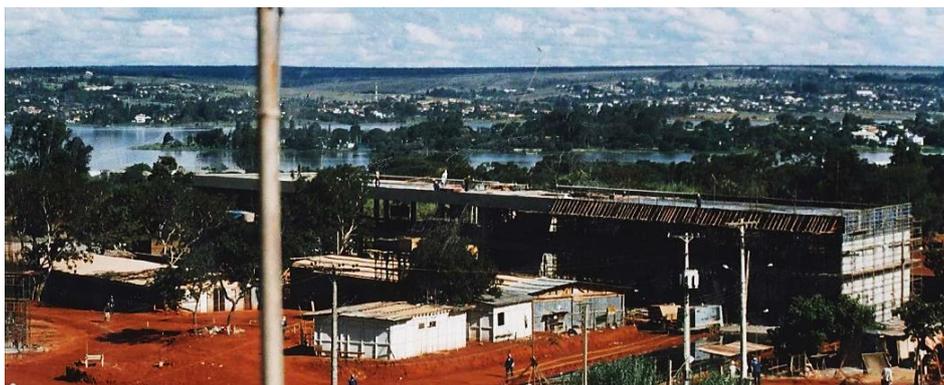


Figura 100 - Construção do Bloco F. Fonte: Arquivo da PGR.

4.2 A sustentação da forma: Arquitetura e Estrutura dos blocos A e B

“A arquitetura é sempre feita de tentativas. A gente tem um tema e fica pensando nas possibilidades econômicas e físicas de realizar a coisa, e começa a fazer os croquis. Quando o croqui agrada, examinamos se ele se adapta à técnica atual. Se a técnica pode acrescentar qualquer coisa, se é lógico, construtivo, e aí partimos para o desenho definitivo²⁸”.

(OSCAR NIEMEYER)

A arquitetura de Oscar Niemeyer determinou um grande avanço tecnológico no campo da engenharia, pois as suas obras são, do ponto de vista estrutural, sinônimo de audácia e ousadia, demonstrando resultados surpreendentes (MOREIRA, 2007).

Os dois volumes principais, que constituem a alma do conjunto da Procuradoria Geral da República, são um exemplo de como conceber o mesmo objeto arquitetônico de duas formas diferentes. Pela concepção arquitetônica arrojada, o conjunto demandou soluções de alta complexidade na área estrutural e nas instalações prediais. Caracterizados por dois sistemas estruturais e construtivos antitéticos, os cilindros envidraçados se integram ao Plano Piloto de Brasília, considerado pela Organização das Nações Unidas (ONU) como *Patrimônio Cultural da Humanidade*.



Figura 101 - Complexo da PGR. Fonte: o autor.

²⁸ Oscar Niemeyer, apud Wolf, 1987;

4.2.1 O bloco A

O *bloco A*, sem dúvidas, é um objeto arquitetônico que demandou soluções tecnológicas de alta complexidade na área estrutural e nas instalações prediais. Erguido sem pilares aparentes de sustentação, a edificação transmite ao observador uma sensação de leveza, como se o volume esteja flutuando.

Graças á ajuda do engenheiro responsável pelo departamento de Execução de Obras da PGR, *Frederico Scheidt Paulino*, que disponibilizou material técnico dos blocos do objeto de estudo, foi analisado o sistema estrutural do edifício A. Constando de um diâmetro de 60 metros e de uma altura de 48,3 metros, o volume do bloco A possui forma cilíndrica e fachada totalmente envidraçada. A tipologia de vidro utilizada para o acabamento externo é de tipo reflexivo, funcionando como “espelho” para remeter ao skyline do céu de Brasília.

O bloco A possui oito pavimentos. O térreo, constituído pela planta do núcleo rígido, e o mezanino, de planta reduzida, abrigam funções de circulação vertical e recepção para os gabinetes dos procuradores. As fotos 102 e 103 mostram as plantas de forma desses dois andares que são os únicos a não ser sustentados pelos tirantes estruturais.

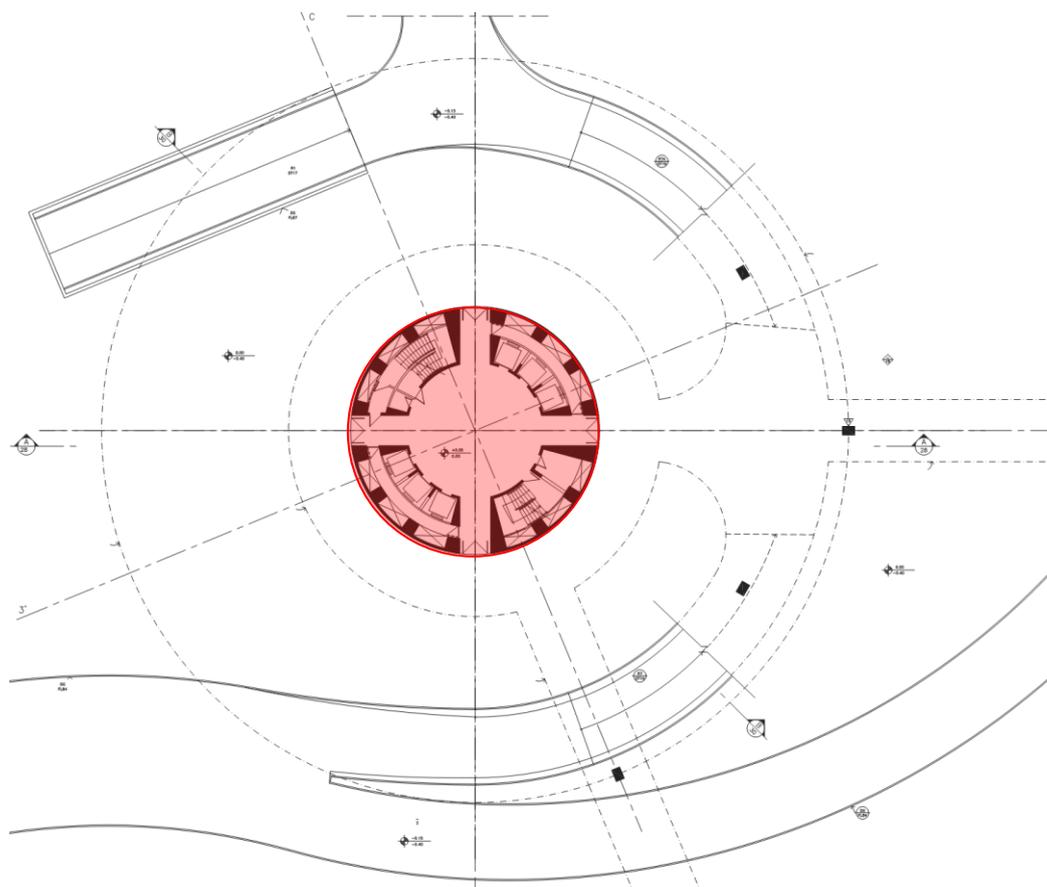


Figura 102 - Planta do térreo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

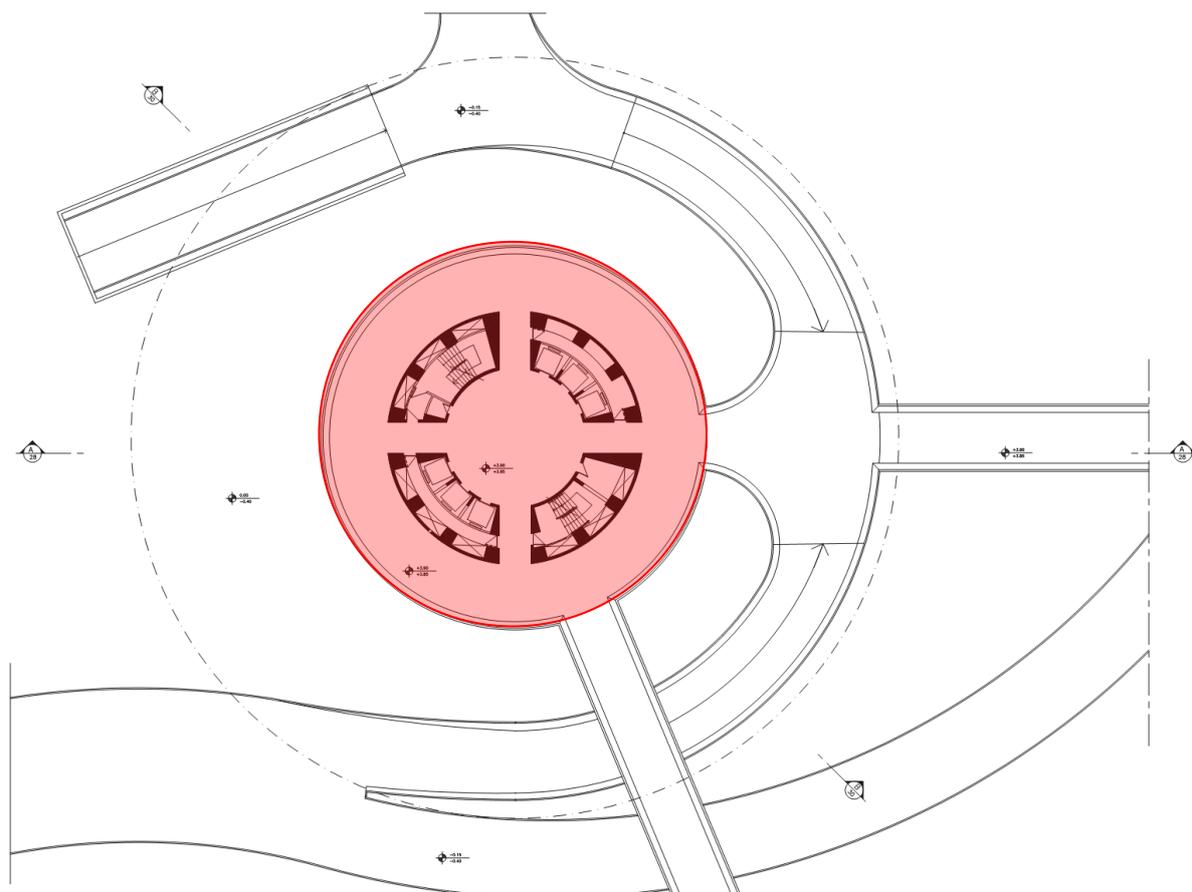


Figura 103 - Planta do mezanino, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

A planta do terceiro e sexto pavimento do bloco A (figura 104) se diferencia das plantas do pavimento tipo (figura 105) somente por causa das passarelas externas que permitem a ligação física com o bloco B.

O programa de necessidades prevê, além dos gabinetes, circulação vertical e áreas molhadas, como copas e banheiros, as salas das secretarias, assistência e assessoria.

O núcleo rígido comunica-se com os andares através de quatro passarelas internas (figuras 106) sustentadas por vigas de concreto armado.

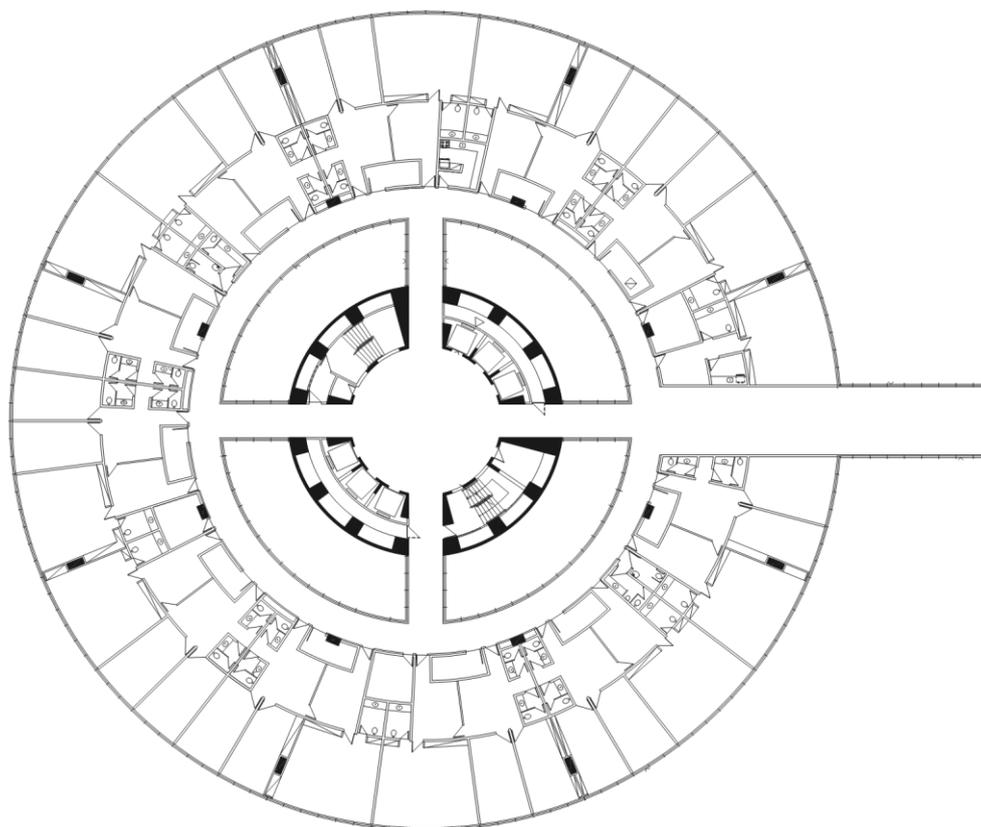


Figura 104 - Planta do 3º e 6º andares, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

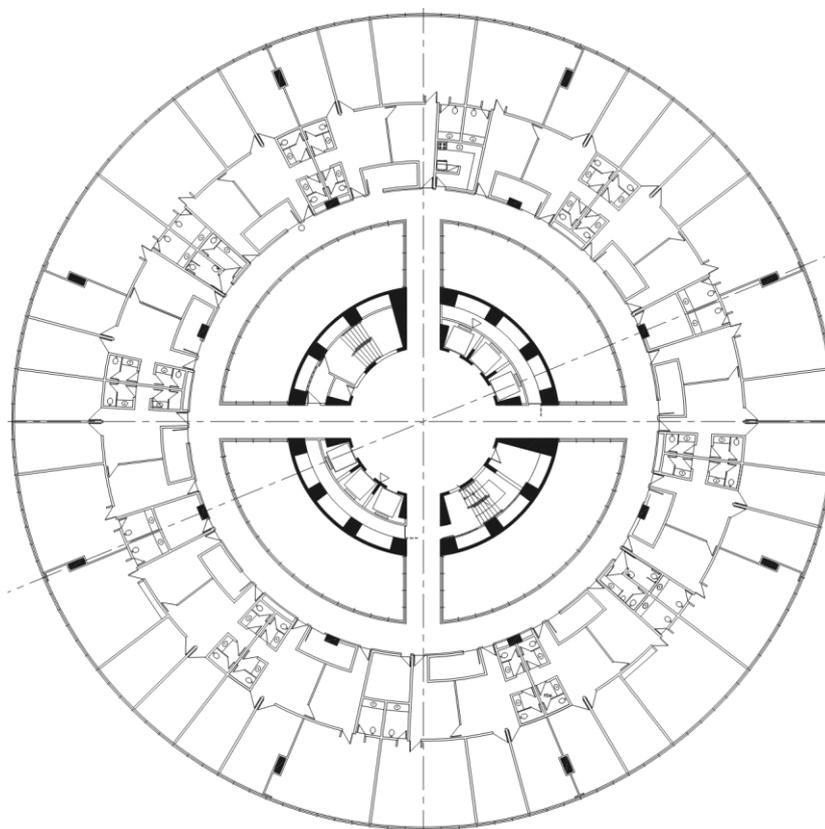


Figura 105 - Planta do pavimento tipo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

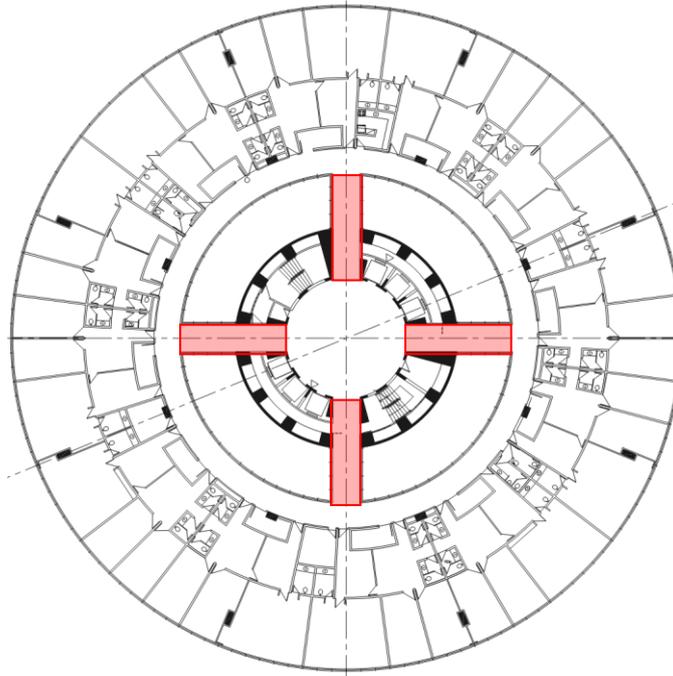


Figura 106 - Passarelas de acesso internas, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

O espaço entre núcleo rígido e andar é totalmente vazio, garantindo uma ventilação natural espontânea. As figuras 107 e 108 explicitam esse conceito que, de certa forma, representa um dos marcos desta arquitetura de Oscar Niemeyer.

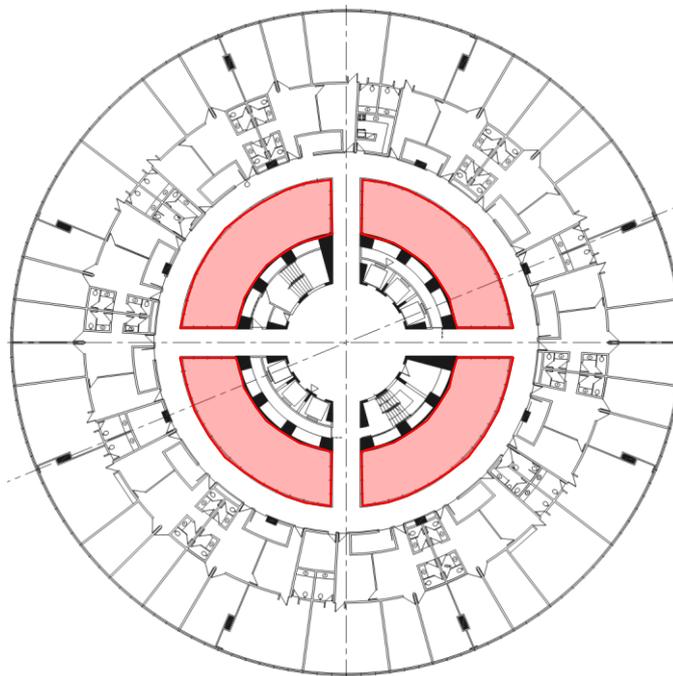


Figura 107 - Vazio interno entre núcleo rígido e andar, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 108 - Vazio interno entre núcleo rígido e andar, bloco A. Fonte: o autor.

A planta de cobertura, representada na figura 109, mostra as vigas protendidas estruturais no topo da edificação.

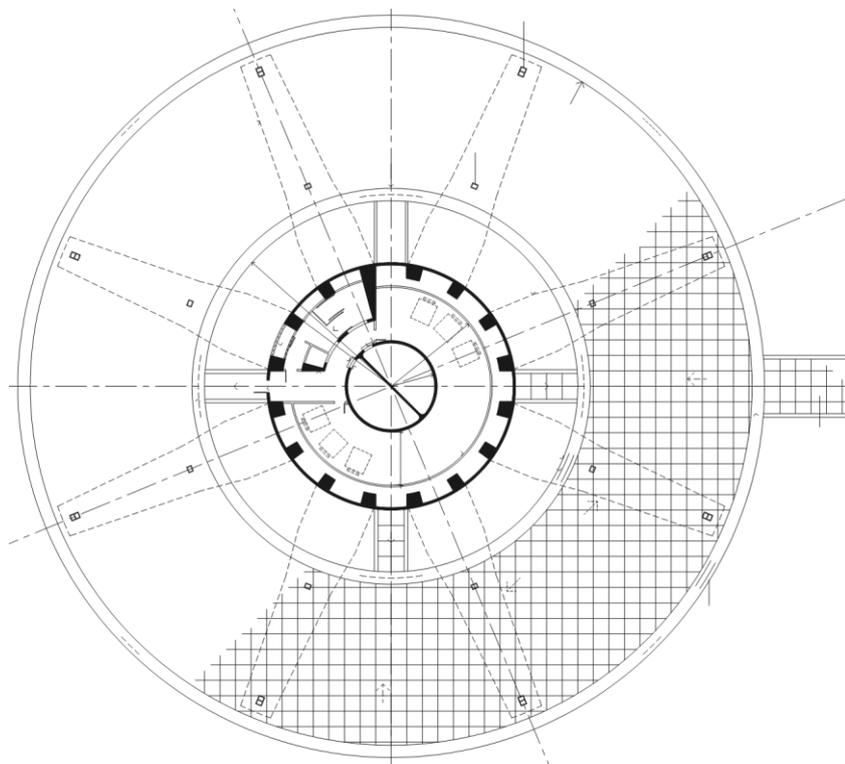


Figura 109 - Planta de cobertura, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

4.2.2 O sistema estrutural e construtivo do bloco A

O sistema construtivo predominante utilizado para a execução dessa edificação é o concreto protendido junto aos tirantes em aço.

As estruturas transmitem as cargas ao solo através das suas fundações. Para situações em que o terreno superficial apresenta características mecânicas adequadas de resistência, o sistema de fundação pode ser superficial (1/2 metros de profundidade), constituído por sapatas de concreto assentadas no terreno (SANTOS, 2008). Às vezes, quando o solo apresenta características geotécnicas diferentes daquelas descritas, é indicado utilizar estacas compridas até se atingir um terreno compatível. No caso do Bloco A, devido ao terreno argiloso, foram previstas estacas moldadas no local, de 42,00 metros de profundidade, para alcançar uma resistência lateral razoável.

A figura 110 mostra o esquema de execução de uma estaca moldada, a partir da escavação até o “*encamisamento*” da armadura metálica.

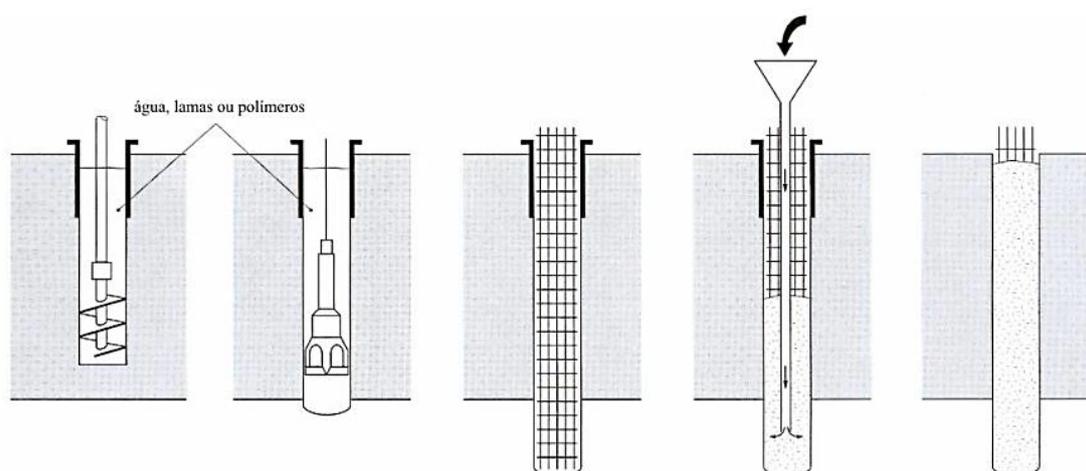


Figura 110 - Fases de execução das fundações, bloco A. Fonte: SANTOS, 2008, p.3.

O concreto que se utiliza para fundações, geralmente, não exige especificações severas e possui uma resistência característica média de 20 MPa.

Na Procuradoria Geral da República, as fundações foram executadas com um concreto de 35 MPa, tanto para o fuste quanto para a base das estacas, para aumentar a capacidade de carga.

Um desenho esquemático na figura 111 mostra a proporção das dimensões e das medidas de profundidade das estacas de fundação do bloco A.

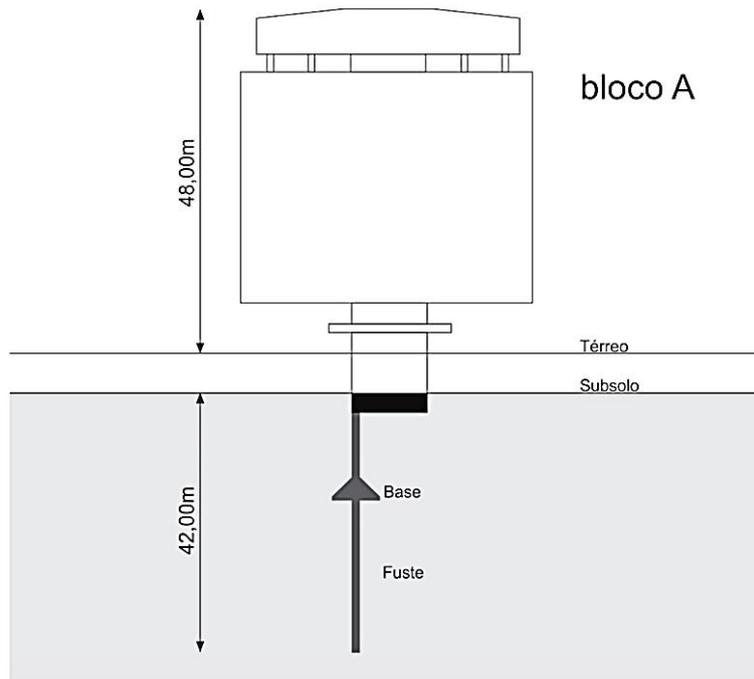


Figura 111 - Desenho esquemático de fundação, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

Por esse desenho podemos observar que as estacas de fundação do edifício descem aproximadamente 15 metros de profundidade para culminar em uma base de concreto. Além dessa cota há uma descida de 25,00 metros para alcançar um terreno de maior resistência.

As estacas de fundação utilizadas para o bloco A, de 1,0 metros de diâmetro, são 28 unidades e estão organizadas em dois grupos de anéis radiais de 14 estacas cada (figura 112).

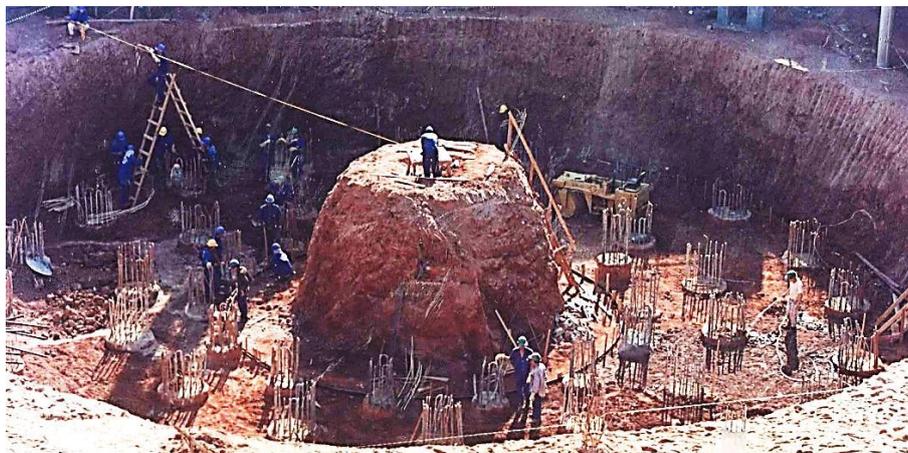


Figura 112 - Fundações em fase de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

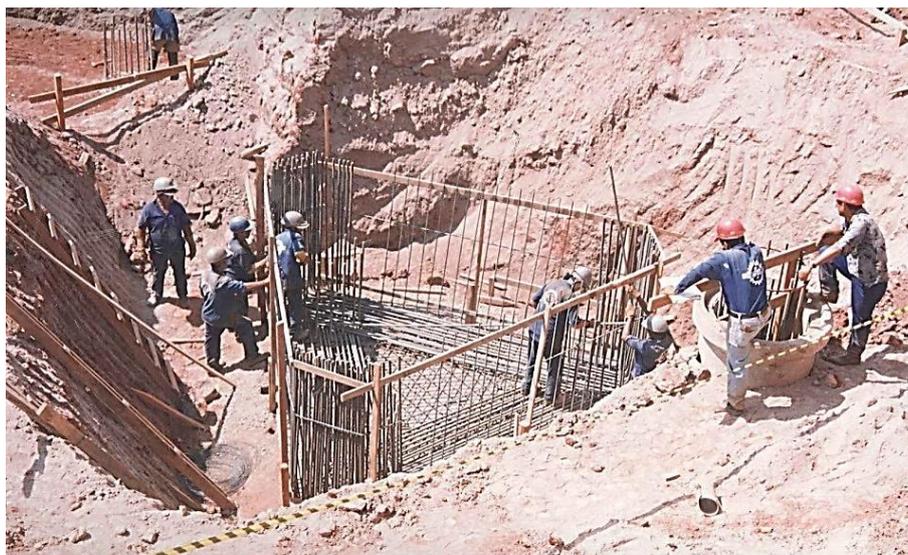


Figura 113 - Fundações em fase de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

A construção do bloco A foi permitida através de pilares provisórios, medindo 10,00 metros de altura (figura 114 e 115). Considerado o sistema estrutural atirantado, foram utilizados pilares metálicos para a concretagem da laje do primeiro pavimento, assim permitindo a sustentação provisória do edifício. Esses pilares permitiram que as partes da edificação fossem concretadas. Após a protensão dos tirantes de aço, os pilares metálicos provisionais foram retirados com extrema cautela para não comprometer o sistema estrutural global da edificação. Desta forma, Oscar Niemeyer conferiu ao prédio uma aparência de leveza que determinou o próprio rumo da concepção arquitetônica de projeto.



Figura 114 - Pilares provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 115 - Pilares provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 116 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 117 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 118 - Pilares provisórios no canteiro de obra, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 119 - Edificação em fase de construção, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 120 - Pilares provisórios de sustentação provisórios, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

Definido o sistema construtivo utilizado para as fundações e estrutura da Procuradoria Geral da República, esse subcapítulo continua a descrição da obra fazendo uma abordagem do sistema estrutural adotado na edificação A.

José Carlos Süssekind foi o engenheiro responsável pelo projeto estrutural do complexo arquitetônico da PGR, conforme dito anteriormente.



Figura 121 - Süssekind e Oscar Niemeyer na obra do Sambódromo, Rio de Janeiro.
Fonte: www.blogdopetcivil.com.

A sustentação dessa edificação é garantida por uma estrutura de concreto protendido em forma de estrela de oito pontas no topo do prédio. Pela estrela saem tirantes de aço que sustentam os pavimentos do prédio. Todo o peso do edifício é transferido ao núcleo rígido central, que o descarrega para as fundações.

A estrela de concreto é, de fato, um conjunto estrutural formado por vigas de seção variável com formato trapezoidal, como mostra a figura 122.

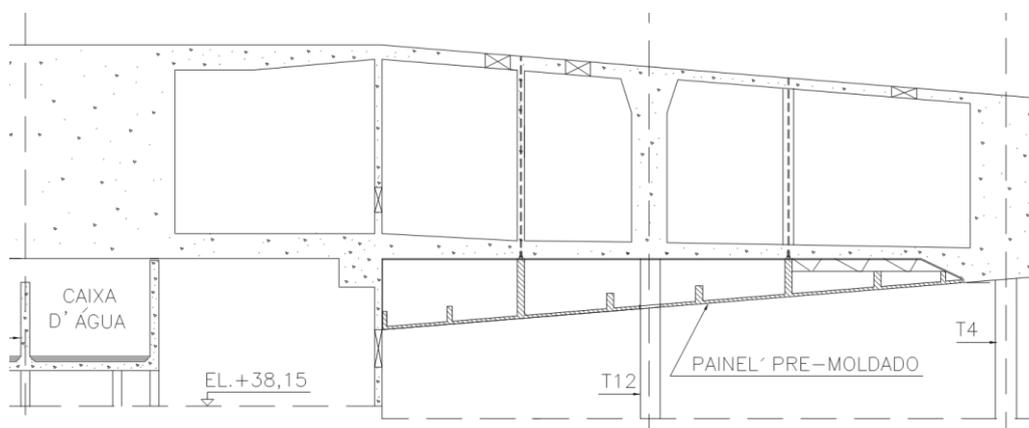


Figura 122 - Detalhe em corte de uma pétala da estrela estrutural. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 123 - Vista das vigas estruturais de cobertura. Fonte: o autor.

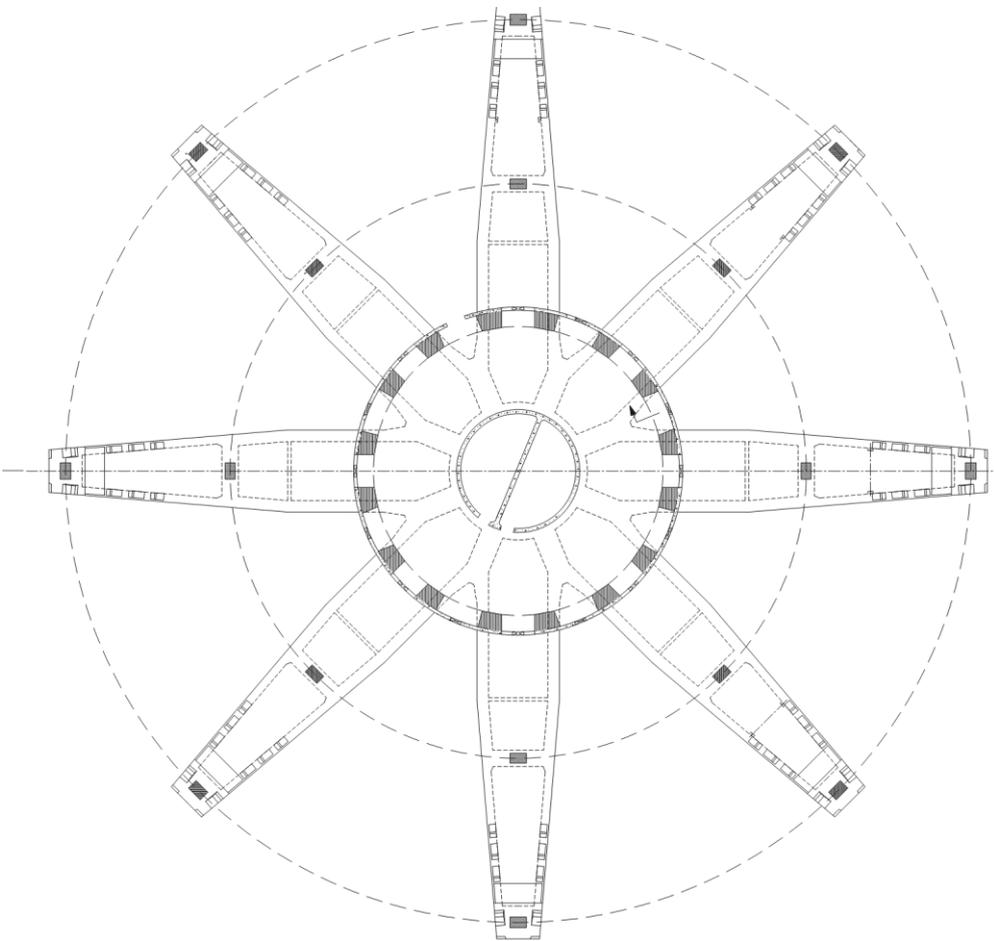


Figura 124 - Planta estrutural da estrela. Fonte: Arquivo da PGR.

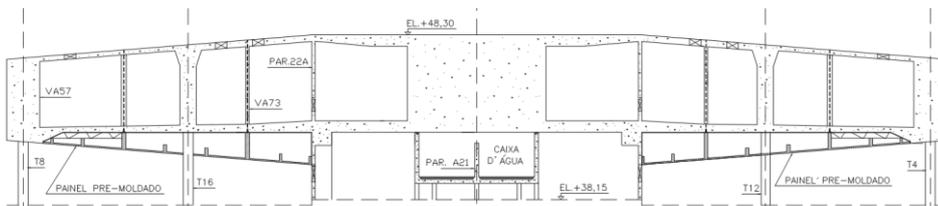


Figura 125 - Corte AA da estrela estrutural. Fonte: Arquivo da PGR.

O concreto utilizado para todos os elementos estruturais tem as seguintes Resistências Características:

- *Vigas*, $f_{ck} \geq 50$ MPa;
- *Lajes*, $f_{ck} \geq 35$ MPa;
- *Paredes*, $f_{ck} \geq 35$ MPa;
- *Caixas d'água*, $f_{ck} \geq 35$ MPa;

O cálculo das vigas estruturais da estrela de oito pontas foi feito em nove diferentes versões por Süssekind, até se poder alcançar a melhor forma construtiva possível. A ferragem da metade inferior das vigas já sustentava o peso próprio da estrutura de concreto. Além disso, o peso dos elementos superiores para aliviar o escoramento (que resultava muito caro).

Primeiramente foi concretada a base da estrela, em seguida as vigas constituintes a estrutura e as partes da estrela, determinando-se uma operação de construção altamente complexa.

Os tirantes protendidos, que se originam nas oito pontas da estrela, estão colocados dentro de bainhas de 100 milímetros de diâmetro, as quais contêm sete cabos de protensão (de 16 milímetros cada). Essas bainhas (com injeção de vaselina para proteger os cabos entre eles) são tubos metálicos (figuras 126 e 127).



Figura 126 - Tirantes constituintes o sistema estrutural principal do prédio. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 127 – Cordoalhas de aço constituintes de um cabo de tirante. Fonte: Arquivo da PGR.

Portanto, cada tirante é composto por sete cabos de aço e, por sua vez, quatorze tirantes formam a coluna protendida, chamada nesta dissertação de conjunto de tirantes internos ou externos.

Dois conjuntos de tirantes (oito internos e oito externos), um interno de 100x50 centímetros (composto por 14 tirantes) e um externo de 125x55 centímetros (composto por 14 tirantes), são os responsáveis para sustentação dos seis pavimentos que abrigam os gabinetes dos procuradores. Os outros andares inferiores, representados pelo mezanino e pelo térreo, são de menor tamanho e não participam do sistema estrutural atirantado.

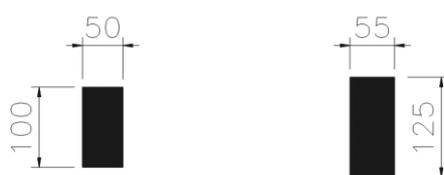


Figura 128 - Seções dos tirantes interno (100x50 cm) e externo (125x55 cm). Fonte: o autor.

As “*colunas protendidas*” de concreto que contornam os tirantes de aço são consideradas como verdadeiros espaçadores de todos os andares e são colocadas entre as várias lajes. Portanto, os tirantes verticais que suportam os pavimentos, foram protendidos através de macacos hidráulicos, como mostra a figura 129.



Figura 129 - Protensão dos tirantes, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

Por sua vez, o conjunto de vigas se apoia no núcleo rígido (figura 130) da edificação contendo toda a circulação vertical (seis elevadores e duas escadas).

Observando os cortes AA¹ e BB² das figuras 131 e 132, apresenta-se como o núcleo rígido central em concreto armado de alto desempenho sustenta a estrutura em formato de estrela, na qual estão “pendurados” os pavimentos do prédio.

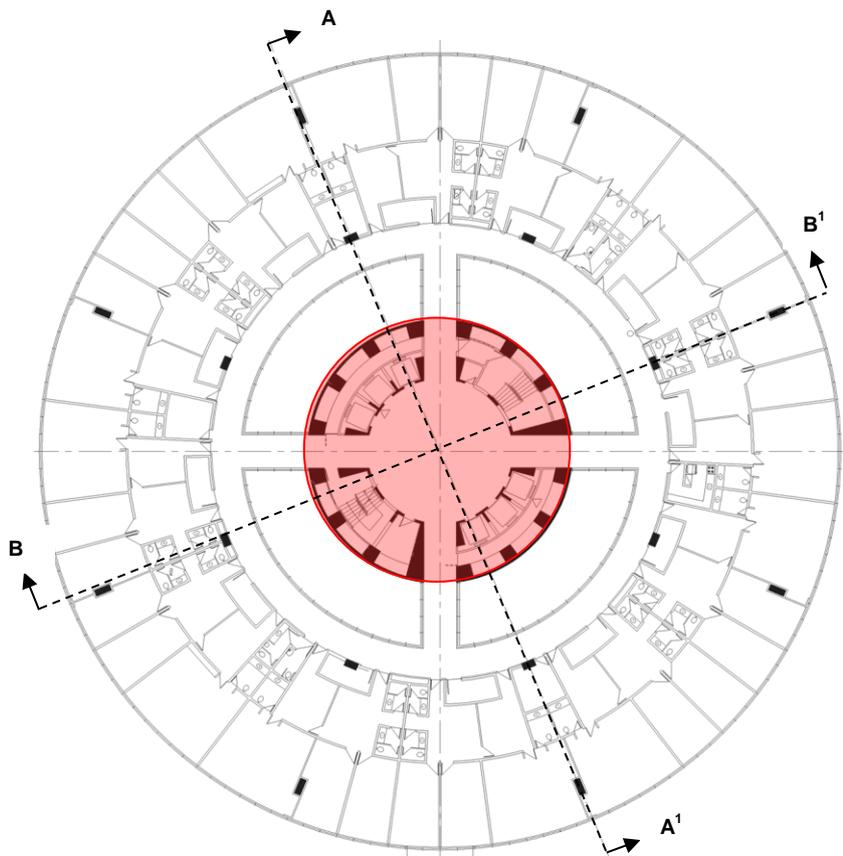


Figura 130 - Núcleo rígido contendo a circulação vertical. Fonte: Arquivo da PGR.

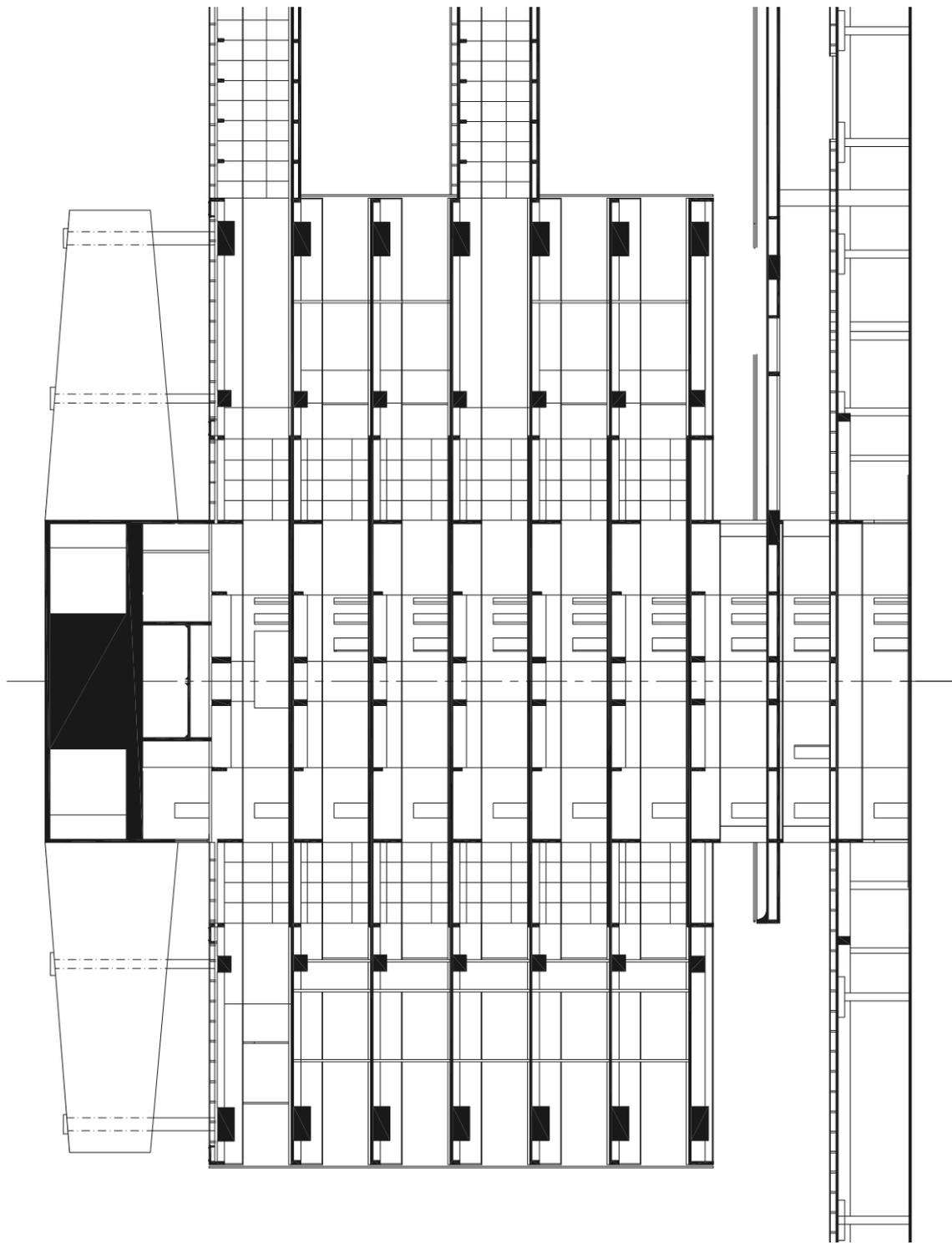


Figura 131 - Corte AA¹, bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR.

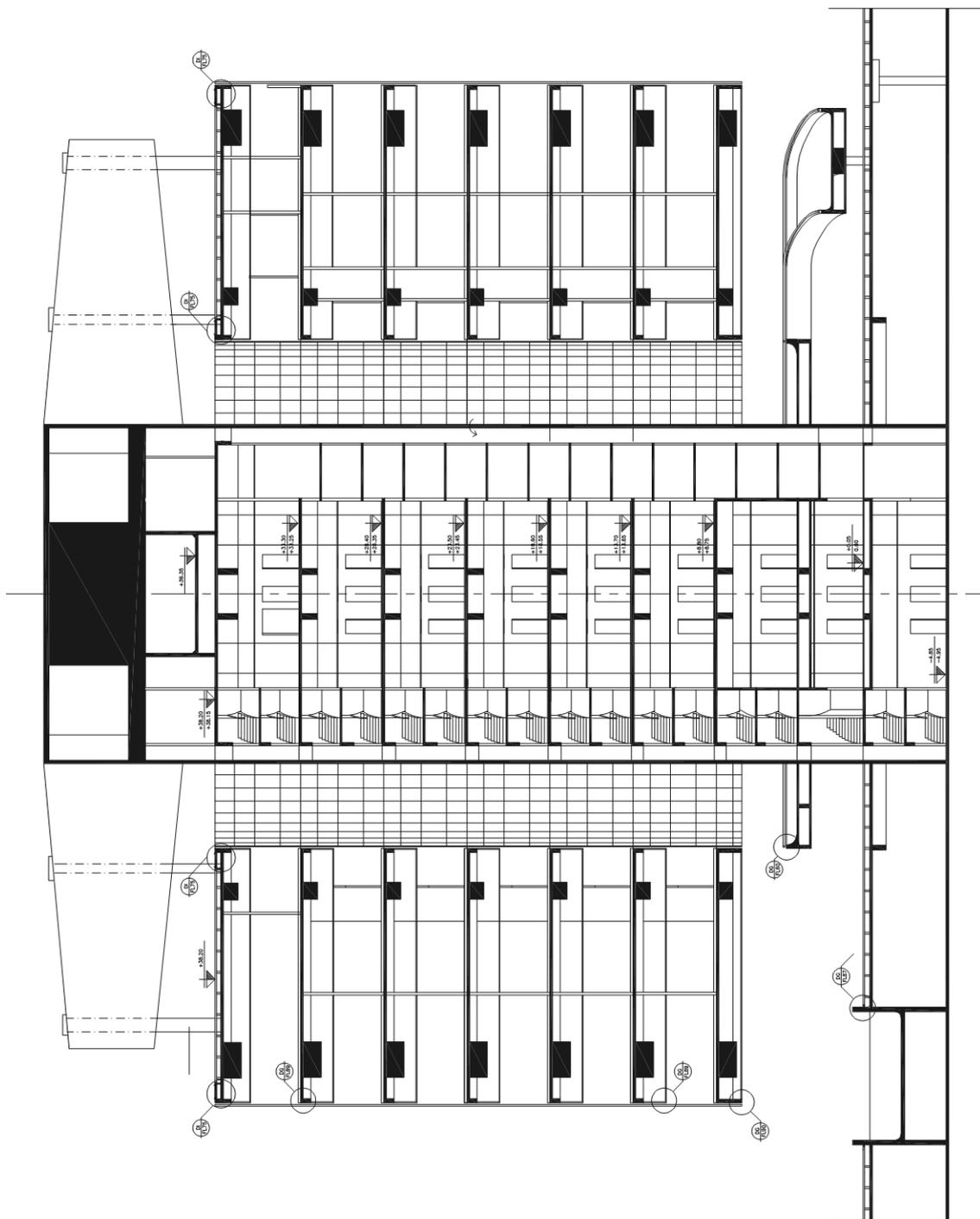


Figura 132 - Corte BB¹, bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR.

4.2.3 Análise do sistema estrutural do bloco A

Para executar a análise estrutural qualitativa do bloco A da Procuradoria Geral da República, foram utilizados os arquivos de plantas, cortes e detalhes estruturais para obter as dimensões de todos os elementos participantes do sistema estrutural, fornecidos pelo Departamento de Engenharia da PGR. Portanto, a partir das plantas estruturais da figura 133 foram extraídas as medidas referentes às seções de tirantes, pilares, vigas, paredes e lajes.

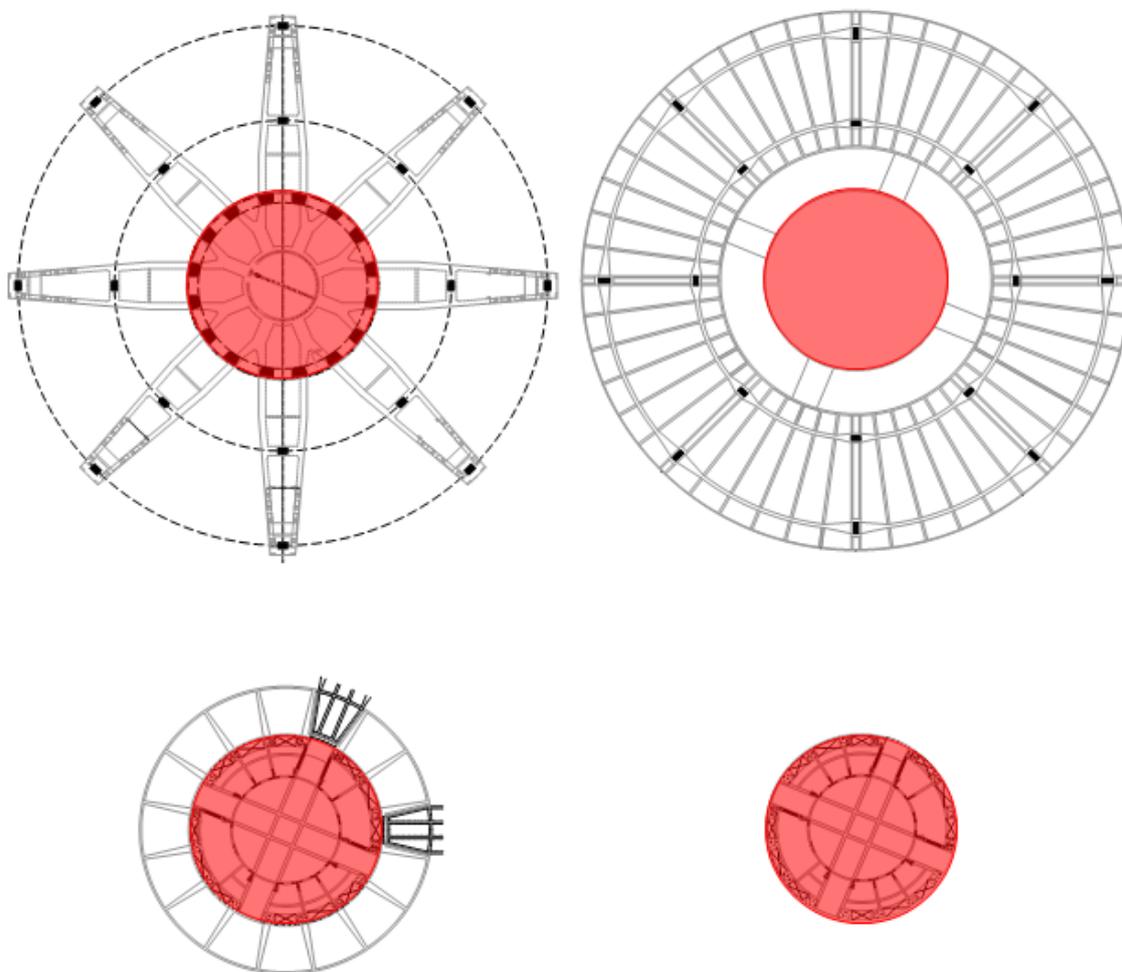


Figura 133 - Planta estrutural das vigas de cobertura, Pavimento tipo, Mezanino e núcleo rígido, bloco A, PGR. Fonte: Arquivo da PGR, desenho do autor.

As tabelas 3, 4, 5 e 6, juntamente às perspectivas das figuras 134, 135, 136 e 137, mostram todos os elementos estruturais que compõem as vigas principais de cobertura (*“estrela estrutural”*), Pavimento tipo, Núcleo rígido e mezanino.

Elemento Estrutural - Estrela	A (m)	B (m)	Cor
1. Tirantes externos	1,25	0,55	Grey
2. Tirantes internos	1,00	0,50	Green
3. Vigas laterais 1, seção variável 5,00~5,40	5,00/5,40	0,50/0,50	Yellow
4. Vigas laterais 2, seção variável 5,40~5,68	5,40/5,68	0,50/0,50	Blue
5. Vigas laterais 3, seção variável 5,68~6,00	5,68/6,00	0,50/0,50	Cyan
6. Vigas laterais 4	0,70	6,00	Magenta
7. Vigas laterais 5	0,88	6,00	White
8. Vigas laterais 6	1,4	6,00	Blue
9. Vigas laterais 7	0,25	6,00	Magenta
10. Vigas transversais 1	2,00	5,00	Magenta
11. Vigas transversais 2	1,00	5,40	White
12. Vigas transversais 3	0,20	5,68	Blue
13. Vigas transversais 4	0,20	6,00	Cyan
14. Vigas transversais 5	0,25	6,00	Purple
15. Pilares inferiores	1,40	1,00	Grey

Tabela 3 - Dimensões dos elementos estruturais da estrela do bloco A para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

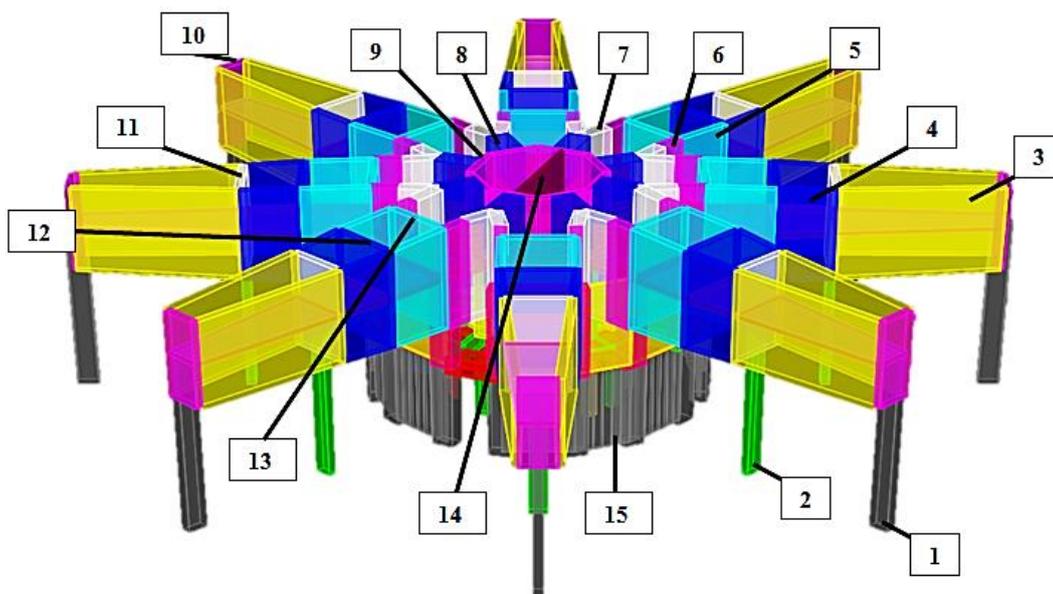


Figura 134 - Perspectiva das vigas estruturais de cobertura, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Elemento Estrutural – Pavimento Tipo	A (m)	B (m)	Cor
16. Viga perimetral anel externo	0,15	0,60	
17. Viga radial externa (8x)	0,30	1,20	
18. Viga radial externa (40x)	0,15	0,60	
19. Viga perimetral variável (junção T ext.) 0,40~1,25	0,40/1,25	1,60/1,60	
20. Viga perimetral junção T ext.	0,40	1,60	
21. Viga radial média (8x)	0,30	2,00	
22. Viga radial média (40x)	0,15	1,00	
23. Viga perimetral variável (junção T int.) 0,40~1,20	0,40/1,20	1,00/1,00	
24. Viga perimetral junção T int.	0,40	1,00	
25. Viga radial interna (8x)	0,30	1,20	
26. Viga radial interna (40x)	0,15	0,60	
27. Viga perimetral anel interno	0,20	0,70	
28. Viga passarela	0,30	0,70	
29. Tirantes externos	1,25	0,55	
30. Tirantes internos	1,00	0,50	

Tabela 4 - Dimensões dos elementos estruturais do pavimento tipo do bloco A para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

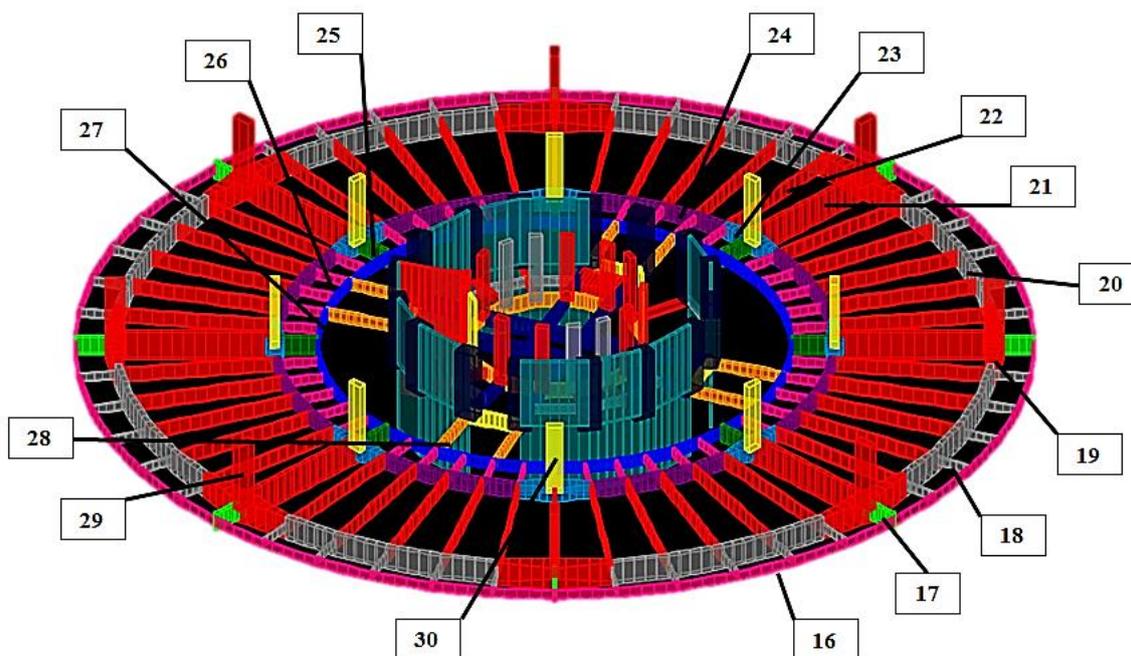


Figura 135 - Perspectiva do pavimento tipo, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Elemento Estrutural – Núcleo Rígido	A (m)	B (m)	Cor
31. Viga radial	0,20	0,60	Red
32. Viga circular externa	0,20	0,60	Grey
33. Viga circular interna	0,15	1,00	Orange
34. Viga circular externa	1,85	1,00	Red
35. Viga circular abertura	0,20	1,00	Yellow
36. Viga principal	0,30	1,00	Dark Blue
37. Pilar principal	1,40	1,00	Dark Blue
38. Pilar em L	0,80	0,45	Red
39. Pilar interno, formato retangular	1,10	0,15	
40. Pilar em T	0,80	0,40	Grey
41. Parede núcleo rígido externa	4,85	0,20	Teal
42. Parede núcleo rígido interna	4,85	0,20	Red

Tabela 5 - Dimensões dos elementos estruturais do núcleo rígido do bloco A para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

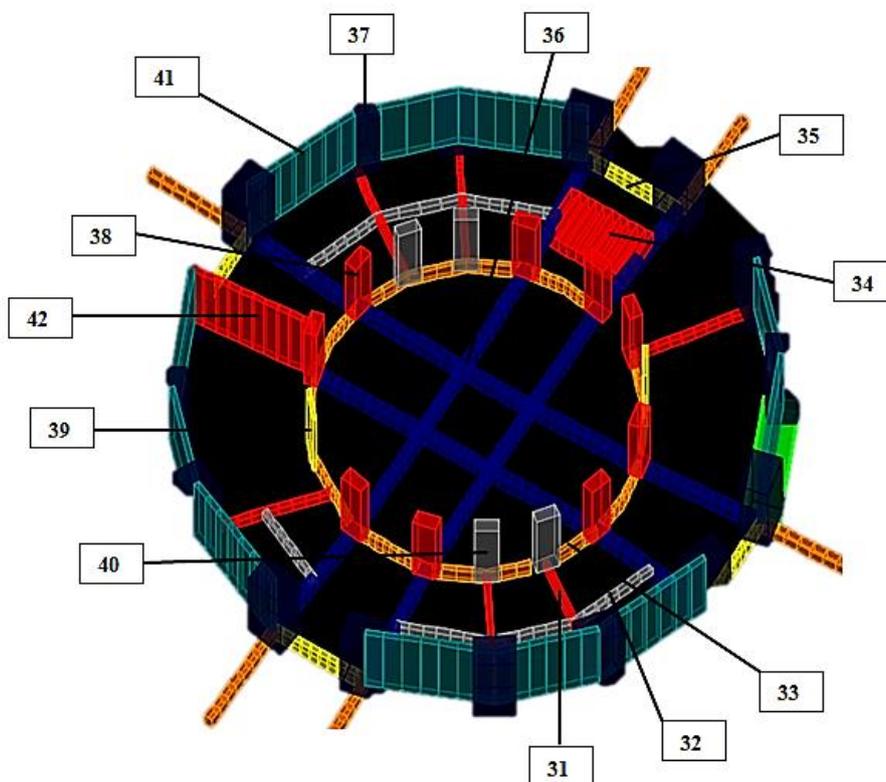


Figura 136 - Perspectiva do núcleo rígido, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Elemento Estrutural – Mezanino	A (m)	B (m)	Cor
43. Viga perimetral anel externo	0,20	1,00	Blue
44. Viga radial variável 30~70	0,30/0,70	1,00	Purple
45. Viga perimetral externa	0,20	1,00	Blue
46. Viga perimetral interna	0,20	0,60	Grey
47. Viga perimetral anel interno	0,15	1,00	Yellow
48. Viga central	0,30	1,00	Red
49. Pilar principal	1,40	1,00	Red
50. Pilar em L	0,80	0,45	Yellow
51. Pilar interno, formato retangular	1,10	0,15	Grey
52. Pilar em T	0,80	0,40	Green
53. Parede externa	4,70	0,20	Green
54. Parede interna	4,70	0,20	Red

Tabela 6 - Dimensões dos elementos estruturais do mezanino do bloco A para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

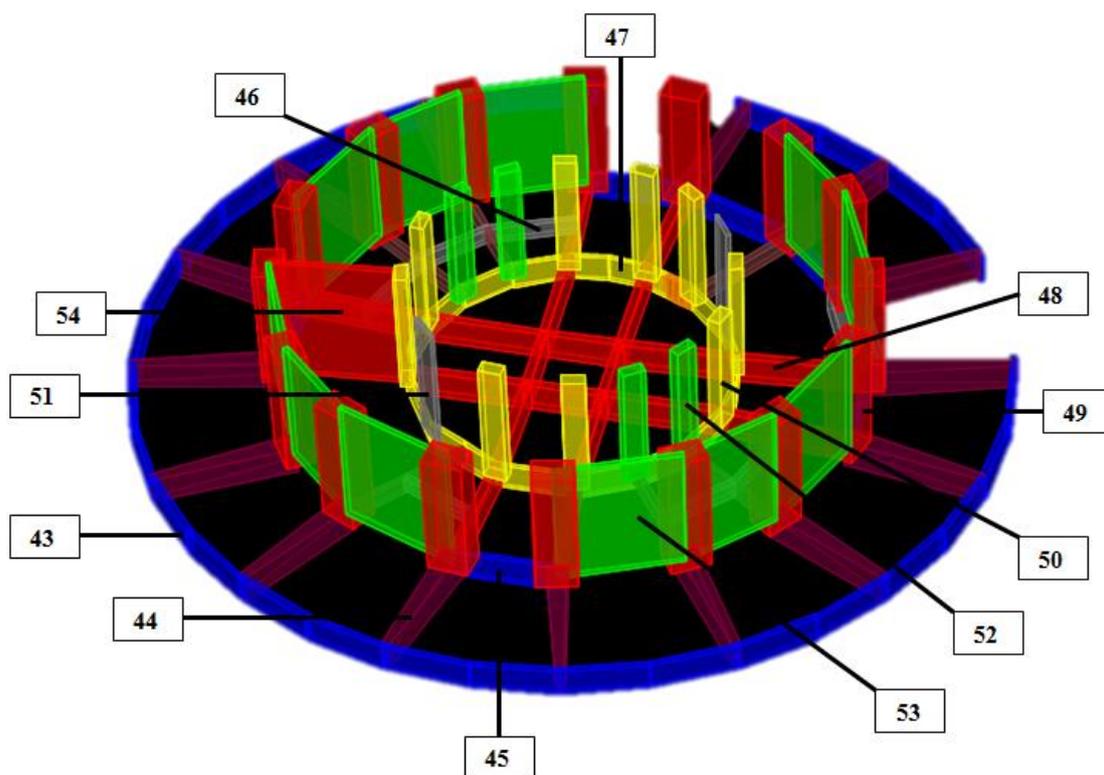


Figura 137 - Perspectiva do mezanino, bloco A, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

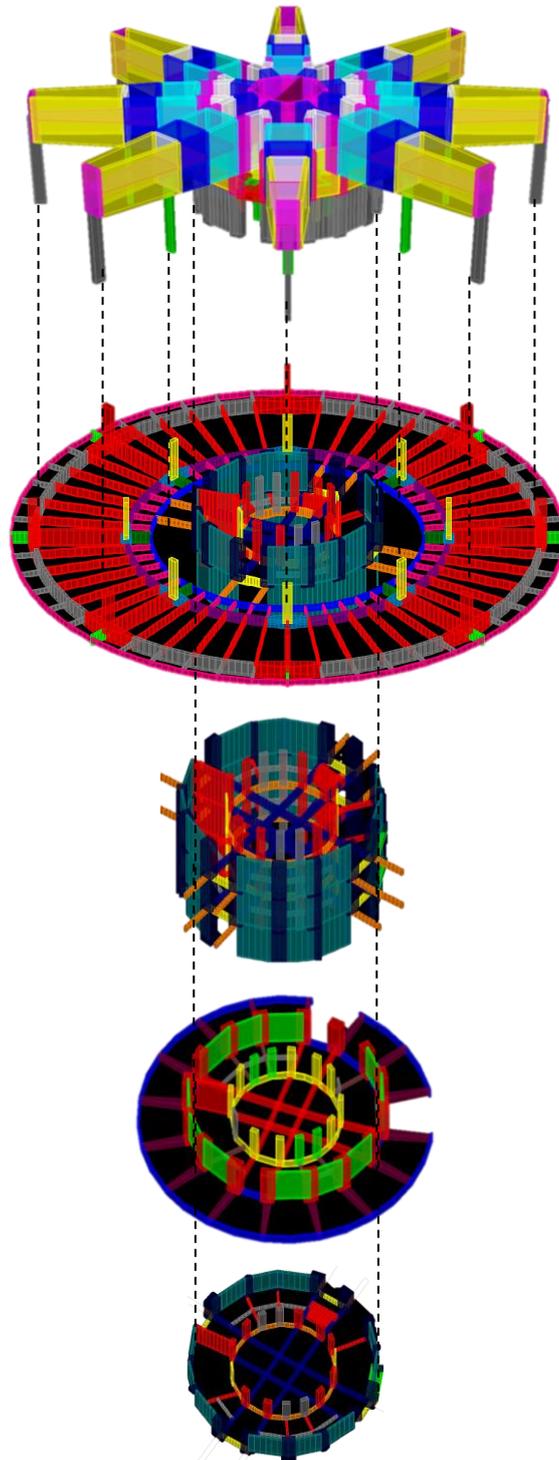


Figura 138 – Montagem tridimensional da estrutura do bloco A em perspectiva, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

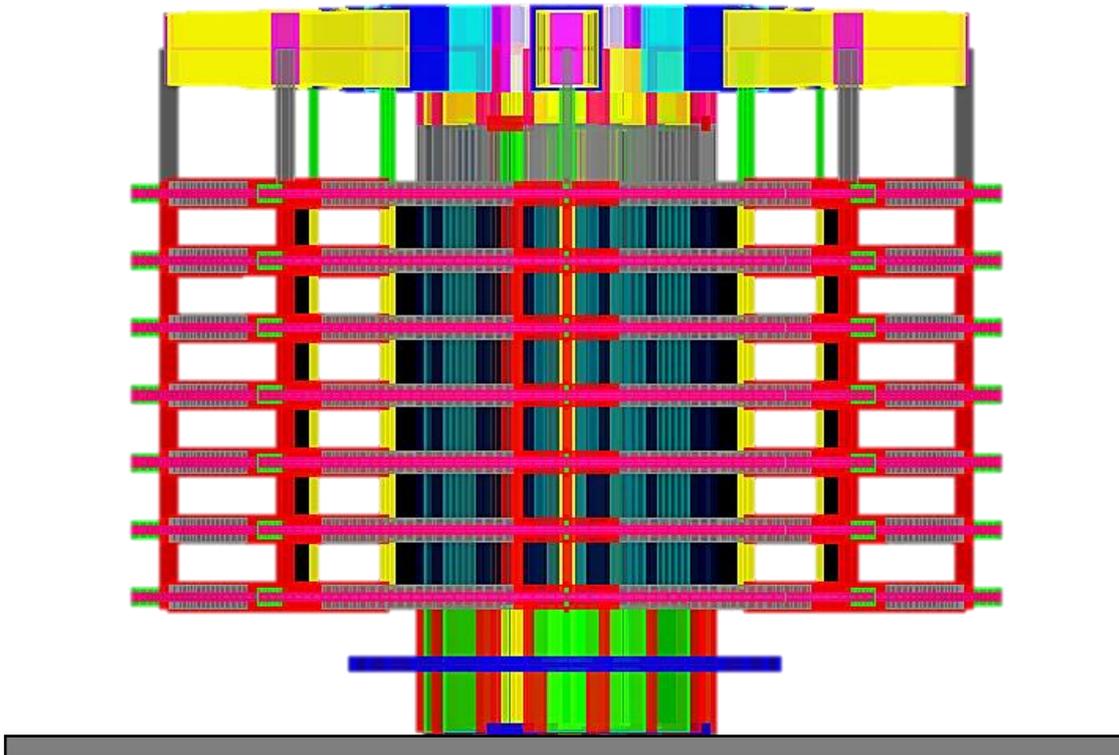


Figura 139 - Fachada do modelo tridimensional do bloco A.
Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

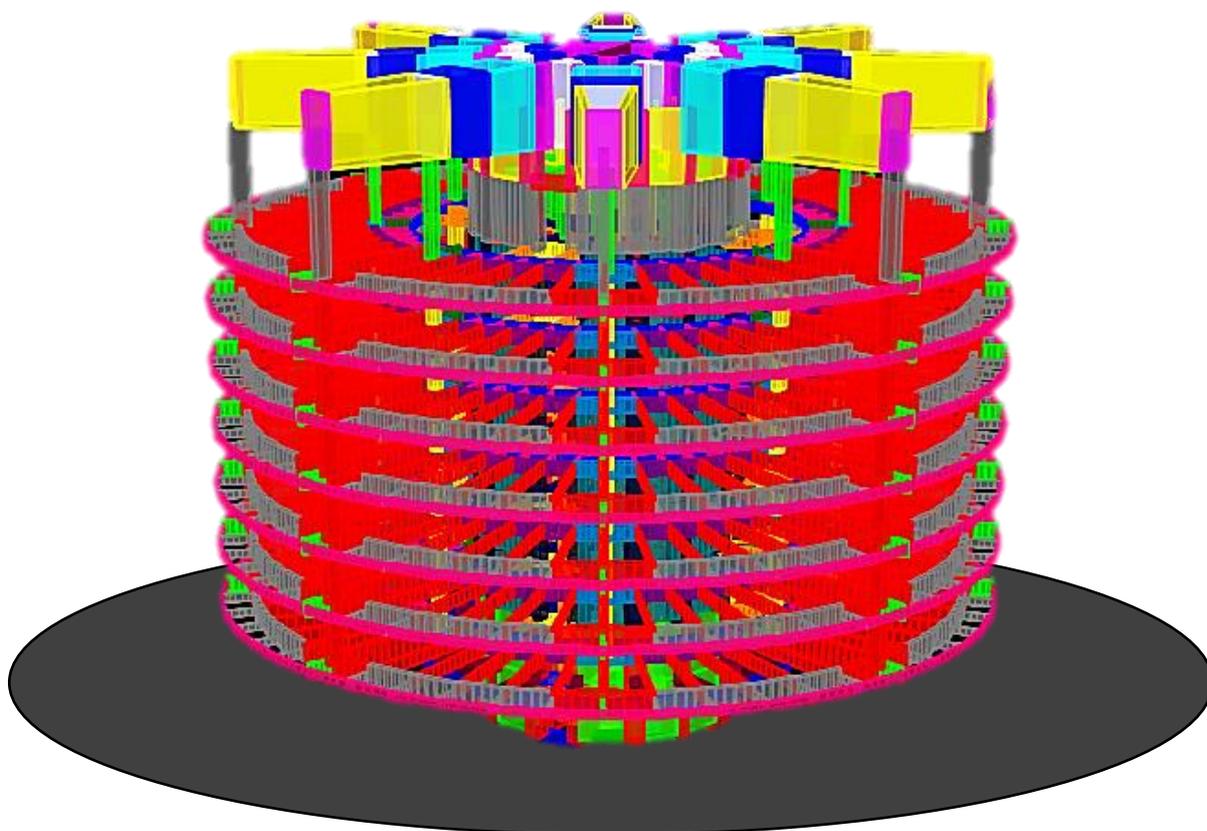


Figura 140 - Perspectiva do modelo tridimensional do bloco A. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Portanto, após de ter inserido no programa SAP 2000 todas as medidas relativas aos elementos estruturais, foi atribuído para cada elemento uma resistência característica do concreto, que varia de 35 MPa para os elementos estruturais pertinentes aos andares, incluindo mezanino e núcleo rígido, a 50 MPa para os elementos do sistema estrutural principal (vigas estruturais). Por meio do programa foi analisado o sistema estrutural construído, mostrando os esforços que são desenvolvidos e os deslocamentos.

Para análise estrutural foram consideradas três hipóteses de carga:

- Carga *permanente* (G);
- *Sobrecarga ou carga acidental* (Q);
- *Vento* (V).

Para a carga do peso próprio, além da estrutura, foram considerados os seguintes elementos, por um total de 200 kgf/m^2 :

- *Drywall*, 50 kgf/m^2 ;
- *Revestimento de piso*, 56 kgf/m^2 ;
- *Argamassa para regularização de revestimento*, 66 kgf/m^2 ;
- *Forro de cobertura*, 10 kgf/m^2 ;

As sobrecargas aplicadas no carregamento das lajes foram:

- *Salas para escritórios*, 200 kgf/m^2 ;
- *Corredores e acessos à escadas e elevadores*, 300 kgf/m^2 ;

No caso da força devida ao vento, foi considerada uma carga de 90 kg/m^2 em direção horizontal aplicada na fachada cilíndrica do bloco A. Além disso, os carregamentos foram baseados e analisados segundo quatro combinações de carga:

- *Estado Limite Último:*
 - 1,4G + 1,4Q (*Combinação 1*);
 - 1,4G + 1,4Q + 0,84V (*Combinação 2*);
 - 1,4G + 0,7Q + 1,4V (*Combinação 3*).
- *Estado Limite de serviço:*
 - 1,0G + 1,0Q + 1,0V (*Combinação 4*).

Apresenta-se o diagrama dos esforços normais da edificação em estudo. Pela figura 141 pode-se observar os tirantes da estrutura, externos e internos, com solicitações elevadas de tração. Os esforços normais são muito altos devido ao peso próprio de toda a estrutura, às cargas acidentais e uma pequena parcela devida a ação do vento.

Na primeira combinação (1,4G +1,4Q) tem-se um esforço máximo de 2137 tf no tirante externo, representando quase o dobro do esforço submetido apenas com o peso próprio da estrutura (1450 tf). Os tirantes externos, mais solicitados por conta da área de contribuição de laje maior do os internos, estão submetidos à esforço normal máximo de 1416 tf. Nesse modelo estrutural atirantado, os esforços nos tirantes de aço são transferidos para as vigas de cobertura, dessas para o núcleo rígido. O núcleo rígido está submetido a grandes esforços de compressão. Os valores máximos de compressão alcançam 3490 tf no topo do núcleo.

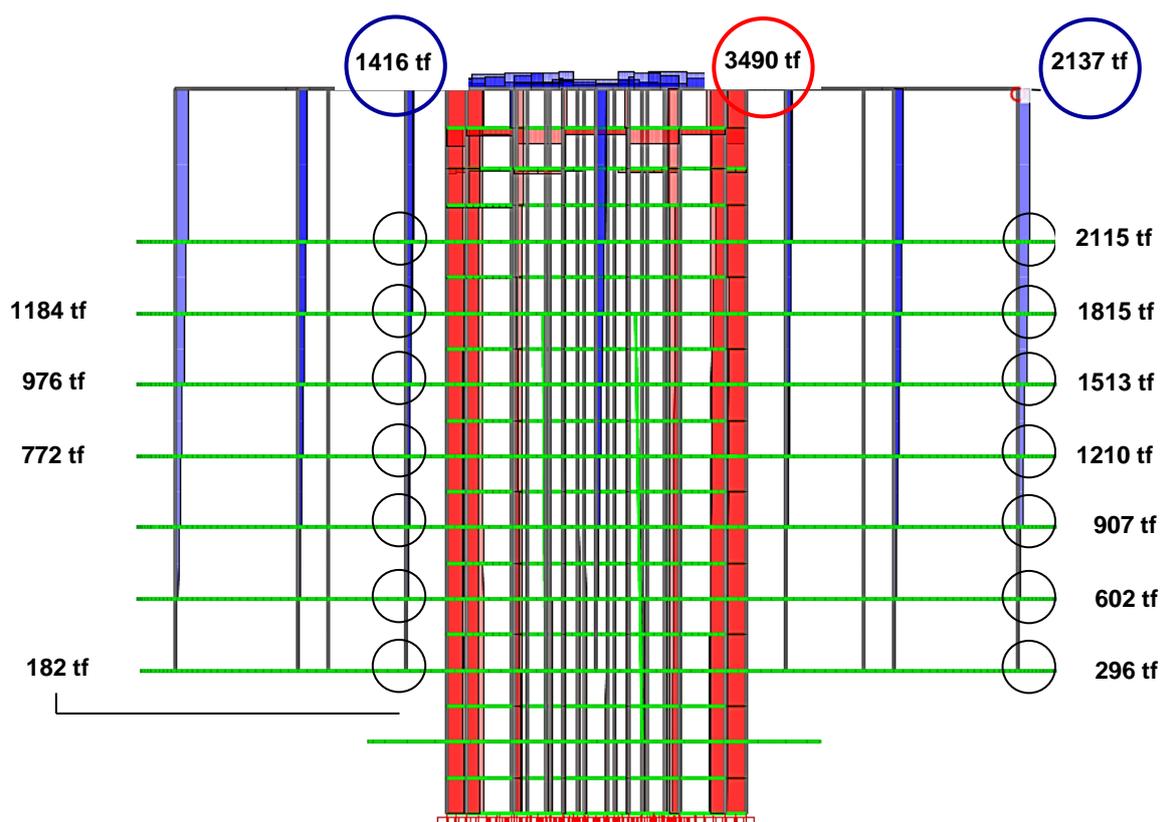


Figura 141 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 1 (1,4G+1,4Q). Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

A ação de carga de vento, conforme á Combinação 2, nota-se que, a pressão exercida pelo vento alivia os tirantes mais próximos á direção de impacto na fachada, aumentando os esforços de tração nos tirantes da fachada oposta. Porém, considerado o peso próprio da estrutura e as sobrecargas, a influência do vento é praticamente insignificante, aumentando a carga máxima de aproximadamente 2 tf.

Para análise do momento fletor, na figura 142 mostram-se os esforços de flexão desenvolvidos nas vigas principais de cobertura, sendo que no núcleo central o valor máximo é de -76.824 tf.m.

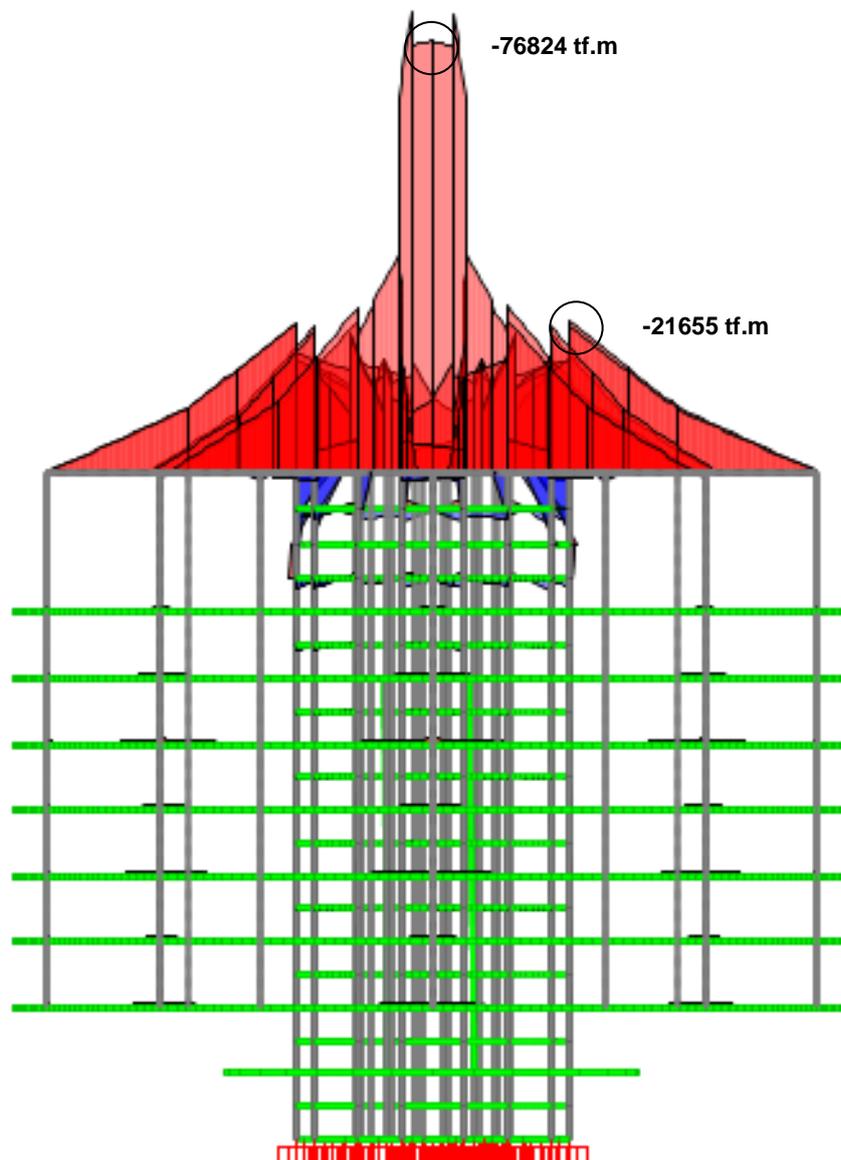


Figura 142 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco A, PGR.
Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Os tirantes não apresentam momento fletor, como já era esperado, em virtude das hipóteses adotadas no sistema estrutural.

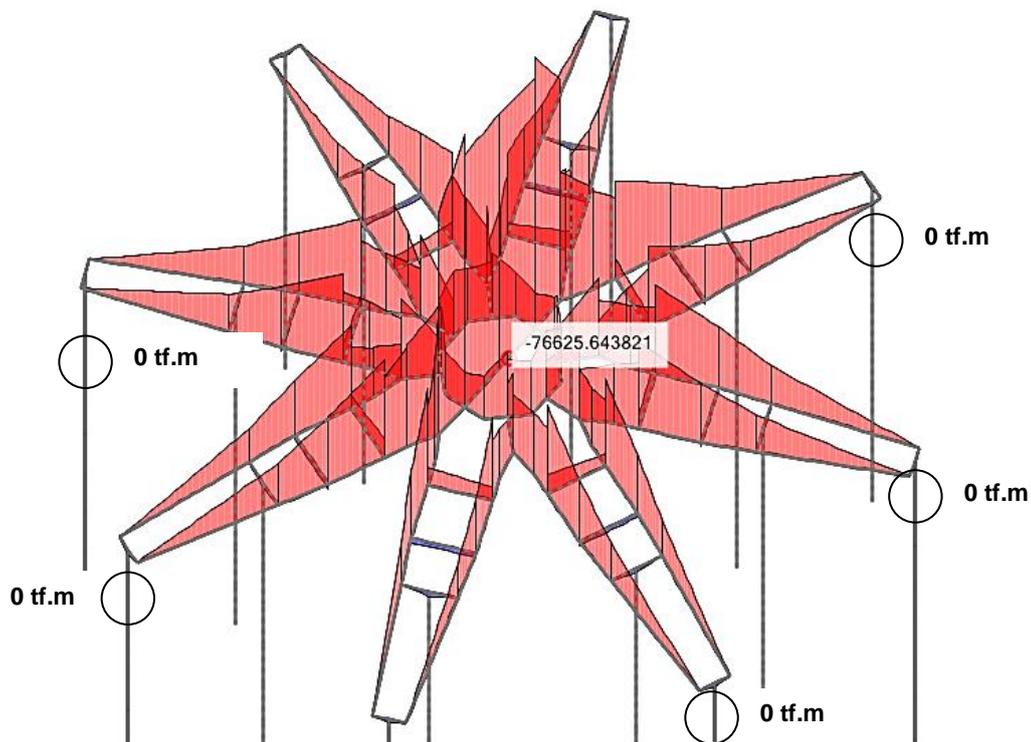


Figura 143 - Diagrama em perspectiva do Momento Fletor das vigas de cobertura, bloco A, PGR.
Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Na figura 144 apresentam-se os deslocamentos das lajes que, tendo simetria entre elas nas direções x e y e carregamentos distribuídos uniformemente para todas as lajes constituintes dos andares, terão momentos fletores iguais tanto na direção do eixo x quanto do eixo y .

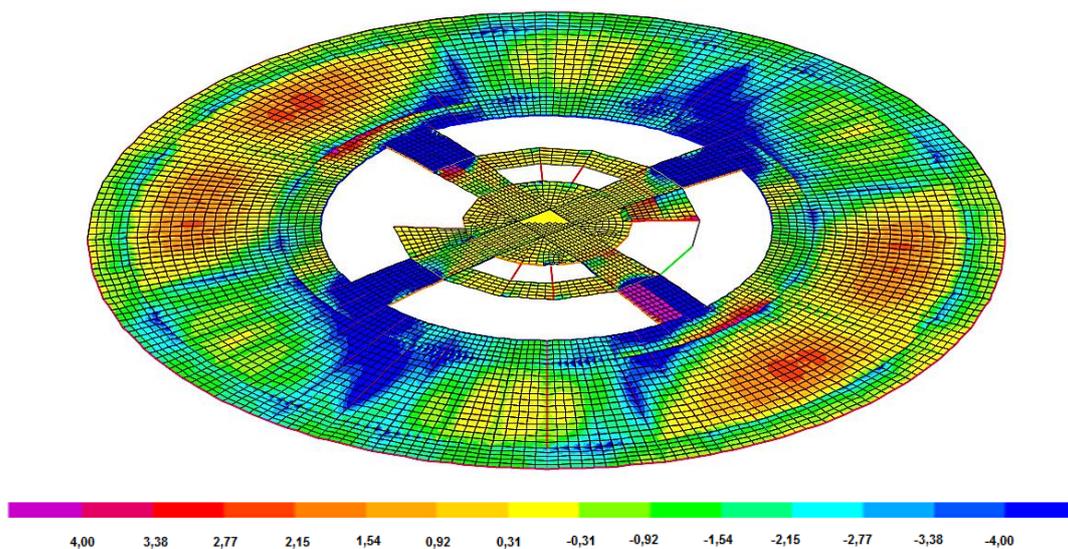


Figura 144 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo X. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

4.2.4 O bloco B



Figura 145 - Vista do bloco B, PGR. Fonte: Rubens Craveiro.

O bloco B, diferentemente do bloco A, possui uma estrutura convencional, á pilares.

Ao invés de tirantes, o sistema estrutural vertical consta de dois anéis de oito pilares cada, um interno e um externo, dispostos ao longo da planta circular da edificação. Esse prédio, consta da mesma volumetria do bloco A possuindo um diâmetro de aproximadamente 60 metros, oito andares e altura de 48,3 metros. Nas figuras 146 e 147 mostram-se as plantas do térreo e do mezanino, respectivamente.

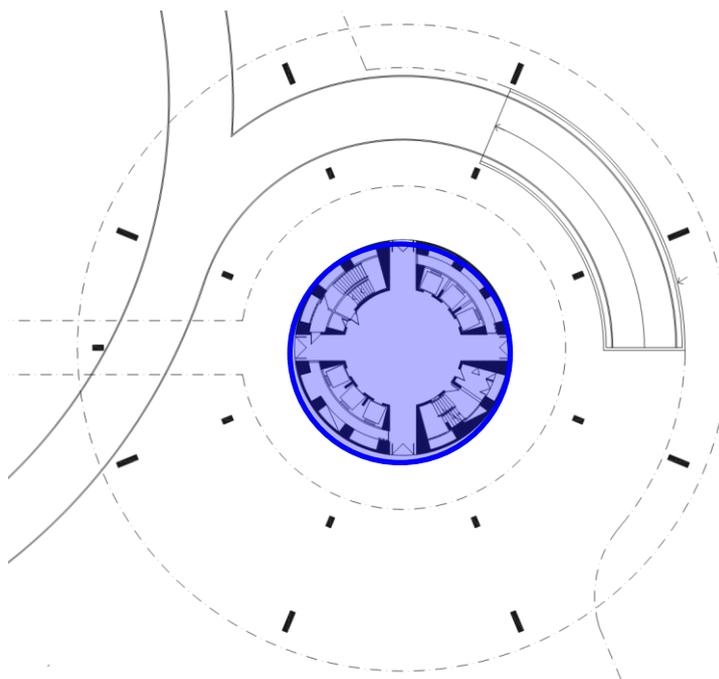


Figura 146 - Planta do térreo, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.

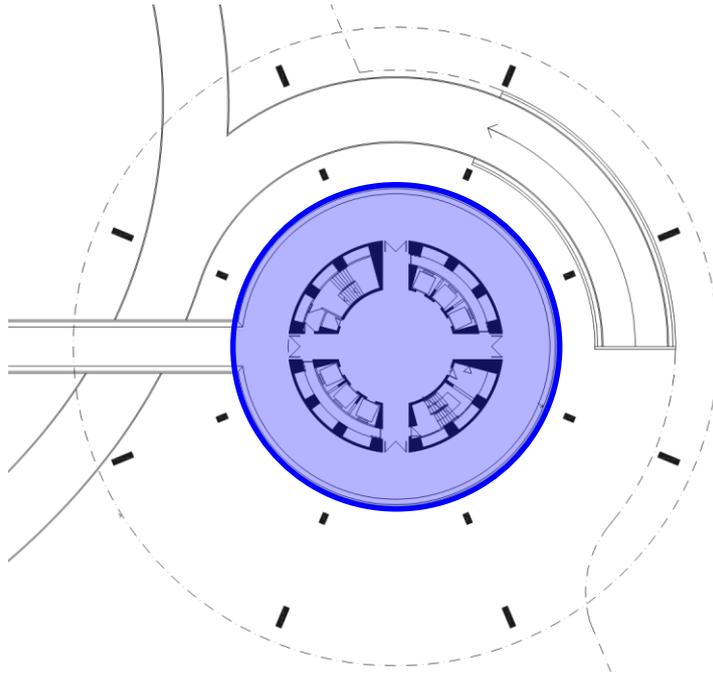


Figura 147 - Planta do mezanino, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.

As plantas do terceiro e sexto pavimento, recebendo a passarela que conecta o bloco B com o A, se diferenciam das plantas do andar tipo somente por essa variante, como na figura 148.

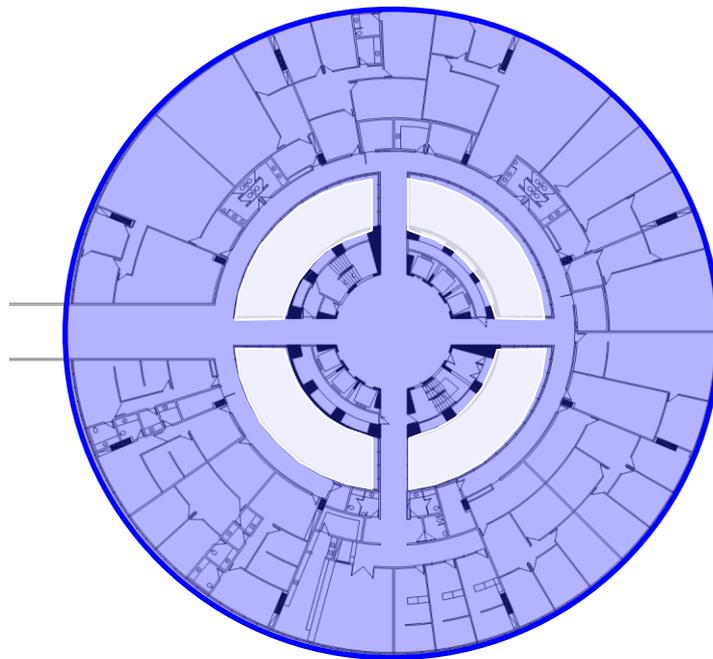


Figura 148 - Planta do 3° e 6° andar, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 150 - Edificação em fase de construção, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.



Figura 151 - Edificação em fase de construção, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.

A malha de pilares que sustenta a edificação consta de dois anéis de pilares (figura 152), um interno, formado por oito unidades de 200x50 centímetros, e um externo (oito pilares) composto por pilares de 100x50 centímetros.



Figura 152 - Pilares principais externos e internos, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.

O corte CC¹ da edificação, como das figuras 153 e 154, mostra como o núcleo rígido central, complementado aos pilares principais, confere maior estabilidade global ao sistema estrutural do bloco B.

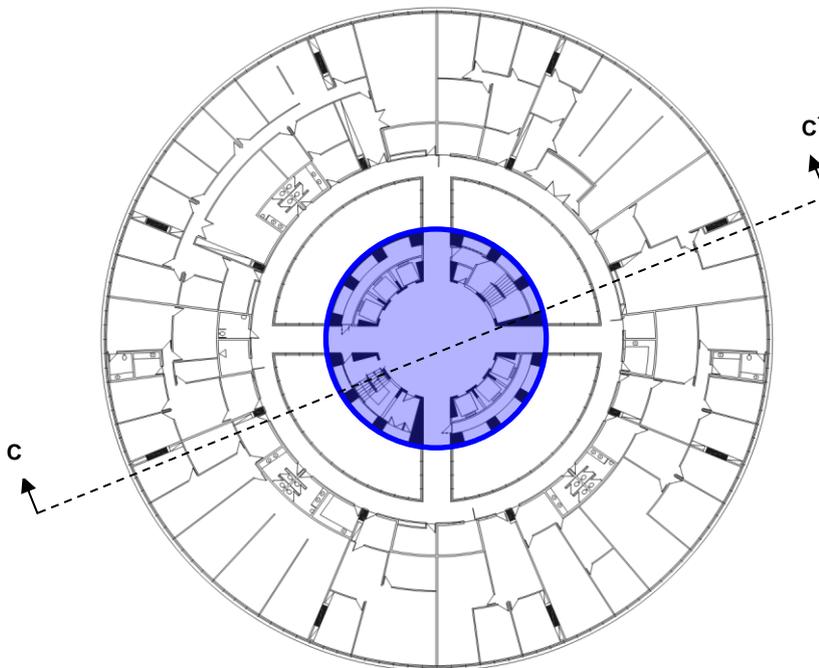


Figura 153 – Núcleo rígido participante da estrutura resistente, bloco B. Fonte: Arquivo da PGR.

4.2.6 Análise do sistema estrutural do bloco B

Na figura 155 mostram-se as plantas estruturais dos pavimentos tipo, mezanino e núcleo rígido, respectivamente.

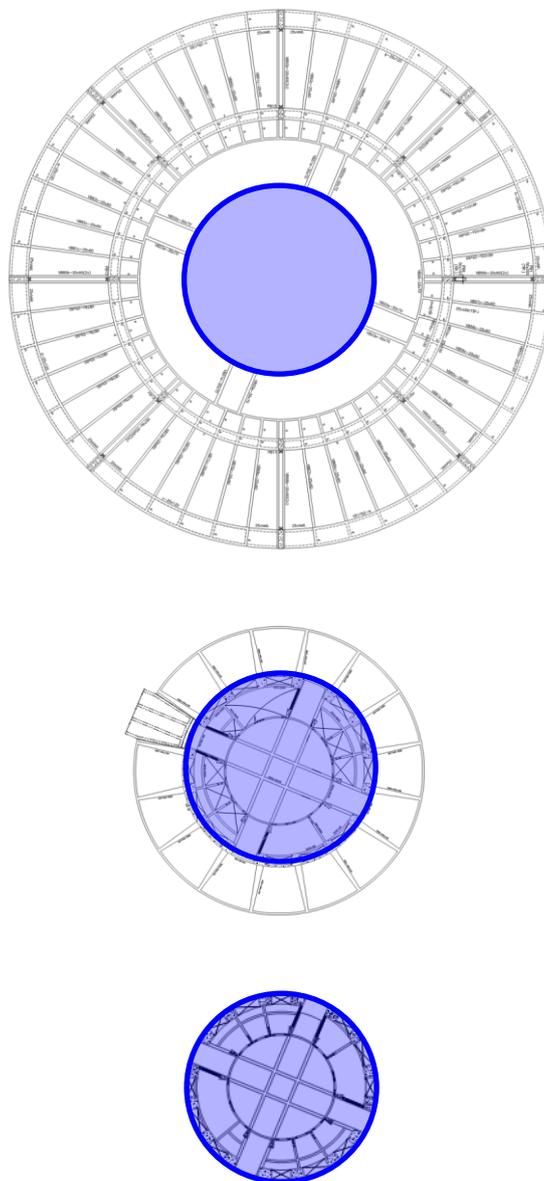


Figura 155 - Planta estrutural do Pavimento tipo, Mezanino e núcleo rígido, bloco B.
Fonte: Arquivo da PGR, desenho do autor.

Na tabela 7 apresentam-se as seções de todos os elementos estruturais que compõem o pavimento tipo do bloco B.

Elemento Estrutural – Pavimento tipo	A (m)	B (m)	Cor
1. Pilares externos	2,00	0,50	Blue
2. Pilares internos	1,00	0,50	Pink
3. Viga circular anel ext., seção variável 1,20~1,60	0,25/0,25	1,20/1,60	Light Blue
4. Viga circular anel externo	0,25	1,20	Green
5. Viga radial externa	0,50	1,45	Light Blue
6. Viga radial externa	0,25	1,45	Light Blue
7. Viga circular anel interno	0,25	1,20	Light Green
8. Viga radial	0,40	0,60	Blue
9. Viga radial	0,25	0,60	Dark Blue
10. Viga circular interna	0,25	1,00	White
11. Viga radial interna	0,40	0,60	Red
12. Viga radial interna	0,20	0,60	Light Green
13. Viga circular anel interno	0,20	0,70	Pink
14. Viga passarela	0,25	6,00	Orange

Tabela 7 - Dimensões dos elementos estruturais do pavimento tipo do bloco B para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

A figura 156 corresponde à perspectiva do pavimento tipo do bloco B.

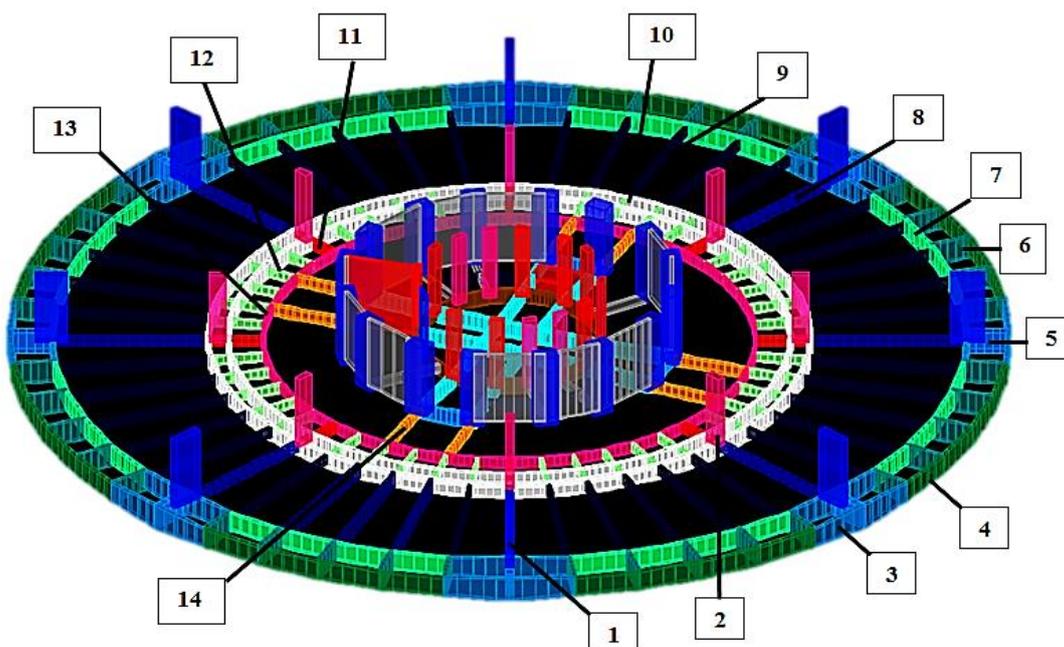


Figura 156 - Perspectiva do pavimento tipo, bloco b, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Elemento Estrutural – Núcleo Rígido	A (m)	B (m)	Cor
15. Viga radial	0,20	0,60	Grey
16. Viga circular externa	0,20	0,60	Dark Blue
17. Viga circular interna	0,15	1,00	Brown
18. Viga circular externa	1,85	1,00	Red
19. Viga circular abertura	0,20	1,00	Cyan
20. Viga principal	0,30	1,00	Light Cyan
21. Pilar principal	1,40	1,00	Blue
22. Pilar em L	0,80	0,45	Red
23. Pilar interno, formato retangular	1,10	0,15	Blue
24. Pilar em T	0,80	0,40	Pink
25. Parede núcleo rígido externa	4,85	0,20	Grey
26. Parede núcleo rígido interna	4,85	0,20	Red

Tabela 8 - Dimensões dos elementos estruturais do núcleo rígido do bloco B para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

A tabela 8 e a figura 157 mostram as seções dos elementos estruturais do núcleo rígido.

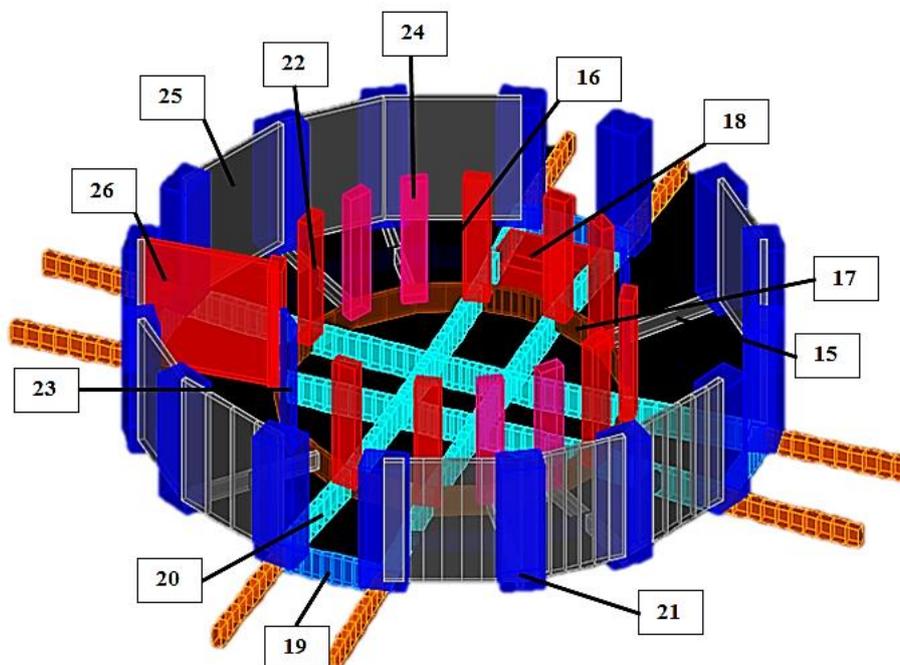


Figura 157 - Perspectiva do núcleo rígido, bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Elemento Estrutural – Mezanino	A (m)	B (m)	Cor
27. Viga perimetral anel externo	0,20	1,00	Marrom
28. Viga radial variável 30~70	0,30~0,70	1,00	Azul
29. Viga perimetral externa	0,20	1,00	Marrom
30. Viga perimetral interna	0,20	0,60	Azul Escuro
31. Viga perimetral anel interno	0,15	1,00	Vermelho
32. Viga central	0,30	1,00	Ciano
33. Pilar principal	1,40	1,00	Azul Escuro
34. Pilar em L	0,80	0,45	Azul
35. Pilar interno, formato retangular	1,10	0,15	Ciano
36. Pilar em T	0,80	0,40	Azul Claro
37. Parede externa	4,70	0,20	Amarelo
38. Parede interna	4,70	0,20	Amarelo Claro

Tabela 9 - Dimensões dos elementos estruturais do mezanino do bloco B para análise estrutural. Onde: A (base para vigas ou lado A para pilares/tirantes), B (altura para vigas ou lado B para pilares/tirantes).

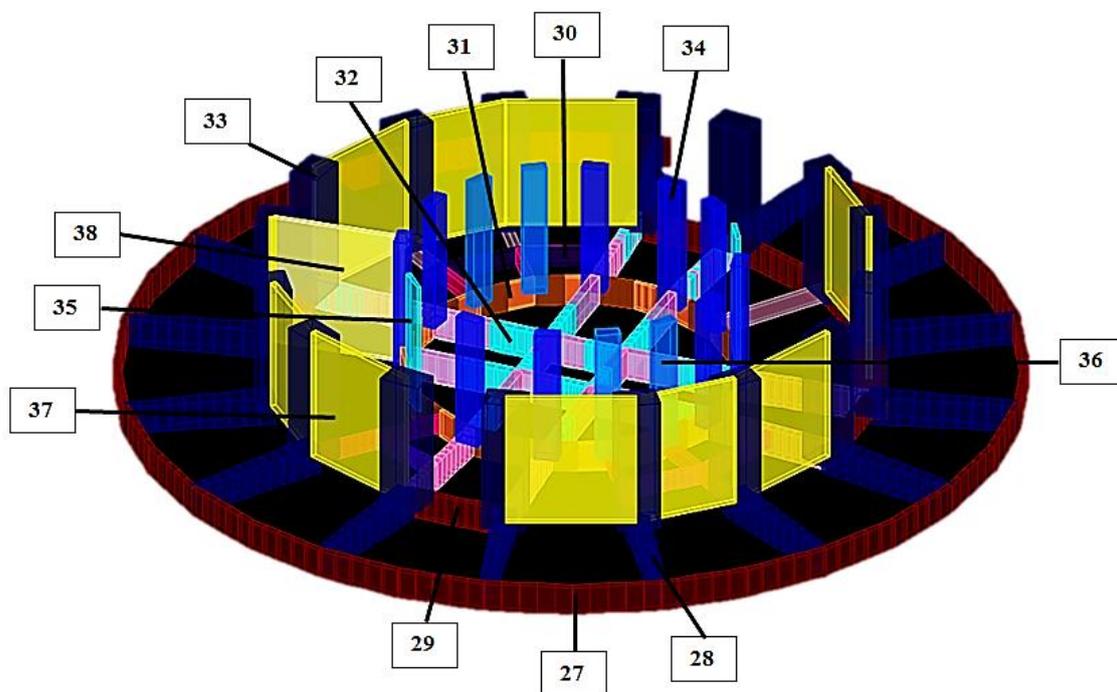


Figura 158 - Perspectiva do mezanino, bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

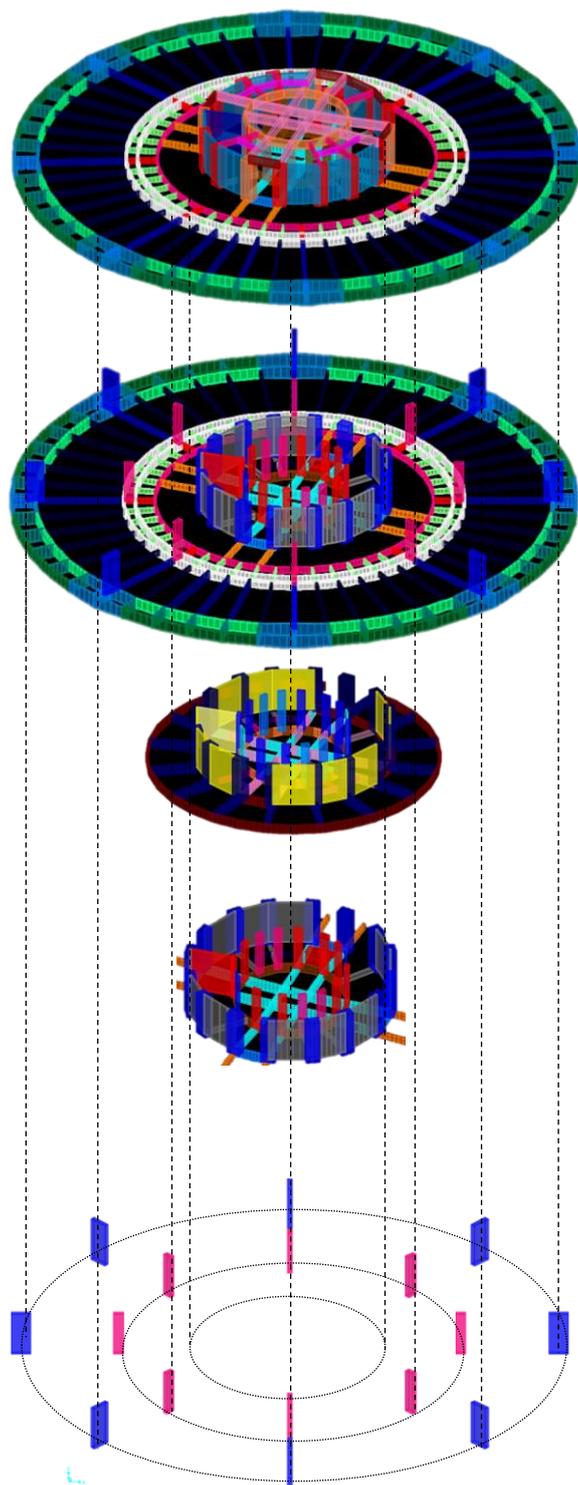


Figura 159 – Montagem tridimensional mostrando a estrutura do bloco B, PGR. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

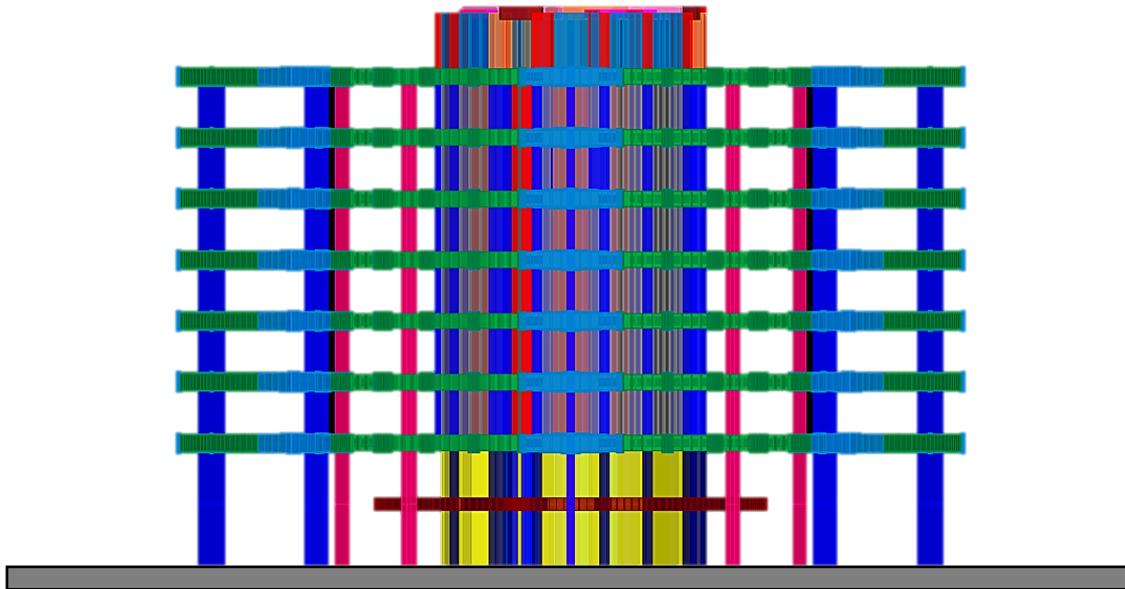


Figura 160 - Fachada do modelo tridimensional do bloco B. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

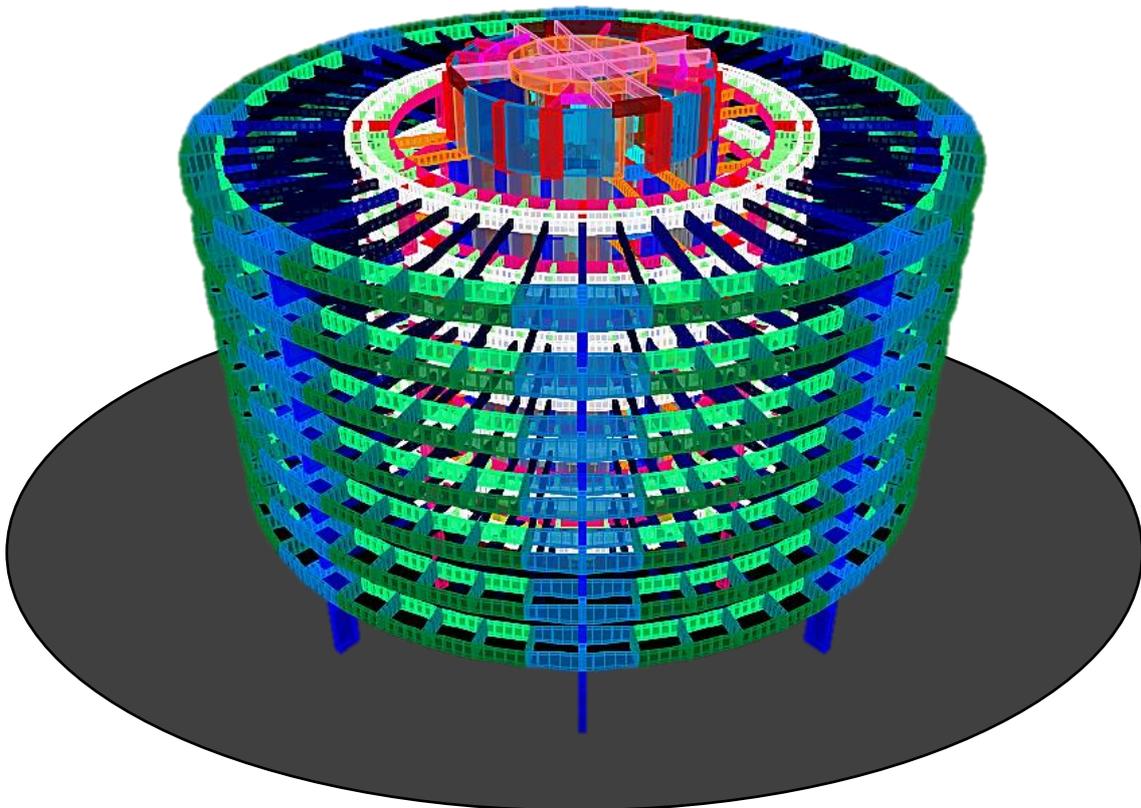


Figura 161 - Perspectiva do modelo tridimensional do bloco B. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

A análise do bloco B segue o mesmo procedimento metodológico adotado para o bloco A, ou seja, verificou-se os esforços e deslocamentos de toda a edificação. Foram elaborados gráficos relativos aos esforços normais, deslocamento e momento fletor nas vigas da estrutura.

Na figura 162 mostra-se os esforços normais da edificação do bloco B, que são acumulativos até as fundações. Para os pilares das extremidades, os esforços normais atingem o valor de 2247 tf, os quais são semelhantes aos valores dos esforços normais desenvolvidos nos tirantes do bloco A.

Na primeira combinação (1,4G +1,4Q) mostra-se um esforço de 2247 tf, representando praticamente o dobro do esforço submetido apenas com o peso próprio da estrutura. Os pilares externos tem uma área de contribuição de laje maior comparado aos pilares internos, que sofrem um esforço normal de 1734 tf. A principal diferença observada com o modelo do bloco A, está no fato que os esforços terão que subir através dos tirantes de aço protendidos para em seguida descer pelo núcleo rígido central.

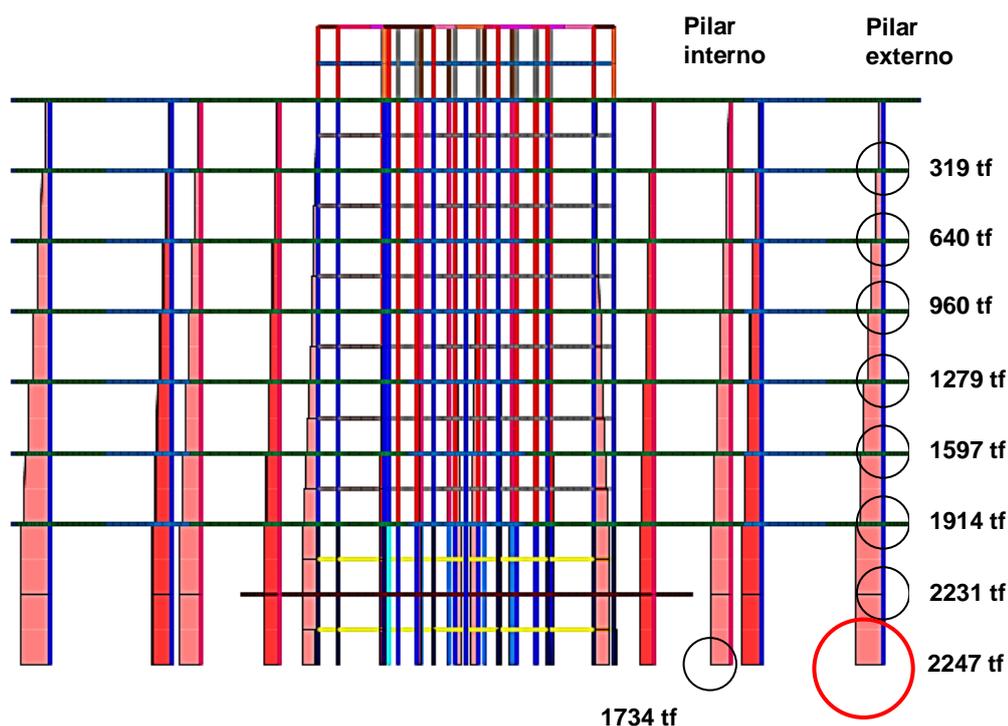


Figura 162 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 1 (1,4G+1,4Q). Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

Após ter colocado a carga de vento, conforme a Combinação 2, nota-se que, a pressão exercida pelo vento alivia os pilares mais próximos à direção de impacto na fachada, aumentando os esforços de compressão nos pilares da fachada oposta.

Porém, considerado o peso próprio da estrutura e das sobrecargas, a influência do vento é relativamente pequena, como demonstram os valores da figura 163.

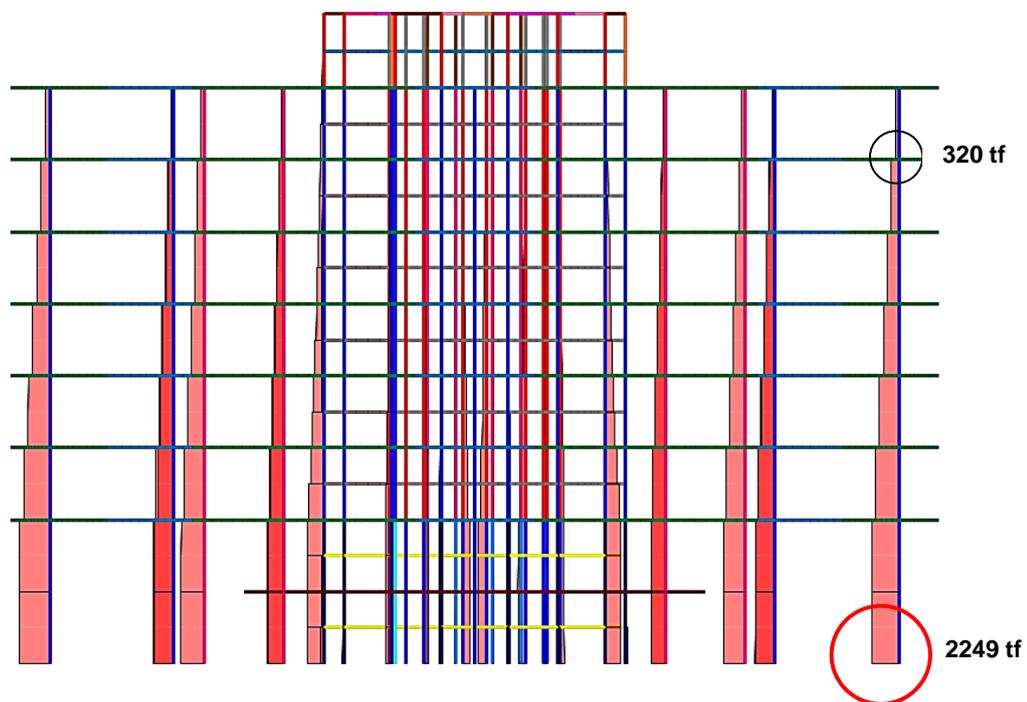


Figura 163 - Diagrama de Forças Normais na Combinação 2. Fonte: SAP 2000, desenho do autor.

No modelo convencional do bloco B, os deslocamentos desenvolvidos nas lajes e pilares são de 4,12 cm, o que está dentro dos limites admissíveis da norma ABNT NBR 6118, como se apresenta nas figuras 164 e 165.

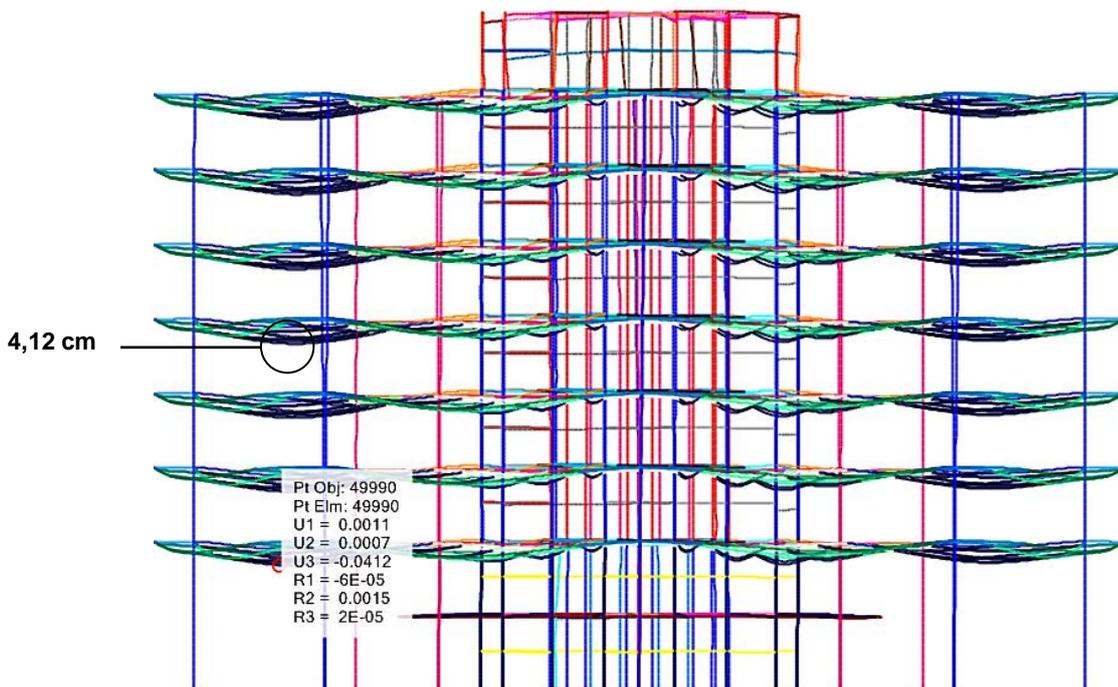


Figura 164 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).
 Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

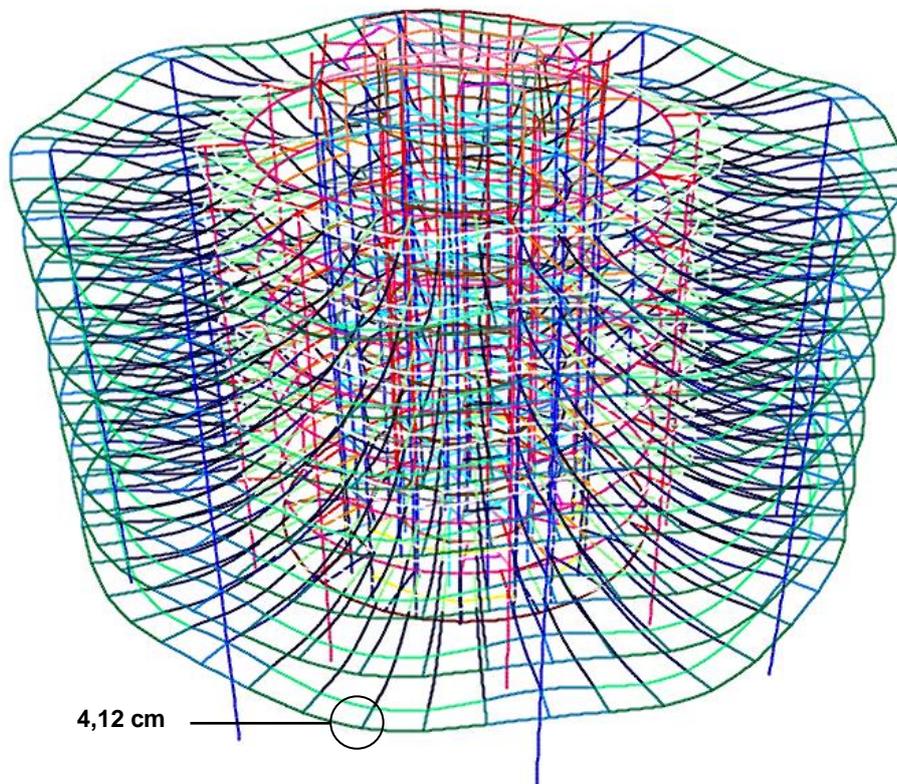


Figura 165 - Perspectiva do Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).
 Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Mostra-se no modelo convencional, como nas figuras 166 e 167 o momento fletor nas vigas estruturais do prédio B. Os momentos principalmente próximos aos apoios e na conexão de viga – pilar, resultando com um valor de -117 tf para o encontro viga – pilar externo e com um valor de -390 tf acontecendo na ligação viga – pilar interno.

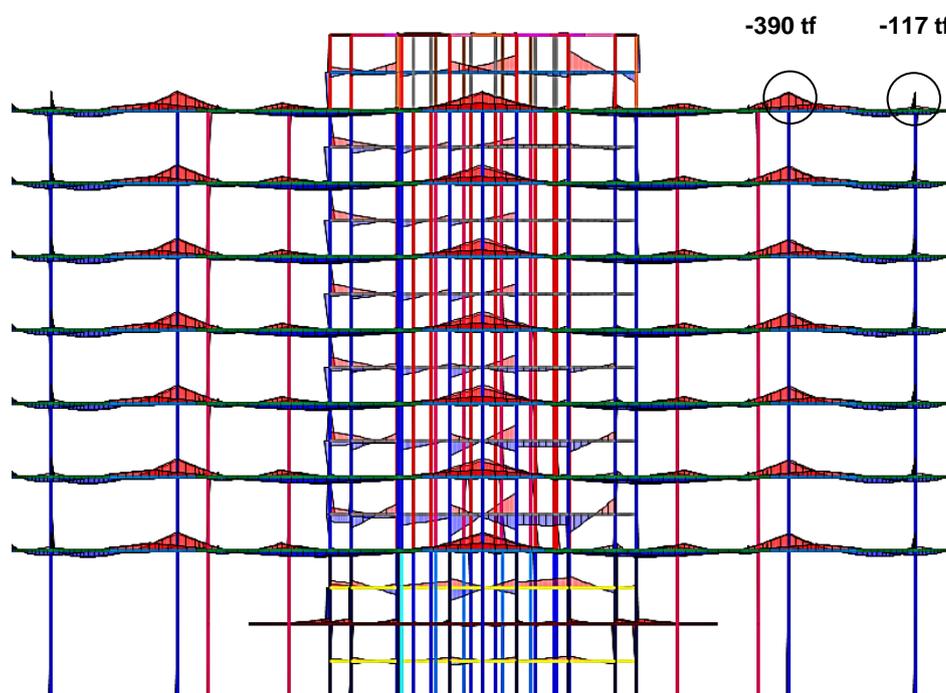


Figura 166 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco B, PGR.
Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

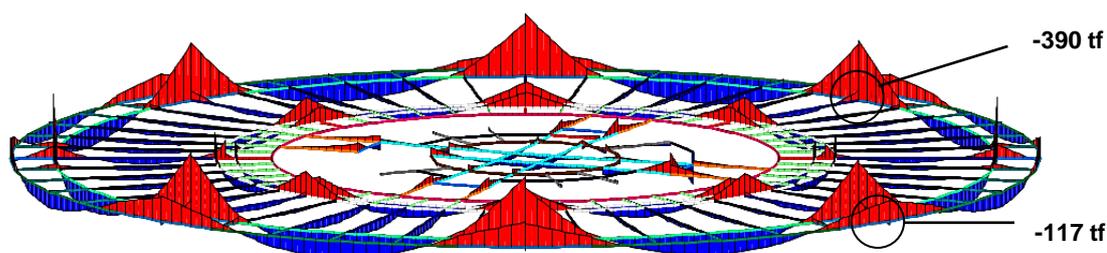


Figura 167 - Diagrama de Momento Fletor das vigas, bloco B, PGR.
Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

As figuras 168 e 169 mostram a deformação das lajes que, tendo simetria entre elas na direção x e y e carregamentos distribuídos uniformemente para todas as lajes constituintes o andar em questão, terão momentos fletores iguais tanto na direção do eixo x quanto do eixo y .

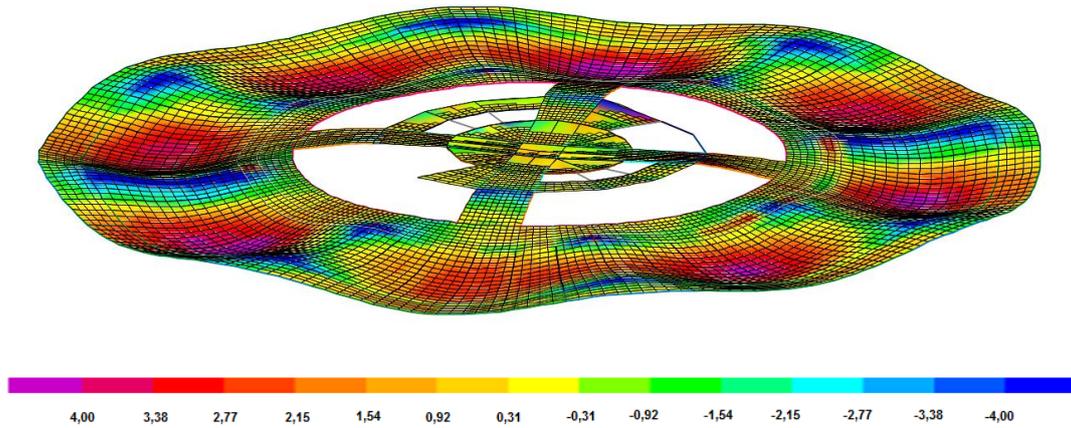


Figura 168 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo X, bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Através dessa imagem podemos observar como o momento aumenta consideravelmente próximo à conexão entre pilares e vigas, representado pela cor azul escuro, e próximo ao encontro da passarela com o núcleo rígido.

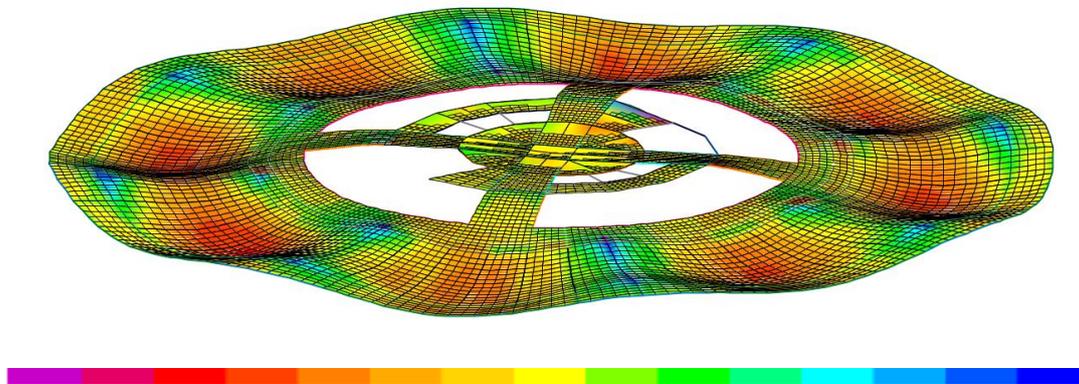


Figura 169 - Diagrama de Momento Fletor na direção do eixo Y, bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

4.2.7 Análise comparativa

Esse subcapítulo aborda uma análise comparativa dos dois sistemas estruturais das edificações A e B do conjunto da Procuradoria Geral da República. Os esforços normais do bloco A, são tipicamente de tração ao invés das solicitações atuantes na estrutura do bloco B, que são de compressão.

Ao discretizar o tirante T1 e o pilar P1, resulta que, o caminho das forças e das cargas incidentes na estrutura dos dois prédios são em sentidos inversos.

No caso do tirante T1, as forças vão aumentando de intensidade no sentido ascendente dos níveis inferiores para a cobertura.

No caso do pilar P1, as forças vão aumentando de intensidade no sentido descendente da cobertura para o nível das fundações.

Conforme as figuras 170 e 171 mostra-se o desenho dos diagramas dos esforços normais de tração e compressão atuantes nas estruturas das duas edificações.

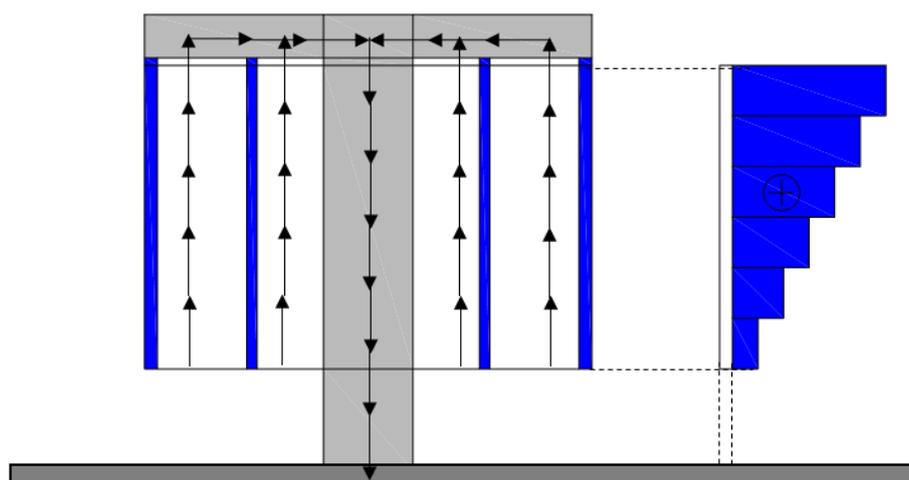


Figura 170 - Desenho esquemático do caminho das forças da estrutura atirantada, bloco A.

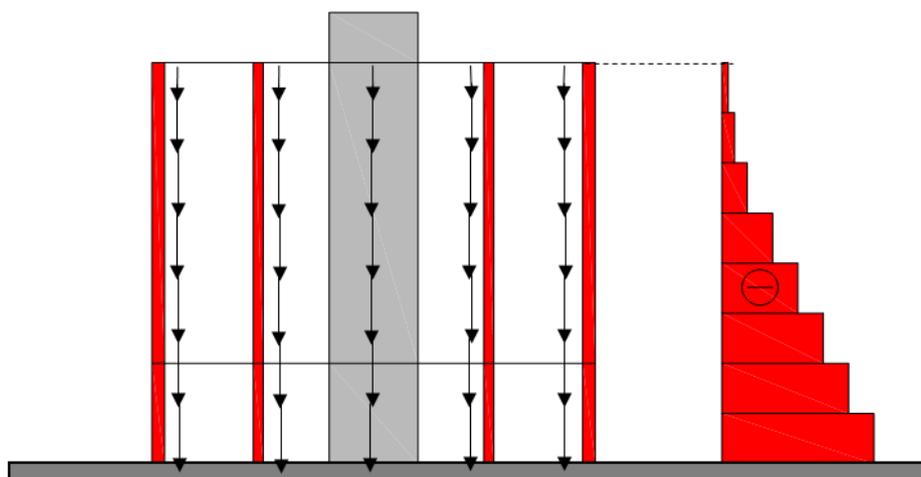


Figura 171 - Desenho esquemático do caminho das forças atuantes na estrutura convencional, bloco B.

O equilíbrio estrutural da edificação A, garantido por meio das vigas principais de seção variável, dos tirantes de aço e do núcleo rígido central, é possibilitado graças ao sistema de protensão. As figuras 172, 173, 174 e 175 mostram os detalhes estruturais da protensão utilizada nas vigas principais de cobertura.

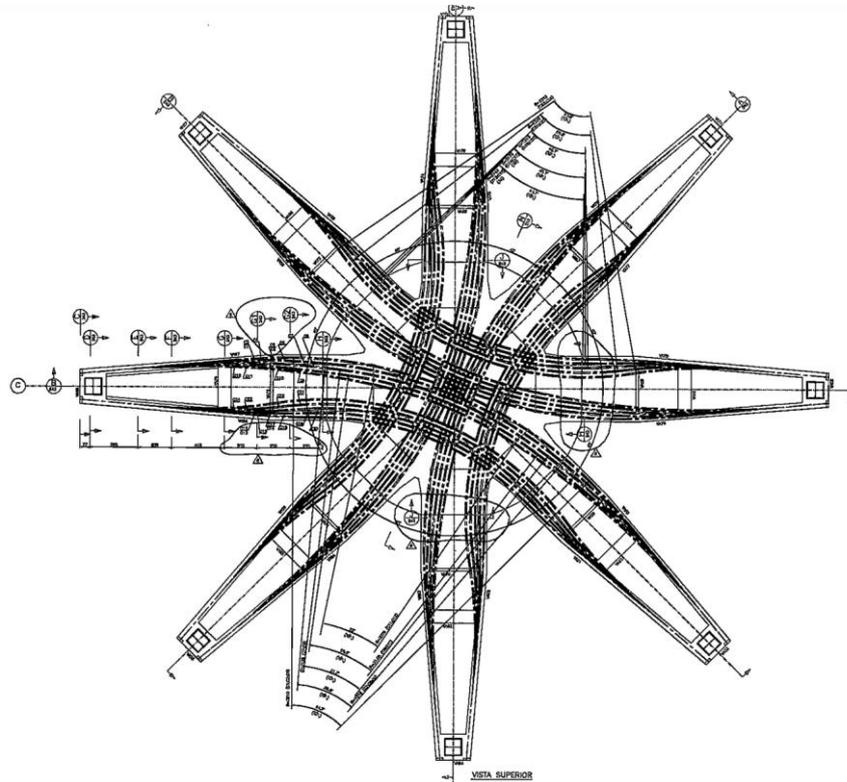


Figura 172 - Protensão nas vigas principais de cobertura na vista de planta, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

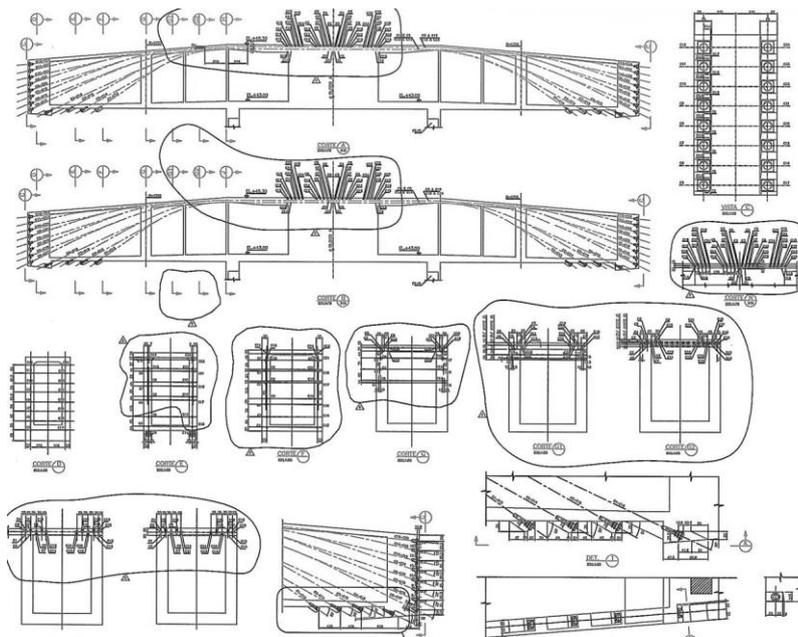


Figura 173 - Protensão nas vigas principais de cobertura, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

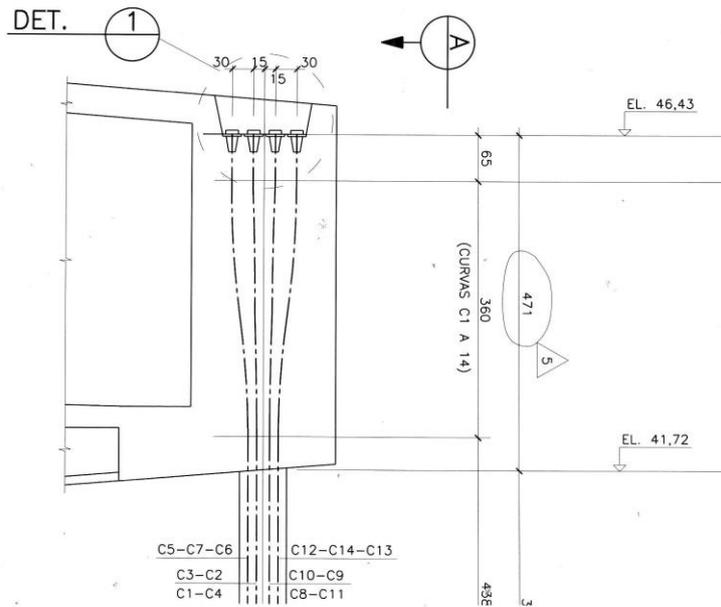


Figura 174 – Detalhe de protensão do tirante externo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

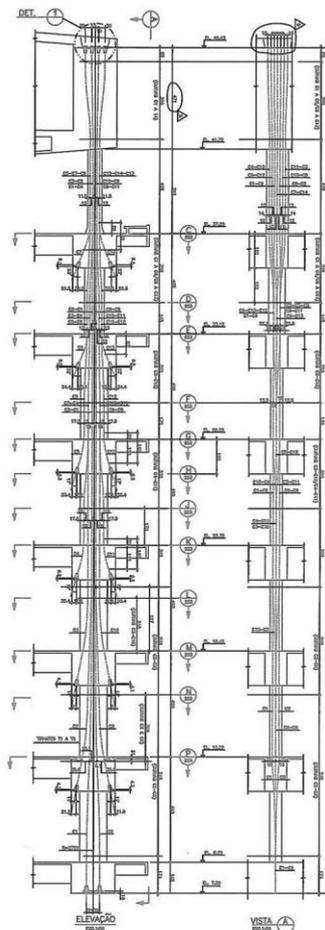


Figura 175 - Detalhe das cordoalhas constituintes o tirante externo, bloco A. Fonte: Arquivo da PGR.

Após a análise das Forças Normais verificam-se os deslocamentos da estrutura. Primeiramente foi construído um modelo preliminar com vigas sem protensão para avaliação de deslocamentos verticais das vigas de cobertura e das lajes dos pavimentos.

Os deslocamentos apresentados pelo modelo do bloco A, ainda sem protensão nas vigas principais, mostram, conforme o diagrama da figura 176, o deslocamento máximo das vigas de cobertura e das lajes na direção vertical é de aproximadamente 42 cm.

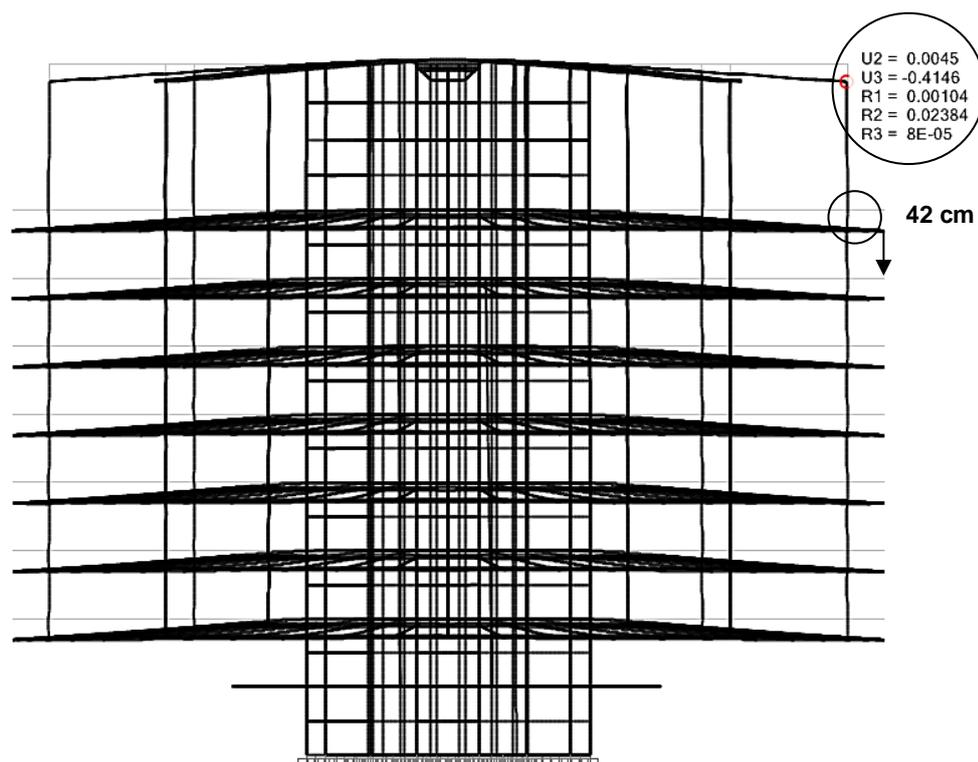


Figura 176 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura sem protensão, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+Q,0V).

Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

O diagrama mostra como o deslocamento elástico que acontece no mezanino é praticamente nulo, devido ao fato que as vigas e as lajes do nível mezanino não são sustentadas pelo sistema de tirantes, que determinam o sistema estrutural principal. Para minimizar o valor do deslocamento, o projetista José Carlos Süssekind considerou a protensão das vigas principais de cobertura, conforme na figura 177, onde resulta um deslocamento máximo de 3,5 cm.

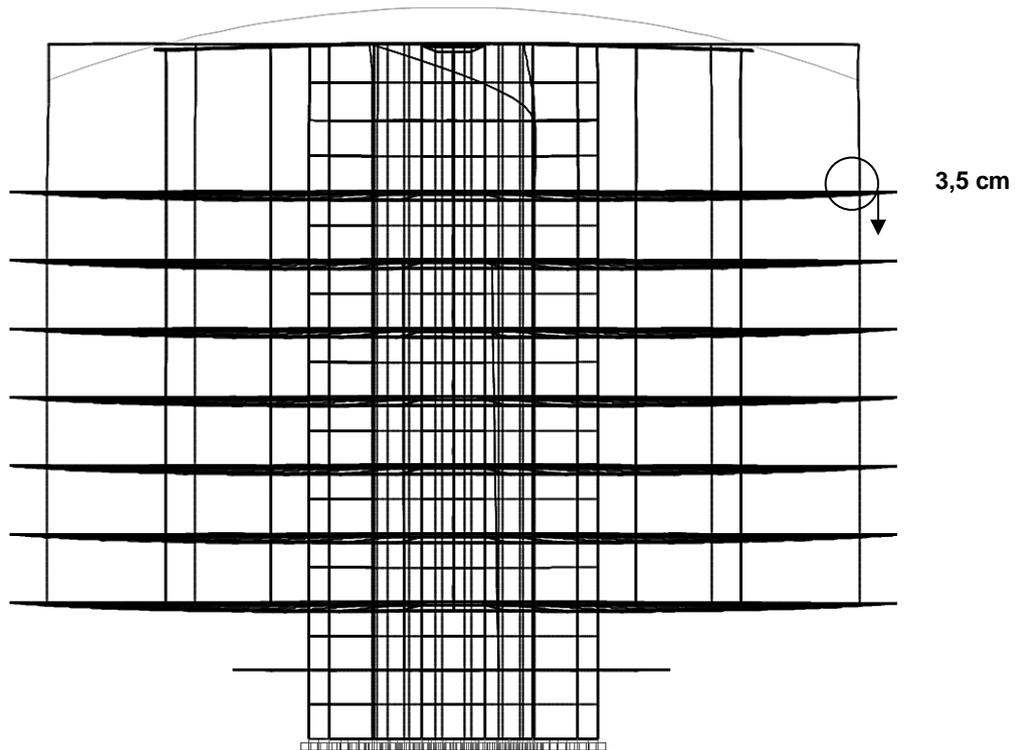


Figura 177 - Diagrama de Deslocamento Elástico da estrutura com protensão, Combinação 4 (1,0G+1,01+1,0V).
 Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

O equilíbrio estrutural da edificação convencional, prédio B, obedece às forças de gravidade que impõe o encaminhamento das cargas solicitantes na direção das fundações.

Analisando a resistência típica dos materiais (aço e concreto) constituintes os dois sistemas estruturais, que são um a função inversa do outro, mostra-se:

$$R_t = \phi (P_1, P_2, \dots, P_n, F_y)$$

A resistência à tração de elementos de concreto é normalmente uma função linear, onde P_1 , P_2 , P_n são propriedades geométricas e F_y é o limite de escoamento do aço de protensão ou armado.

$$R_n = \phi (P_1, P_2, \dots, P_n, f_{ck})$$

A resistência à compressão de elementos de concreto é geralmente uma função onde P_1 , P_2 , P_n são propriedades geométricas e f_{ck} representa a resistência do material.

Nas vigas principais de cobertura do bloco A, o esforço preponderante é exercido pelo momento fletor e no caso dos tirantes, é a tração.

No caso da edificação B, o esforço preponderante acontece nos pilares e é preponderantemente de compressão.

Para completar a análise qualitativa comparativa dos esforços normais e dos deslocamentos (subcapítulo 4.2.6), decidiu-se tirar os oito pilares externos da edificação convencional B, para que o modelo fique mais parecido com o do bloco A, atirantado.

Percebe-se que os deslocamentos atuantes aumentam de forma que as lajes perdem toda a rigidez devido ao fato que as seções das peças estruturais são pequenas para resistir aos esforços submetidos após a retirada dos pilares externos. Esse modelo experimental, mostrado em seguida no diagrama das figuras 178 e 179, foi utilizado para compreender como esses deslocamentos precisam ser combatidos, através de eventuais pilares de tração, chamados de tirantes.

Portanto, haverá um deslocamento máximo na laje de 95 centímetros que, se não for combatido por uma força oposta, levará a edificação numa situação de colapso estrutural.

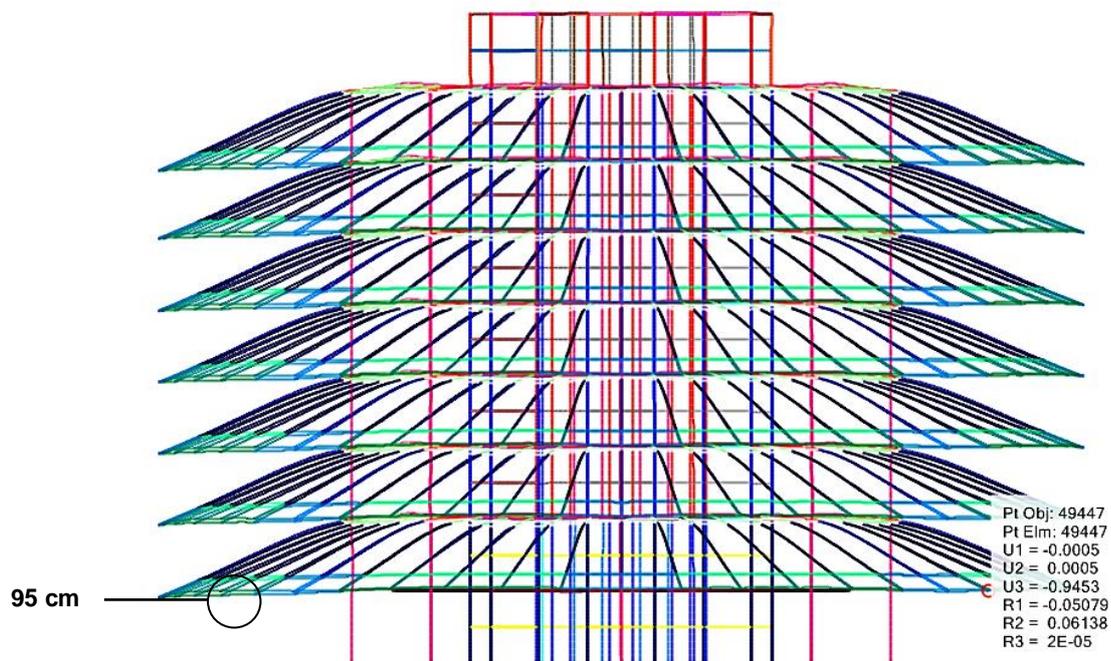


Figura 178 - Diagrama de Deslocamento Elástico com retirada do anel dos pilares externos, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V), bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

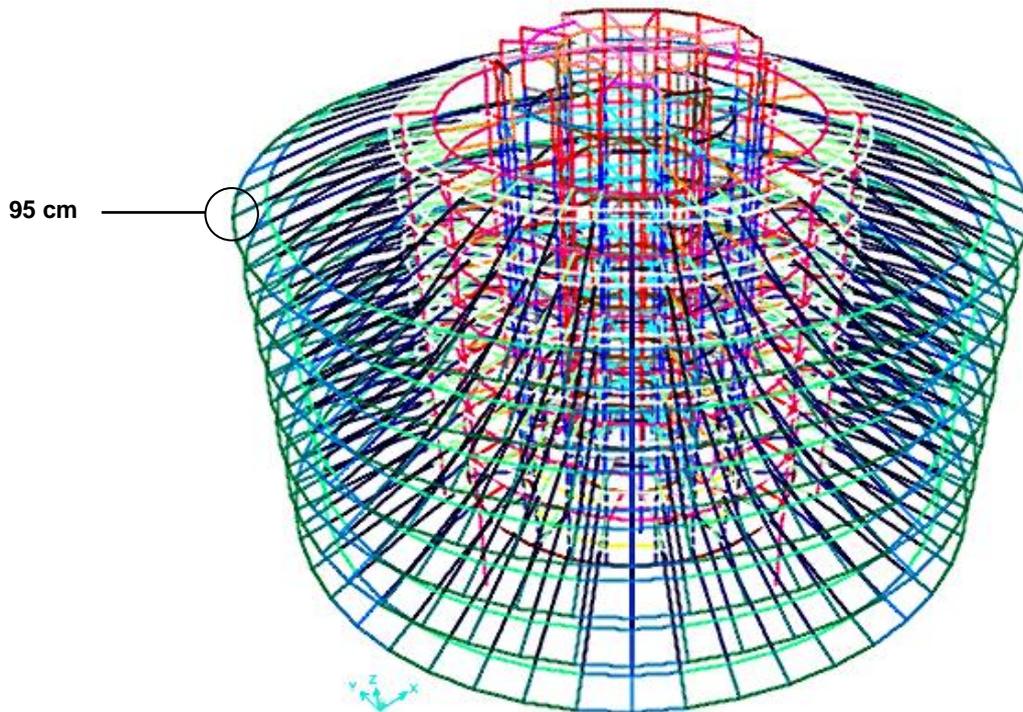


Figura 179 - Perspectiva de Deslocamento Elástico da estrutura, Combinação 4 (1,0G+1,0Q+1,0V).
 Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Analisando o diagrama dos esforços normais após a retirada do anel externo de pilares, observa-se uma grande concentração de carga nos pilares internos, na ordem de 4320 tf (figura 180).

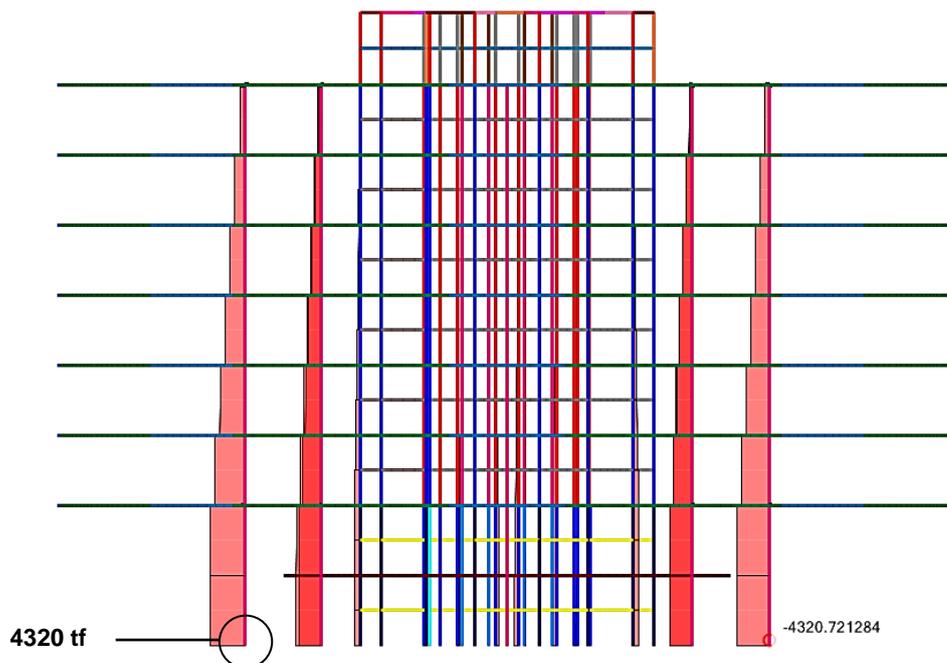


Figura 180 - Diagrama de Forças Normais com retirada do anel dos pilares externos, Combinação 2 (1,4G+1,4Q), bloco B, PGR. Fonte: Programa SAP 2000, desenho do autor.

Analisando sob o ponto de vista econômico, a solução tecnológica adotada na edificação atirantada resulta mais cara em termos de quantidade de aço e mão de obra qualificada.

O bloco B, convencional, adota soluções tecnológicas menos ousadas, permitindo uma economia em termos de volume de material preponderantemente utilizado (concreto).

4.2.8 Considerações finais

“Foi convencional por alguns instantes”

(José Humberto Matias de Paula)

A própria análise visual que permite o entendimento das estruturas existentes na natureza, cria um leque das possibilidades plásticas na concepção arquitetônica. As árvores do Planalto Central de Brasília, constituídas por uma estrutura portante central que sustenta os próprios galhos, remete ao conceito que foi gerado pelo gênio de Oscar Niemeyer durante o processo criativo da estrutura do bloco A.



Figura 181 - Mangueira do Planalto. Fonte: o autor.

Mesmo sendo topologicamente iguais, os volumes envidraçados que se erguem de forma monumental na via L4 Sul da capital brasileira, mostram duas tipologias estruturais diferentes, vertentes para um objetivo comum: *surpreender*.

A surpresa, determinada pela leveza do edifício A, participa da linguagem arquitetônica típica das obras do Oscar, flutuando no mar de Brasília, que se funde no infinito do céu da capital. Na produção de Oscar Niemeyer pode se apreciar algo que, além de ser decisivo para a qualidade da sua arquitetura, tem importantes repercussões para o ensino e a prática dos demais arquitetos: na maioria dos seus projetos é difícil separar a estrutura resistente da sua estrutura formal, uma se confunde com a outra.

Ou seja, estrutura formal e resistente são resolvidas ao mesmo tempo e não de forma cartesiana, como é comum que aconteça na prática profissional do arquiteto.

O conjunto da Procuradoria Geral da Republica demonstra a habilidade do arquiteto carioca em produzir duas edificações de igual volumetria, proporção e geometria, por meio de dois sistemas estruturais diferentes. Essa característica que sempre determinou a concepção arquitetônica do Oscar reflete a vontade de mostrar como a arquitetura não é simplesmente concreto e aço, pilares e vigas, linhas retas e curvas. Arquitetura é alimentada por paradigmas dicotômicos, plasticidade orgânica, vazios e cheios, ilusão e certeza, inusitado e formal. No período coincidente à concepção de Brasília, o tema dominante dos partidos adotados por Niemeyer, especialmente nos edifícios de valor monumental, se baseava no atendimento das questões plásticas, de perfeita concisão entre forma e estrutura. Oscar procurava orientar os seus projetos, caracterizando-os sempre que possível pela própria estrutura. Nunca baseada nas imposições radicais do funcionalismo arquitetônico, mas sim, na procura de soluções novas e variadas, se possível lógicas dentro do sistema estático. E isso, sem temer as contradições de forma com a técnica e a função, certo de que permanecem, unicamente, as soluções belas, inesperadas e harmoniosas.

Para Oscar Niemeyer a arquitetura não constitui uma simples questão de engenharia, mas uma manifestação do espírito, da imaginação e da poesia que arquitetura proporciona à vida humana, feita de instantes.

A Procuradoria Geral da Republica, símbolo do poder jurídico e da justiça, irradia a própria força através da beleza estética e da ousadia das suas formas.

O estudo e a análise dessa obra permitiram entender a dualidade existente no complexo arquitetônico, seja do ponto de vista estético, seja do ponto de vista estrutural.

Em termos quantitativos e qualitativos, pode-se ressaltar que o bloco A, ousado e arrojado, sofre grandes esforços de tração nos tirantes que sustentam os andares da edificação, elevado momento fletor nas vigas principais protendidas de cobertura e altos valores de compressão no núcleo central rígido.

A protensão das vigas principais, concebida durante o processo criativo da mente de Oscar Niemeyer e do engenheiro José Carlos Sússekind, permitiu que fosse combatido o deslocamento da estrutura e conseqüentemente que fosse garantido o equilíbrio estrutural arquitetônico dessa obra.

O bloco A, nascido convencional, apoiando em pilares metálicos provisórios, se elevou do terreno para alcançar uma dimensão simbólica divina, demarcada por uma leveza estrutural típica das tipologias da natureza.

De forma oposta, o bloco B, convencional, sofre grandes esforços de compressão nos pilares de concreto armado de alto desempenho, determinando-se

deslocamentos razoáveis nas lajes dos pavimentos participantes do conjunto arquitetônico.

As duas edificações nasceram iguais, foram parecidas, desenvolveram o mesmo comportamento ao longo das fases da construção, mas uma evoluiu de forma diferente, inesperada.

Apesar de tudo que já se escreveu sobre a obra do arquiteto, provavelmente ainda não tinha-se apontado uma das suas características mais salientes: a “universalidade” da sua arquitetura.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575 – Partes 1-6: Desempenho de Edifícios Habitacionais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6327 – Cabos de aço para uso geral – Requisitos mínimos**. Rio de Janeiro, 2004.

BERGER, H. **Form and function of tensile structures for permanent buildings**. Engineering Structures, Vol. 21, pp. 669-679, 1999.

BILLINGTON, D. P. **The tower and the bridge: the new art of structural engineering**. Princeton, Universidade de Princeton, 1983.

BIRNSTIEL, C. **Analysis and Design of Cable Structures**. Computer and Structures, Vol.2, 1972.

BORGES FILHO, Jonas Pinheiro. **Projeto de Tensoestruturas em Membrana com Aplicação de Programação Não-Linear**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

CAMPOFIORITO, I. **Olhares sobre o Moderno. Arquitetura, Patrimônio, Cidade**. Editora Casa da Palavra, 1991.

CARRIERI, Renato. **Estruturas: a resistência pela forma, à luz da produção contemporânea**. Tese (Doutorado), São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

COMAS, Eduardo Dias. **Precisões Brasileiras – sobre um estado passado da arquitetura e urbanismo modernos a partir dos projetos e obras de Lúcio Costa, Oscar Niemeyer, MMM Roberto, Afonso Reidy, Jorge Moreira & Cia, 1936-1945**. Tese (Doutorado), Universidade de Paris VIII, Paris, França, 2002.

COSTA, L. **A Obra de Oscar Niemeyer**, prefácio ao livro de Stamo Papadaki, *The Work of Oscar Niemeyer*, texto republicado em A. Xavier (org.), Lúcio Costa: Sobre Arquitetura, 1950.

DE MIRANDA, F. **I ponti strallati di grande luce**. Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma, 1980.

DURAND, J. C; SALVATORI, E. **Por uma nova agente de pesquisa em torno de Oscar Niemeyer**. Arqitextos, São Paulo, 2011.

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

FAY, L. **Estruturas Arquitetônicas Composição & Modelagem**. Apostila IT829. Rio de Janeiro, 2006.

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 (Mestrado), Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2007.

FREIRE, C. **Além dos Mapas: Os Monumentos no Imaginário Urbano Contemporâneo**, São Paulo, Annablume, 1997.

GALIMI, S., CAMANHO C. **Methodology of identification and inspection of pathologies in residential multi-story buildings: a case study**. XII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Porto, 2016.

GEDION, S. **Espaço, Tempo e Arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

GONÇALVES, Simone Neiva Loures. **Museus projetados por Oscar Niemeyer de 1951 a 2006: o programa como coadjuvante**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

GOODWIN, Phillip L. **Brazil Builds: Architecture new and old: 1652-1942**. New York: Museu de Arte Moderna, 1943

INOJOSA, L. **O sistema estrutural na obra de Niemeyer**. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília, 2010.

INOJOSA, Leonardo da Silveira Pirillo. BUZAR, Márcio Augusto Roma. DE GREGÓRIO, Marcos Henrique Ritter. **Museu Nacional de Brasília: Reflexões sobre a Interação Arquitetura x Estrutura**. Revista Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo, Volume nº 15, Brasília, Julho de 2015.

LAMERS-SCHÜTZE, P. **Teoria da arquitetura: do Renascimento até aos nossos dias**. Lisboa, Taschen, 2006.

LE CORBUSIER, J. **Verso un'architettura**. Milano, Longanesi, 1973.

LEYENDECKER DE ANDRADE, Luana; LUNA DE MELO, Carlos Eduardo. **Histórico do concreto em Brasília. Uma visão sobre a estrutura de obras em concreto armado na Capital**. Arqtextos, São Paulo, ano 14, n. 161.02, Vitruvius, out. 2013.

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

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

NIEMEYER, Oscar. **A catedral de Brasília**. Módulo, v.2, n.11, p.8-9, dez.1958.

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

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

NIEMEYER, Oscar. **Palácio do Planalto e Palácio do Supremo Tribunal**. Módulo, Rio de Janeiro, v.2, n.10, p.8, ago.1958.

NIEMEYER, Oscar; CALVO, Aldo. **Teatros oficiais no Setor Cultural de Brasília**. Módulo, Rio de Janeiro, v. 3, n. 17, p. 5-6, abr. 1960.

NORMA, Evenson. **Two Brazilian Capitals: Architecture and Urbanism in Rio de Janeiro and Brasília**. New Haven and London, Yale University Press, 1973.

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

OLIVEIRA, Romulo Andrade de. **Brasília e o paradigma modernista: planejamento urbano do moderno atraso**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

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

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

SALVADORI, Mario G. **Structure in Architecture: The Building of Buildings**. Prentice Hall, 1963.

SÁNCHEZ, José Manoel Morales. **Notas de aula** - curso de Mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília PPG-FAU – 2014.

SANTOS, J. A. **Fundações por estacas. Ações Verticais. Elementos teóricos**. Obras Geotécnicas, Instituto Superior Técnico, 2008.

SEGRE, R., revista aU, ano 28, nº226, Janeiro de 2013, Pini editora, Pag. 48.

SHAEFFER, R. E. et al. **Tensioned fabric structures: a practical introduction**. 1. Ed. Preparado pelo Task Committee on Tensioned Fabric Structures do Technical Committee on Special Structures do Technical Administrative Committee on Metals of Structural Division of American Society of Civil Engineers (ASCE). 1996.

SOLOT, Denise, Paulo Mendes da Rocha. **Estrutura: êxito da forma**. Editora Viana e Mosley, Rio de Janeiro, 2004.

SOUZA, Deise. **A estrutura do Teatro Nacional Claudio Santoro em Brasília**. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília, 2009.

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

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de análise estrutural**. Volume I. Editora Globo, 6ª edição, Porto Alegre, 1981.

TRINIDADE, Carlos Jorge da Silva Rente. **Análise estática e dinâmica geometricamente não linear de estruturas atirantadas**. Dissertação (Mestrado). Porto: Universidade do Porto, 1994.

UCHIGASAKI, Tsuruko. **Uma leitura do complexo arquitetônico da Procuradoria Geral da República: redescobrimo o barroco ao olhar uma obra de Oscar Niemeyer**. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília, 2006.

VALLE, Marco Antonio Alves do. **Desenvolvimento da forma e procedimentos de projeto na arquitetura de Oscar Niemeyer (1935-1998)**. Tese (Doutorado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.

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

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

Documentários:

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

Sites Pesquisados:

Archdaily – www.archdaily.com.br

Blog do Pet Civil – www.blogdopetcivil.com

Fundação Oscar Niemeyer - www.niemeyer.org.br

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

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

Panoramio – www.panoramio.com

Skyscrapercity - www.skyscrapercity.com

Som – www.som.com

Techne Pini – www.techne.pini.com.br

Tensi Net – www.tensinet.com

Vitruvius – www.vitruvius.com.br

Wikimedia – www.upload.wikimedia.org

Wikipedia – www.wikipedia.it