

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

**A PONTE DE OSCAR NIEMEYER EM BRASÍLIA:
CONSTRUÇÃO, FORMA E FUNÇÃO ESTRUTURAL**

ROGER PAMPONET DA FONSECA

Brasília

2007

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

**A PONTE DE OSCAR NIEMEYER EM BRASÍLIA:
CONSTRUÇÃO, FORMA E FUNÇÃO ESTRUTURAL**

ROGER PAMPONET DA FONSECA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, UnB.

Orientador: Prof. Dr. José Manoel Morales Sánchez

Brasília

2007

TERMO DE APROVAÇÃO

ROGER PAMPONET DA FONSECA

A PONTE DE OSCAR NIEMEYER EM BRASÍLIA: CONSTRUÇÃO, FORMA E FUNÇÃO ESTRUTURAL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, UnB

Data de defesa: 16 de outubro de 2007

Orientador:

Prof. Dr. José Manoel Morales Sánchez

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio José Pinheiro Villar de Queiroz

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB

Prof. Dr. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil PUC-Rio

Brasília, 2007

Aos meus familiares em especial a meu pai e mãe,
que me permitem realizar sonhos e desejos.

AGRADECIMENTOS

O resultado de um objetivo alcançado reflete o apoio de inúmeras pessoas que acreditaram em nosso trabalho. Essas pessoas nos apoiaram nos momentos difíceis e compartilharam com generosidade seus conhecimentos para conseguirmos alcançar nossas metas e ideais, por isso, gostaria de agradecê-las.

Aos meus queridos pais Léa e Ruy, e aos irmãos Mari, Ruyzinho, Mila por todo o apoio e motivação para a realização desse trabalho. A nossa família é base de toda minha personalidade, tenho um pouco de todos vocês na definição de meu caráter. À minha avó Marina por quem possuo um enorme afeto.

Em especial, ao meu irmão Régis que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos de minha vida, me fazendo encontrar forças para enfrentar as dificuldades e encontrar alegrias para percorrer a vida.

Meu orientador professor doutor José Manoel Morales Sánchez pela dedicação e contribuição a esta dissertação, pelo diálogo criativo que foi possível, ao longo dessa trajetória, o que também contribuiu para que o processo de escrita fosse menos solitário e que a arquitetura pudesse ser estruturada em novas e interessantes teorias.

Aos amigos que fiz no mestrado, que com diferentes interesses acadêmicos contribuíram para meu crescimento como pessoa, como profissional e arquiteto. Ana Flávia, Eduardo, Joene, Joana, Milena e Pedro Paulo grandes amigos que levarei para sempre em meu pensamento. Aos meus amigos de casa que sempre torceram por mim e me incentivaram nessa etapa.

Aos professores Marcio Buzar, Paulo Castilho e Cláudia Estrela que me permitiram compreender melhor a “tecnologia” na arquitetura e encontrar meu caminho como pesquisador. Aos servidores da secretaria do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da FAU/UnB, João, Júnior e Raquel pela paciência e por toda ajuda.

À minha vizinha Elizabeth que me recebeu como um amigo e conseguiu diminuir a lacuna que a falta de uma família representa.

RESUMO

A arquitetura brasileira deu grandes passos nos últimos 70 anos, onde no seu percurso evolutivo grande parte de sua qualidade e força plástica pode ser atribuída a Oscar Niemeyer que tomou a dianteira no campo da criação arquitetônica, dando a cada novo projeto uma contundente expressividade. Niemeyer é considerado um dos maiores arquitetos brasileiros, isso é reflexo tanto da quantidade de obras construídas quanto da grande quantidade de produções teóricas, esses dois elementos, permitem a realização de inúmeros estudos por parte da prática acadêmica.

No estudo de sua produção teórica, fica evidente que o arquiteto sempre buscou uma integração entre a concepção estrutural e plástica para o surgimento de sua arquitetura. Considerando essa convergência, esse trabalho busca analisar a importância da concepção estrutural na qualidade plástica da obra de Niemeyer, esse estudo fica mais evidente se focado em uma obra onde a conexão entre arquitetura e estrutura pode ser descrita com grande precisão e rigor, a Ponte Costa e Silva, em Brasília.

Para tal, fez-se inicialmente um levantamento histórico da concepção arquitetônica do objeto, sua construção e peculiaridades para a conclusão, permitindo a catalogação de mais uma obra do arquiteto. Em seguida, realizou-se uma análise da concepção estrutural como partido para a qualidade plástica com o uso da ferramenta computacional FTOOL, que nos permitiu uma análise qualitativa evidenciando o grande entendimento estrutural do arquiteto e como esse conhecimento foi refletido para propiciar uma obra arquitetônica de melhor acordo com suas imposições tecno-estáticas.

Com os resultados foi possível compreender as vantagens de uma interpolação entre arquitetura e estrutura e como o arquiteto pode tirar partido dessa ferramenta para elaborar uma arquitetura mais conivente com a sujeição às cargas e pleno equilíbrio estrutural.

ABSTRACT

The Brazilian architecture has evolved substantially in the last seventy years resulting in an evolutive journey. One could say that a great part of the Brazilian architecture's quality and plastic force can be attributed to Oscar Niemeyer, who took the lead in the field of architectural creation, giving to each new project a blast of expressiveness. Niemeyer is considered one of best architects in Brazil, not only because of the volume of his work, but also because his innumerable theoretical outputs. These two elements combined permit the realization of innumerable studies by academics.

In the study of theoretical application, it is evident that Niemeyer has always sought integration between the structural conception and plastic for the development of his architecture. Considering this statement, this piece aspires to analyze the importance of the structural conception in the plastic quality of the work of Niemeyer. This study is more evident if focused in a work where the connection between architecture and structure are described with precision and exactitude; the Costa e Silva Bridge, in Brasilia.

To accomplish such endeavor, a historical investigation of the architectural conception of the above named masterpiece was performed, as well as a historical research of its construction, peculiarities and finally, its conclusion. This work has also allowed the cataloguing of another Niemeyer's masterpiece.

The second step was to analyze the structural conception as the foundation for the plastic quality with the implementation of the computerized tool FTOOL, which has allowed us to make a qualitative analysis and consequently demonstrate the vast structural understanding of Niemeyer's knowledge and how this knowledge was reflected to provide an architectural work in better agreement with techno static impositions.

With the findings of this piece, it was possible to understand the advantages of an interpolation between architecture and structure, and how an architect can benefit from this tool to elaborate an architecture better subjective to loads and a full structural equilibrium.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONTEXTO DO TEMA DA DISSERTAÇÃO	1
1.2 - DESIGN DE PONTES	2
1.3 - DESIGN ESTRUTURAL COMO OBRA DE ARTE	5
1.4 - A OBRA DE OSCAR NIEMEYER EM BRASÍLIA	8
1.5 - CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	11
2 - A CONSTRUÇÃO DA PONTE DE OSCAR NIEMEYER	14
2.1 - INTRODUÇÃO	14
2.2 - CONCEPÇÃO E PROJETO	15
2.3 - A CONSTRUÇÃO – PROJETO EXECUTIVO	20
2.4 - O ACIDENTE DA CONSTRUÇÃO	27
2.5 - O REFORÇO ESTRUTURAL	37
2.6 - CONCLUSÃO	46
3 - FORÇAS INTERNAS E FORMA	49
3.1 - INTRODUÇÃO	49
3.2 - RELAÇÃO ENTRE A FORMA ARQUITETÔNICA E ESTRUTURAL	51
3.3 - FUNÇÃO ESTRUTURAL NA ARQUITETURA	54
3.4 - A RELAÇÃO DOS ESFORÇOS COM A FORMA	57
3.5 - TRANSPARÊNCIA DOS ESFORÇOS RESULTANDO NA FORMA	69
3.6 - DO ÂNGULO RETO À FORMA LIVRE	76
3.7 - FORÇAS INTERNAS E AS CURVAS DE NIEMEYER	77

3.8 - COMENTÁRIOS FINAIS	84
4 - ANÁLISE DA FORMA ESTRUTURAL	86
4.1 - INTRODUÇÃO	86
4.2 - GEOMETRIA DA PONTE	87
4.3 - AVALIAÇÃO ESTRUTURAL QUALITATIVA	103
4.4 - ANÁLISE ESTRUTURAL QUALITATIVA DA PONTE UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	106
4.5 - A RAZÃO DA LEVEZA	122
4.6 - COMENTÁRIOS FINAIS	129
5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	131
5.1 - INTRODUÇÃO	131
5.2 - FORMA E FUNÇÃO ESTRUTURAL	132
5.3 - CONCLUSÕES	134
5.4 - TRABALHOS FUTUROS	135
REFERÊNCIAS	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados da Ponte Costa e Silva. (Fonte: Correio Braziliense, 1976).	45
Tabela 4.1 – Resultados dos momentos máximos positivos e negativos encontrados na relação dos vãos. (Fonte: Microsoft Excel,2007).	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Visão lateral da Ponte Costa e Silva. Fonte: (Foto do autor, 2006).	15
Figura 2.2 – Ponte da Academia, croqui Niemeyer. Fonte: (CORONA, 2001).	17
Figura 2.3 – Imagem de Satélite. Fonte: (Google Earth, retirado do programa em 12/09/2007).	18
Figura 2.4 – Nota de próprio punho de Niemeyer na planta da ponte. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969-1971).	19
Figura 2.5 – Ponte Costa e Silva. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).	20
Figura 2.6 – Montagem fotográfica com a proposta original da posição da Ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).	21
Figura 2.7 – Flagrante de assinatura do contrato da construção da ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).	22
Figura 2.8 – Sondagens S01 e S06. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1969-71).	23
Figura 2.9 – Início das obras da ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).	26
Figura 2.10 – Tubulões centrais da ponte já concretados e finalizados. Fonte: (Correio Braziliense, 1970).	27
Figura 2.11 – Localização dos pilares conforme proximidade com as margens. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	27
Figura 2.12 – Arrumação dos cabos sobre os flutuadores. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1970).	29
Figura 2.13 – Separação dos cabos em diferentes camadas, para a correta arrumação sobre os flutuadores. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1970).	30
Figura 2.14 – Disposição dos cabos de protensão. Foto: (ODC, 1975 apud VASCONCELOS, 1985).	30
Figura 2.15 – Panorama das obras no momento de paralisação, Pilar P1. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).	34
Figura 2.16 – Pilar P2, momento da paralisação das obras. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).	34
Figura 2.17 – Ponte da Graças. Fonte: (Foto do autor, 2007).	35

Figura 2.18 – Obras da Ponte Costa e Silva totalmente paralisadas. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).	36
Figura 2.19 – Panorama das obras paralisadas. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).	36
Figura 2.20 – Comparação entre os sistemas contrutivos. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	37
Figura 2.21 – Esquema de colocação da laje central metálica da ponte Costa e Silva. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).	38
Figura 2.22 – Esquema do reforço dos pilares da ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).	39
Figura 2.23 – Detalhe da solução de reforço das fundações adotada para a ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).	40
Figura 2.24 – Engenheiros explicam com maquete o método adotado para permitir a conclusão da ponte em visita do Governador na data 19/09/74. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1974).	42
Figura 2.25 – Visita do Governador Elmo Serejo do Distrito Federal para verificação do projeto de reforço da estrutura da Ponte na data 19/09/74. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1974).	42
Figura 2.26 – Trecho em estrutura metálica da Viga Gerber, 16/01/76. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).	43
Figura 2.27 – Vão central às vésperas de ser fechado e concluído, 16/01/76. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).	44
Figura 2.28 – Ato solene de inauguração da Ponte. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).	45
Figura 2.29 – Logo após a inauguração, a ponte é aberta ao tráfego. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).	45
Figura 3.1 – A trave de pedra se encontra em todas as culturas. Fonte: (SIEGEL, 1966).	55
Figura 3.2 – O membro estrutural vertical necessita de um fuste maciço de acordo com o desenvolvimento estrutural da linha de forças. Fonte: (SIEGEL, 1966).	56
Figura 3.3 – A forma estrutural “correta” deve possuir uma relação com a escala da construção. Fonte: (SIEGEL, 1966).	57
Figura 3.4 – O apoio em V no estilo gótico. Fonte: (SIEGEL, 1666).	58

Figura 3.5 – A forma natural da árvore. Fonte: (SIEGEL, 1966).	59
Figura 3.6 – A forma em V das pernas dos móveis. Fonte: (SIEGEL, 1966).	60
Figura 3.7 – A cadeira como analogia ao pórtico. Fonte: (SIEGEL, 1966).	60
Figura 3.8 – Pórtico duplamente articulado. Fonte: (SIEGEL, 1966).	61
Figura 3.9 – A união rígida dos membros, trave e apoios. Fonte: (SIEGEL, 1966).	61
Figura 3.10 – A relação de semelhança entre vigas e pórticos. Fonte: (SIEGEL, 1966). Manuscrito: Prof. Ernesto Walter.	62
Figura 3.11 – As distintas relações de um pórtico duplamente articulado. Fonte: (SIEGEL, 1966).	63
Figura 3.12 – A diferença entre a casa com estrutura em pedra e estrutura em concreto armado. Fonte: (LE CORBUSIER, 2004).	65
Figura 3.13 – Edifício da UNESCO, em Paris. Fonte: (SIEGEL, 1966).	67
Figura 3.14 – Edifício de Marselha, Le Corbusier. Fonte: (SIEGEL, 1966).	68
Figura 3.15 – Fábrica de Papel Sociedade Burgo. Fonte: (Yoshito Isono, 1995).	70
Figura 3.16 – Seção da Fábrica de Papel. Fonte: (SHARP, 1973).	70
Figura 3.17 – Gráfico do esquema de forças de tração e compressão. Fonte: (HOLGATE, 1986).	70
Figura 3.18 – Diagrama do momento fletor da estrutura proposta por Nervi. Fonte: (REBELLO, 2006).	70
Figura 3.19 – Seção longitudinal do projeto proposto por Utzon . Fonte: (SANDAKER, 1992).	71
Figura 3.20 – Momentos de flexão de coberturas plissadas. Fonte: (SANDAKER, 1992).	71
Figura 3.21 – Maquete do edifício administrativo e gráfico do momento fletor. Fonte: (BOGÉA, 2006).	72
Figura 3.22 – Cobertura em arco das plataformas. Fonte: (Diana Schreieck, 2004).	73
Figura 3.23 – Seção transversal da cobertura. Fonte: (DETAIL, 2005).	73
Figura 3.24 – Gráfico do momento fletor da estrutura proposta, a forma arquitetônica seguindo a função estrutural. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	73
Figura 3.25 – Banco Hong Kong e Shangai. Fonte: (FOSTERANDPARTNERS, 2007).	74

Figura 3.26 – Gráficos de momento fletor, barra biapoiada e com balanços simétricos. Fonte: (BOGÉA, 2007).	75
Figura 3.27 – Gráficos de momento fletor, barra responsável pelo comportamento da estrutura do Banco de Hong Kong e Shanghai. Fonte: (BOGÉA, 2007).	75
Figura 3.28 – Fotos do Anexo do late Clube de Pampulha. Fonte: (BOTEY, 1997).	79
Figura 3.29 – Clube atualmente. Fonte: (PIC PAMPULHA, 2006).	79
Figura 3.30 – Gráfico momento fletor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	80
Figura 3.31 – Gráfico momento fletor correspondendo a forma. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	81
Figura 3.32 – Elevação esquemática. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	81
Figura 3.33– Maquete Touring Club de Brasília. Fonte: (NIEMEYER, 1962).	82
Figura 3.34 – Corte Touring Club de Brasília. Fonte: (GDF – SVO – DAU – DA, 1983).	83
Figura 3.35 – Estação Estácio de Sá do Metro do Rio de Janeiro. Fonte: (WISSEMBACH, 1981).	84
Figura 4.1 – Croqui Niemeyer, proteção dos passeios laterais da ponte servindo como bancos de contemplação do lago. Elevação e corte. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	88
Figura 4.2 – Croqui Niemeyer. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	88
Figura 4.3 – Digitalização do projeto original de Oscar Niemeyer para a ponte Monumental sobre o Lago Paranoá. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	89
Figura 4.4 – Elevação Geral. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	92
Figura 4.5 – Locação Fundações. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	92
Figura 4.6 – Corte Longitudinal. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	93
Figura 4.7 – Corte Transversal. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	93
Figura 4.8 – Fases da Construção. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	94
Figura 4.9 – Comparação das geometrias. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	95
Figura 4.10 – Batimetria. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	96
Figura 4.11 – Seção Longitudinal da ponte. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	96
Figura 4.12 – Foto panorâmica da Ponte Costa e Silva no contexto urbano de Brasília. Fonte: (Foto do autor, 2007).	97

Figura 4.13 – Ponte Costa e Silva no Lago Paranoá. Fonte: (Foto do autor, 2007).	97
Figura 4.14 – Ponte Costa a Silva. Fonte: (Foto do autor, 2006).	98
Figura 4.15 – Ponte Costa e Silva. Fonte: (Foto do autor, 2007).	98
Figura 4.16 – Ponte Costa e Silva, imagem aérea. Fonte: retirada do site www.infobrasilia.com.br (Augusto Areal, 2007).	99
Figura 4.17 – Ponte Costa e Silva com a vista do Lago Sul. Fonte: retirada do site www.infobrasília.com.br (Augusto Areal, 2007).	99
Figura 4.18 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos. Fonte: (Foto do autor, 2007).	100
Figura 4.19 – Ponte Costa e Silva, detalhes construtivos. Fonte: (Foto do autor, 2007).	100
Figura 4.20 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos. Fonte: (Foto do autor, 2007).	101
Figura 4.21 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos. Fonte: (Foto do autor, 2007).	101
Figura 4.22 – Ponte Costa a Silva, imagem lateral com a escala humana. Fonte: (Foto do autor, 2007).	102
Figura 4.23 – Ponte Costa a Silva, detalhe de um dos pilares com a Ponte JK ao fundo. Fonte: (Foto do autor, 2007).	102
Figura 4.24 – Análise de viga reta transpondo o vão total. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	104
Figura 4.25 – Resultado gráfico do momento fletor para a viga reta sem apoios intermediários. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	105
Figura 4.26 – Análise da viga reta com os vãos do projeto de Niemeyer. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	105
Figura 4.27 – Resultado do gráfico dos esforços de Momento Fletor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	105
Figura 4.28 – Resultado formal obtido ao se inverter o gráfico de momento fletor. Fonte: (Photoshop, 2007).	105
Figura 4.29 – Denominação dos vãos, desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	106
Figura 4.30 – Diagramas de momentos fletores de acordo com a respectiva variação de vãos. Desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	107
Figura 4.31 – Diagramas de momentos fletores de acordo com a respectiva variação de vãos. Desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	108

Figura 4.32 – Gráfico de momentos máximos positivos e negativos. Fonte: (MICROSOFT EXCEL, 2007).	109
Figura 4.33 – Gráfico sobreposição dos valores de momentos. Fonte: (MICROSOFT EXCEL, 2007).	110
Figura 4.34 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga distribuída unitária, representando o peso próprio da estrutura. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	111
Figura 4.35 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga concentrada. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	113
Figura 4.36 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	113
Figura 4.37 – Desenho da linha de média em azul e dos trechos das seções. Fonte: (CAD, 2007).	114
Figura 4.38 – Imagem da área de Propriedades da Seção do programa FTOOL. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	115
Figura 4.39 – Ambiente gráfico do programa FTOOL. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	115
Figura 4.40 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga distribuída, representando o peso próprio da estrutura. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	116
Figura 4.41 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga distribuída, representando o peso próprio da estrutura com rótulas representando a viga Gerber. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	118
Figura 4.42 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	119
Figura 4.43 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	120
Figura 4.44 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	121
Figura 4.45 – Corte Longitudinal. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	123
Figura 4.46 – Gráfico dos esforços. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	124
Figura 4.47 – Gráfico dos esforços. Fonte: (FTOOL, 2007).	124
Figura 4.48 – Gráfico dos esforços. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	125

Figura 4.49 – Gráfico dos esforços de momento fletor para a viga arqueada. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).	126
Figura 4.50 – Elevação da Ponte JK, trechos dos arcos com os estais. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).	127
Figura 4.51 – Detalhamento de um dos arcos. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).	127
Figura 4.52 – Elevação dos estais. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).	127
Figura 4.53 – Comparação entre as pontes e a razão dos vãos com as alturas. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969) e (VIA DRAGADOS, 2002).	128
Figura 4.54 – Fase da Construção 03. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).	128
Figura 4.55 – Foto do sistema de montagem e construção da Ponte JK. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).	128

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONTEXTO DO TEMA DA DISSERTAÇÃO

O escopo deste tema de dissertação se insere na área de conhecimento denominada Concepção Estrutural, onde encontramos as razões fundamentais que determinam o tipo estrutural adotado pela obra. O cálculo estrutural é uma ferramenta para constatar se as formas e dimensões projetadas estarão aptas para suportar as cargas que determinadas estruturas estarão submetidas, e a concepção estrutural consiste em escolher um sistema estrutural que constitua a parte resistente do edifício (TORROJA, 1976).

O processo criativo de toda obra arquitetônica pode ser dividido, basicamente, em duas etapas: a primeira etapa consiste na *concepção espacial*, na qual busca as formas que definem os limites físicos, moldando o espaço, e a segunda é referente à *concepção das formas estruturais*, sendo um processo de idéias, conceitos e intenções, expressas de forma gráfica, para resultar em formas que possam ser construídas (TREMARI, 1993 e GIEDION, 2004). Na arquitetura o primeiro processo está tão intimamente ligado à profissão que o segundo acaba sendo abordado de maneira superficial ou de forma errada. O entendimento qualitativo acaba sendo suprimido pelo quantitativo (REBELLO, 2000).

No repertório construtivo, podemos encontrar nas pontes os exemplos de construções onde a concepção espacial é bem mais simples que a concepção estrutural. A função da ponte de ligar determinados pontos, e vencer o vão da forma mais eficaz demonstra que, para esse tipo de construção, a função estrutural é parte dominante e a espacial mero resultado formal, conseqüentemente, a elaboração dos projetos de pontes, quase sempre acabaram sendo realizados por engenheiros, alguns conseguiram aliar à sua concepção formal valores estéticos (BILLINGTON, 2003).

Apesar de historicamente o arquiteto ter se afastado em sua formação acadêmica do entendimento profundo das ciências físicas e matemáticas, a concepção estrutural e intuitiva deve fazer parte de seu repertório (GAMA, 1986 e GRAEFF, 1995). A concepção estrutural e o resultado formal devem ser propostos e determinados pelo arquiteto, é nessa etapa que ele é o coordenador do projeto, a concepção espacial é de seu domínio, e o estrutural também o deve ser, mesmo que de forma qualitativa. Ao se deparar com

problemas estruturais quantitativos, o arquiteto deve procurar um profissional que possui em sua formação total entendimento para essa aferição, o engenheiro.

Na arquitetura brasileira, Oscar Niemeyer merece destaque por apresentar em suas obras configurações plásticas apontadas por diversos autores como obras de arte e diversas soluções estruturais inovadoras. O arquiteto sempre teve ao seu lado engenheiros como Joaquim Cardozo e José Carlos Sussekind, sendo por ele, sempre referenciados, como estimados colaboradores. O enfrentamento dos desafios estruturais propostos em suas obras estabeleceu o diálogo entre arquitetura e engenharia. Para Niemeyer, estrutura e arquitetura se completam, “*nascem juntas no traço arquitetural*” demonstrando o estreito relacionamento entre arquitetura e engenharia. “*(...) terminadas as estruturas, a arquitetura estava sempre presente (...)*”. (NIEMEYER, 1978). Com essas considerações, a função estrutural pode ser responsável pelo resultado formal de sua obra.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um estudo da função estrutural como resultado formal. Pretende-se analisar se a função estrutural encontrada na Ponte de Oscar Niemeyer para o Lago Paranoá em Brasília, pode ser justificada como resultado formal.

1.2 - DESIGN DE PONTES

Pontes podem ser definidas simplesmente como construções que ligam dois pontos separados por algum obstáculo, com ideal sujeição às cargas e pleno equilíbrio estrutural. Nos dicionários, enciclopédias e na literatura específica encontramos definições e sentidos diversos para essa construção que provê ligação de forma mais rápida e fácil.

As pontes têm sido, através dos tempos, motivo de fascínio e orgulho de seus usuários e construtores, além de serem referencial demonstrativo do desenvolvimento de um povo ou comunidade. Podem ser consideradas, também, como uma das estruturas que tem maior relação com tecnologia e desenvolvimento, tanto científico quanto formal.

A estrutura de uma ponte apresenta o uso e a escala bem definidos, o uso é determinado pela função de prover ligação e a escala é determinada pelo vão que se pretende vencer. O design de uma ponte é determinado pelo meio em que se pretende vencer esse vão, podendo ser pela *força* ou pela *forma*.

As soluções primitivas de dispor uma madeira para atravessar determinado obstáculo marcam o início do sistema de vencer o vão pela força, onde não existia nenhum projeto complexo e nem idéia do comportamento da transferência de cargas. Esse sistema consistia no uso de uma peça retilínea cuja altura na seção transversal garantiria suportar os pesos e as cargas para a travessia de pessoas e animais.

Atualmente a maneira mais simples e econômica de se vencer um vão, é através do uso de vigamentos retos. A partir desta concepção podem ser utilizados diversos materiais como madeira, aço, concreto armado e concreto protendido. As forças aplicadas são transferidas através da estrutura de uma maneira muito simples, as cargas são transferidas verticalmente aos pilares. A estrutura é projetada para suportar tanto as forças de compressão quanto de tração, assim a parte superior trabalha em compressão e a inferior por tração (PFEIL, 1983). Na elaboração de uma estrutura com esse design, as estruturas em aço sempre tiveram vantagens, pois as vigas em aço conseguem suportar tanto os esforços de tração quanto os de compressão. No caso do concreto, ele deve ser armado para suportar os esforços de tração.

Ao se pensar em vencer o vão pela forma, encontramos nas estruturas com formas parabólicas o resultado mais natural e intuitivo, embora as pontes com vigas retas sejam as pontes com formas mais simples, as pontes em arco possuem em sua forma elementos mais interessantes e originais, além de proporcionarem a capacidade de vencer vãos maiores.

A transferência das cargas em uma forma parabólica é mais dinâmica que nas outras formas, o sistema em arco trabalha somente à compressão, e as forças de tração são muito pequenas e insignificantes. Portanto, o tipo de material a ser utilizado deve corresponder diretamente a esses critérios, sendo os mais utilizados a pedra e o concreto. Conforme as cargas são transferidas internamente na estrutura, elas possuem componentes horizontais e verticais nos apoios. Conseqüentemente os apoios devem ser calculados para suportar essas componentes decompostas das forças diagonais (PFEIL, 1983).

Com o mesmo princípio de se vencer o vão pela forma é que encontramos o design de pontes suspensas por cabos, podendo ser pontes pênséis e estaiadas.

A ponte pênsil possui o mesmo formulário estrutural de uma ponte em arco, só que de forma invertida e possuem grande vantagem por conseguir vencer vãos muito longos e sem a necessidade de um apoio intermediário. As pontes estaiadas são semelhantes às pontes

pênséis, a configuração visual e geométrica de sua estrutura possui similaridades, mas, no entanto, o mecanismo de transferência de cargas é diferente.

Para se projetar uma ponte executável, é necessário que o projetista tenha um conhecimento extensivo das possibilidades existentes para o seu projeto, e não só apenas as possibilidades de como se vencer um vão.

A história nos demonstra, em determinados momentos, que certos construtores possuíram a capacidade de ir além das soluções convencionais, e puderam fornecer com suas intuições e criatividade, novas formas e inovações (BENEVOLO, 1998 e FRAMPTON, 2000).

Thomas Telford (1757 – 1834), um engenheiro inglês, utilizou o ferro fundido em pontes com arcos bem mais abatidos do que as pontes de ferro em arco pleno. Essa vanguarda formal e construtiva assumida por Telford só foi possível porque ele refletiu sobre o novo material em novas formas e não repetiu antigas formas estruturais para o novo material. O peso próprio da estrutura era até então a carga mais significativa, mas, com o advento das locomotivas, surgia então uma carga acidental e dinâmica e a estrutura não poderia mais ser em arcos de ferro fundido, que, como a pedra e alvenaria, resistem muito bem apenas à compressão, era necessária uma nova forma que correspondesse diretamente a essa nova função dinâmica.

Diferentes personagens pensaram em novas formas para essa necessidade. Os engenheiros Thomas Telford (1757 – 1834), Isambard Kingdom Brunel (1806 – 1859) e John Augustus Roebling (1806 – 1869) encontraram na forma de ponte pênsil a melhor solução, e podemos constatar nas pontes de Menai, Clifton e Brooklyn, respectivamente, seus melhores exemplos. Gustave Eiffel (1832 – 1923) encontrou nas pontes em arco crescente o melhor casamento entre forma mais bela, útil e eficaz. Suas pontes possuem variação tridimensional, conferindo à nova forma um destaque superior perante as outras pontes em arco do mesmo período.

O engenheiro civil, Othmar Ammann (1879 – 1965) em 1931, foi outro importante personagem no uso de novas formas em pontes. Após a construção de sua espetacular ponte pênsil George Washington, em Nova Iorque, Ammann decide construir uma ponte em forma de arco que chegasse ao mesmo limite imposto pela ponte anterior. Ao elaborar a sua ponte Bayonne, que provê a ligação entre Nova Jersey e Staten Island, ele coloca a distância do banzo superior e inferior menor no centro do que nas pontas, demonstrando

que a força existente nesse local é menor que nas extremidades, em outras palavras a força da estrutura está na forma (BILLINGTON, 1983).

Nas primeiras construções de pontes em concreto armado, eram escolhidos os mesmos sistemas construtivos e de design adotados para a madeira e o ferro. Novamente um construtor se destaca ao inovar no design de suas formas. O engenheiro suíço Robert Maillart (1872 – 1940) conquistou grande prestígio ao elaborar suas pontes em arcos articulados, somente com elementos responsáveis pelas funções estruturais e eliminando tudo o que não era funcional. Assim suas pontes não possuíam arcos sólidos, pilastras robustas ou exagerados apoios maciços das pontes em concreto armado usuais. Maillart conferia a seu design novos valores estéticos – através da transparência e da leveza – além de despir a estrutura de qualquer disfarce (GIEDION, 2004).

No design de pontes deve-se perceber que a forma estrutural controla a força, e quanto mais claramente o designer consegue entender isso, mais seguro ele se tornará da forma escolhida, contribuindo, conseqüentemente para a criação de novas formas estruturais e de um novo panorama formal na arquitetura.

1.3 - DESIGN ESTRUTURAL COMO OBRA DE ARTE

Segundo o dicionário Houaiss, a definição original e abrangente de arte (do latim ars, significando “técnica” ou “habilidade”) é o produto ou processo em que o conhecimento é usado para realizar determinadas habilidades; o sentido moderno do termo está associado às atividades artísticas e aos produtos desta atividade artística. O que poderia ser o produto final da manipulação humana sobre uma matéria-prima qualquer.

Se colocarmos esse pensamento para o design das estruturas, constataremos que para ser encarada como obra de arte, a estrutura deve apresentar signos mais representativos do que somente dimensões e formas que garantam as exigências de equilíbrio, resistência e estabilidade. Esses signos são as bases de estudo do professor de Princeton David Billington, que preconiza os princípios da Arte Estrutural.

David P. Billington é professor na Universidade de Princeton, com cursos de estruturas voltados para a arquitetura e engenharia. Em diversos estudos realizados, este autor acredita que a estrutura possui uma grande força para a sociedade e em determinados exemplos, merece ser considerada obra de arte. Publicou diversos livros que abordam esse

tema como: *Robert Maillart's Bridges; The art of Structural Design* e *The Tower and the building: The new art of structural engineering*.

A arte estrutural preconizada por Billington aparece mais claramente em grandes estruturas, como pontes, arranha-céus e grandes coberturas. Tem seu surgimento com a Revolução Industrial e com o aperfeiçoamento do ferro, que conduziu ao aparecimento dos engenheiros modernos.

Foi inicialmente expressa por Thomas Telford (1757 – 1834) em 1812, possuindo seus ideais definidos pela busca da eficiência, economia e elegância. A eficiência é caracterizada pela utilização mínima de materiais, a economia se baseia no anseio de minimizar os custos e na elegância reside a busca consciente da expressão estética da obra.

A arte estrutural possui dois períodos, o primeiro termina com a torre de Gustave Eiffel (1832 - 1923), para a exposição mundial de 1889, executada em ferro fundido e o segundo período começa depois da torre até os dias de hoje, com estruturas em concreto armado e aço.

Os engenheiros que buscaram expressar seu estilo pessoal baseado nos princípios da arte estrutural conseguiram novas formas que correspondiam diretamente ao novo tipo de material que estavam trabalhando, criando novas estruturas que pudessem ser consideradas verdadeiras obras de arte. Os exemplos mais notáveis de artistas estruturais podem ser encontrados em engenheiros como Gustave Eiffel (1832 - 1923) e Robert Maillart (1872 - 1940).

Em plena Revolução Industrial do século XIX, os engenheiros acabaram dominando a vanguarda construtiva com a utilização de novos materiais. *“Abrigados pela sombra da indústria e protegidos pela autoridade da ciência, os engenheiros não foram obstruídos em seus avanços, pois não tinham de tentar agradar ao gosto reinante”* (GIEDION, 2004, p.303), mas poucos buscaram consciente expressão estética em suas obras como Gustave Eiffel.

Eiffel foi o mestre das torres de ferro elegantemente construídas e dos arcos de dupla articulação, que, ao serem conectadas por vigas mestras que serviriam para o tráfego de locomotivas, formaram pontes espetaculares como a ponte sobre o rio Douro, em Portugal, e o Viaduto de Garabit, na França.

Esses projetos evidenciam toda a preocupação estética e científica que Eiffel manifestou em suas obras. Os grandes vãos e as grandes alturas resultantes para o projeto das pontes demonstram completo domínio científico dos impactos das forças do vento, assim como domínio das propriedades do solo.

A variação tridimensional conferida às pontes e o uso de uma nova forma de arco - o crescente - demonstram toda a preocupação estética que o engenheiro poderia possuir na época. Apesar de não buscar agradar o gosto reinante, como disse Giedion, Eiffel procurou elucidar que a forma mais bela coincide com a estrutura mais útil e com o menor custo. A evolução formal e científica pode ser encontrada em seu projeto mais conhecido, a torre Eiffel.

Ao comparar o projeto da torre não executada de James Bogardus (1800 – 1874) para a feira mundial de Nova York, de 1853, com a torre Eiffel, encontraremos uma rápida evolução formal e estética, onde, o resultado do design é determinado pelas cargas que essa estrutura estará submetida, quanto mais as cargas desempenham um papel no projeto, mais o trabalho se aproxima da categoria de pura estrutura. Para Eiffel *“O primeiro princípio da beleza arquitetônica é aquele no qual as linhas essenciais de uma construção sejam determinadas por uma perfeita conveniência ao seu uso”* (BILLINGTON, 1983).

O gosto artístico de Eiffel era genuíno à sua época, sendo demonstrado em suas obras onde a estética está ligada diretamente à tecnologia. Os valores agregados à sua obra são referências do momento em que estava vivendo, e, mais precisamente, a nova forma de construção e as novas potencialidades da época. Seus ideais não diferem neste aspecto de outros grandes construtores como Eugene Freyssinet (1879 – 1962) e Robert Maillart (1872 - 1940).

Robert Maillart conseguiu fazer com que as suas soluções para o problema estrutural em pontes se aproximassem tão intimamente da pura expressão plástica. Seu sistema estava baseado em uma integração de arco, da pista de rolamento e da viga mestra curando e trabalhando como uma única estrutura monolítica, resultando em uma grande atração estética e grande redução de custos de construção. *“Aqueles cujo senso estético foi formado e desenvolvido pela arte dos tempos atuais dificilmente deixam de ser arrebatados pelas pontes de Maillart”* (GIEDION, 2004, p.479).

O professor David Billington inicia seus estudos com uma hipótese, onde determina que as construções de caráter simplesmente estrutural e com uso restrito podem ser consideradas obras de arte. Essas obras seriam feitas por engenheiros, que historicamente não possuem em sua formação técnica ensinamentos de estética, beleza e arte, mas, mesmo assim, procuram esses ideais no resultado final de suas obras.

Sua metodologia de análise acaba comprovando esses fatos, após fazer um estudo da biografia de certos engenheiros, estudando suas obras e constatando que existiu aperfeiçoamento técnico juntamente com princípios estéticos, é que encontramos obras da arte estrutural.

Apesar de terem vivido em épocas, realidades e períodos diferentes, Eiffel e Maillart possuíram grandes semelhanças no modo em que realizaram as suas obras. Buscaram uma consciente expressão estética em seus projetos, que é representada pelo uso de novas soluções e formas geométricas que estivessem de acordo com os novos materiais por eles utilizados integrando definitivamente forma e função – a função ou uso é determinado pela capacidade de suportar cargas. Portanto, a função estrutural seguindo a forma era ponto peculiar em seus projetos. Procuraram fazer do processo inventivo um elemento mais significativo e importante do que o cálculo. Fizeram do cálculo seu servo e não mestre.

Suas grandes obras só foram possíveis por que foram realizadas após longos anos de pesquisa, não científicas e sim práticas, os avanços estruturais encontrados na Torre Eiffel (1889) e na ponte Schwandbach (1933) são resultados diretos de projetos realizados antes dessas grandes obras. Só existe avanço nas estruturas se houverem trabalhos precedentes que sejam inovadores e que levem o material ao limite de utilização, garantindo novas formas estruturais, e, portanto, avanços estéticos.

1.4 - A OBRA DE OSCAR NIEMEYER EM BRASÍLIA

Oscar Niemeyer nasceu no Rio de Janeiro, em 1907. Considerado o mais importante arquiteto brasileiro do século 20 em função da quantidade e qualidade de obras construídas, iniciou sua carreira no escritório de Lucio Costa, em 1934, quando se graduou na Escola Nacional de Belas Artes.

Em 1936 participa do projeto de Lucio Costa para a Cidade Universitária e integra a equipe que acompanha os estudos de Le Corbusier para a obra do ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro, tendo assim seu primeiro contato com o importante arquiteto moderno.

A influência corbusiana, é notável nas primeiras obras de Niemeyer. Porém, pouco a pouco o arquiteto adquire sua marca: a leveza das formas curvas cria os espaços que transformam o programa arquitetural em ambientes inusitados; portanto, harmonia, graça e elegância são os adjetivos mais apropriados para o trabalho de Niemeyer.

A originalidade e a imaginação que Niemeyer revelou nos seus trabalhos valeram-lhe uma reputação de líder da arquitetura moderna brasileira. Embora altamente variado, o seu trabalho inclui sempre um enorme espaço vazio integrado em formas muito excêntricas. Pampulha evidenciava que pelo menos um arquiteto brasileiro era capaz de ir além e influenciar a Arquitetura Moderna.

Após o sucesso dos projetos do complexo da Pampulha em Minas Gerais, Niemeyer é convidado pelo então presidente Juscelino Kubitschek, em 1956, para projetar a nova capital do Brasil. Foi nomeado Diretor do Departamento de Arquitetura da NOVACAP, empresa responsável pela construção de Brasília, sendo também encarregado de organizar o concurso para escolha do Plano Piloto participando também, como membro da comissão julgadora.

O plano urbanístico vencedor fora do arquiteto Lúcio Costa, que seguia os conceitos urbanísticos da Carta de Atenas, e os projetos arquitetônicos ficariam sob a responsabilidade de Niemeyer. Os arquitetos da nova capital, Niemeyer e Costa pretendiam construir uma cidade utópica. O desejo era "*construir um urbanismo com luz, ar e sol, com a transparência do cristal e a lógica de uma equação*" (GOERDELER, 2000).

Niemeyer divide sua obra em três fases: a primeira inaugurada pelo Ministério da Educação e Saúde, a segunda por Pampulha e a terceira por Brasília (SOUZA, 1978, p.75). Por volta de 1955, a arquitetura de Oscar Niemeyer sofreu uma brusca mudança facilmente perceptível. Num primeiro momento, seus projetos se caracterizavam pela exuberância cromática e formal, traduzida em formas curvas e orgânicas, revestidas com painéis de grandes artistas plásticos e com pastilhas coloridas, combinados a materiais diversos como o aço, a madeira ou o vidro, criando jogos de transparências e texturas inusitadas.

Notadamente a partir do projeto para o museu de arte de Caracas, sua arquitetura passa a trabalhar com menos materiais e formas mais definidas: operando menos no campo dos materiais de revestimento e mais na associação entre formas claramente perceptíveis, com volumes definidos, a partir desse momento, a arquitetura passa quase sempre a se utilizar de mármore branco, concreto aparente ou reboco pintado associados a generosos panos de vidro e associação direta de arquitetura com estrutura.

Antes de 1955 e do projeto de Brasília, Niemeyer já havia realizado pesquisas estruturais para a composição e variedade formal de sua obra. O desenvolvimento das pesquisas estruturais foram marcadas em seu início pelo sistema do minó de Le Corbusier, e a racionalidade do uso dos pilotis. *“Antigamente, as estruturas de concreto armado eram mais simplificadas e os vãos menores e regulares. As vigas quase sempre aparentes e as colunas projetadas sem outra razão senão sustentarem os edifícios”* (NIEMEYER, 1980). Depois seguiram projetos buscando a utilização de tirantes, arcos, abóbadas, cascas, exoesqueletos e telhados suspensos *“Mas a idéia de fazer coisa diferente, de usar a imaginação, nunca saiu da cabeça do arquiteto, e pouco a pouco, diante da monotonia arquitetural que se multiplicava, ele passou à contestação”* (NIEMEYER, 1980).

Com Brasília, o arquiteto criou um método de projeto e uma técnica construtiva nos quais era impossível dissociar o momento artístico do momento científico, a estrutura passa do simples elemento responsável pela estaticidade da construção para um elemento de total responsabilidade plástica e compositiva. Niemeyer evidencia esse pensamento com a afirmação: *“Antigamente quando se terminava uma estrutura via-se apenas lajes e apoios. A arquitetura vinha depois, como uma coisa secundária e eu queria o contrário, essa junção das estruturas com a arquitetura, queria que elas nascessem juntas e fossem bastante sem nenhum detalhe para demonstrar o projeto de arquitetura”*(NIEMEYER, 2007).

A arquitetura de Brasília, prevista nos esboços com que Lucio Costa concorreu ao concurso internacional de projetos para a nova capital do Brasil, foi o impulso definitivo para a afirmação dessa nova fase de Niemeyer, que passava, segundo seu próprio depoimento, por um *“processo honesto e frio de revisão”* (NIEMEYER, 1958). A contenção volumétrica dos palácios e a clareza de seus elementos constituintes justificavam essa nova arquitetura, e o arquiteto deixava claro esse pensamento ao afirmar *“as soluções compactas, simples e geométricas; os problemas de hierarquia e de caráter*

arquitetônico; as conveniências de unidade e harmonia entre os edifícios e, ainda, que estes não se exprimam por seus elementos secundários, mas pela própria estrutura, devidamente integrada na concepção plástica original” (NIEMEYER, 1958).

Dentre os edifícios da nova capital brasileira, são os palácios porticados da Alvorada, do Planalto e do Superior Tribunal de Justiça os que mais explicitamente exemplificam o processo de revisão que sua arquitetura passara naquela época (NIEMEYER, 2004). Com o projeto dos Palácios de Brasília, Niemeyer concentra nas estruturas, as colunas delgadas, a força expressiva que sintetiza a imagem dos edifícios. Nos palácios de Brasília, o arquiteto exemplifica o seu desejo de fazer flutuar seus edifícios, usando as técnicas mais avançadas sem revelar em suas formas as tensões inerentes à sua sustentação, mas demonstra total entendimento do comportamento estrutural do concreto armado.

1.5 - CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

A realização de estudos sistemáticos da obra de Oscar Niemeyer enfocando suas características plásticas é explorada abundantemente pelos pesquisadores brasileiros. A importância que o arquiteto teve para a valorização da arquitetura nacional é um ponto em comum entre essas pesquisas, mesmo as que possuem críticas desfavoráveis às suas obras.

Os estudos relacionados às composições estruturais de sua obra são, quase sempre, relativos à estrutura de uma obra em questão, onde analisam os aspectos históricos, científicos, tecnológicos de projeto para depois produzirem uma proposta de intervenção.

Com o conhecimento da chamada Arte Estrutural, e da metodologia de análise do autor, foi constatado que uma das características mais marcantes de uma obra estrutural é justamente a concepção estrutural adotada para a mesma. O processo de análise evidencia que determinados construtores, possuem um entendimento e uma lógica estrutural tão fascinante que conseguem desenvolver obras espetaculares, que adquirem signos de suma importância. Essas construções passam a ser referenciais de construção, verdadeiros exemplares do avanço tecnológico, assumem o papel de símbolos de uma cidade, nação ou mesmo pessoal.

Se procurarmos uma personalidade na construção brasileira que possua as características proferidas por Billington para a sua Arte Estrutural, encontraremos no arquiteto Oscar Niemeyer as características inerentes de um grande artista estrutural. Niemeyer busca

integrar a estrutura na concepção plástica de sua obra, essa busca obstinada da simplicidade, da leveza e da forma nova diferente, encontrou no concreto armado sua expressão compensadora.

O desenvolvimento de uma pesquisa de verificação da concepção estrutural adotada para a Ponte Costa e Silva, a única ponte do arquiteto construída até hoje, poderá contribuir para uma maior importância do entendimento e domínio da concepção estrutural, assim como uma maior valorização da necessidade de integração entre o arquiteto e o engenheiro, elemento que, para o arquiteto é fundamental.

A dissertação se insere na linha de pesquisa do Professor José Manoel Moralez Sánchez que é *Forma e Função Estrutural na Arquitetura de Brasília*. Está ligada a área de Tecnologia do programa de pesquisa e pós-graduação da FAU/UnB. Esta área caracteriza-se simultaneamente pela reflexão e pela prática, contemplando o instrumental técnico e metodológico da produção do habitat humano. As teorias do projeto, as tecnologias computacionais de projeção, as tecnologias dos sistemas estruturais, incluem-se nessa linha de pesquisa. Esta área é intensamente multidisciplinar onde o conhecimento estrutural é experimentado qualitativamente com as tecnologias computacionais. Assim, o trabalho apresentado busca alcançar e integrar dois objetivos gerais.

O primeiro objetivo concerne à realização de um estudo sistemático sobre a ponte de Oscar Niemeyer em Brasília, fazendo uma verificação de reflexão e prática, abordando o sistema construtivo e métodos realizados.

Dentro da definição da área de conhecimento em que este trabalho se insere, o segundo objetivo geral a ser alcançado é o estudo da análise computacional ao objeto. Através do domínio desta técnica será possível verificar a concepção estrutural adotada pelo arquiteto de forma qualitativa e verificar se os esforços resultantes podem ter influenciado a forma final.

Em resumo pretende-se:

1. Estudo e desenvolvimento de um trabalho sistemático e de documentação da Ponte Costa e Silva em Brasília; e,
2. Análise computacional com programas gráficos interativos do raciocínio estrutural adotado para a ponte.

Os objetivos estabelecidos visam uma trajetória de longo prazo no estudo e na pesquisa dos temas citados, com bases para o desenvolvimento de linha de pesquisa em análises qualitativas e verificação da função estrutural.

A fim de alcançar esses objetivos, o trabalho foi organizado em cinco capítulos. Após a Introdução apresentada, segue-se, no primeiro capítulo, com um referencial teórico sobre o design de pontes e as variáveis que interferem na escolha mais coerente para a sua concepção. A nomenclatura usual de denominar as pontes como obras de arte na norma brasileira ganha reforço teórico com o tópico seguinte de design estrutural como obra de arte. Um breve estudo da obra de Niemeyer em Brasília localiza os objetivos principais de análise do presente trabalho, que é um estudo da Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília.

Baseando-se nas indicações do capítulo anterior, o segundo capítulo é dedicado a demonstrar a importância histórica do objeto de estudo. O capítulo exemplifica e torna evidente a necessidade de um estudo sistemático desse projeto, desde suas complexidades históricas, projetos arquitetônicos e percalços executivos.

No terceiro capítulo, é realizada uma análise que estuda a possível relação existente entre formas arquitetônicas e forças internas, compondo-se de uma análise do diagrama de momento fletor e sua relativa associação com a forma final do edifício, refletindo sobre a transformação da forma no esforço e examinando a possibilidade existente entre uma analogia das formas curvas de Niemeyer às forças internas em determinados exemplos de sua longa trajetória construtiva.

O quarto capítulo é relativo ao exame do objeto de estudo com as variáveis existentes para o resultado prático dos objetivos. A análise realizada será da forma estrutural adotada para o projeto da Ponte Costa e Silva, verificando a geometria da ponte, uma avaliação estrutural qualitativa que consiste na metodologia adotada para o trabalho proposto, o processo ou método descrito será apoiado com o programa FTOOL (MARTHA, 2002) para finalmente encontrarmos a proporção da leveza existente entre forma arquitetônica e eficiência estrutural. As considerações finais, calcadas nos dados apresentados ao longo do trabalho, são feitas no quinto capítulo, onde também se explicam as contribuições possíveis para projetos futuros.

Conclui-se o trabalho com o referencial bibliográfico e anexos.

2 - A CONSTRUÇÃO DA PONTE DE OSCAR NIEMEYER

2.1 - INTRODUÇÃO

Projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer em 1967, a Ponte Costa e Silva foi planejada para prover uma ligação mais rápida do Setor Residencial da Península Sul, às margens do Lago Paranoá, à área central da cidade. Antes de sua conclusão o setor ligava-se através da Estrada Parque Dom Bosco e Estrada Aeroporto, resultando em um longo contorno pelo lago Paranoá.

Niemeyer ficou encarregado de elaborar o projeto arquitetônico. Com poucos traços, lançou uma das mais complicadas obras do país. A obra em pauta possuía dimensões e características inéditas, haja vista ser o seu vão à época, o maior do mundo no gênero vigareta. Apesar da enorme complexidade, o arquiteto acrescentou uma nota simples e de profunda poesia à sua concepção plástica: *“A ponte deve apenas pousar na superfície como uma andorinha tocando a água”* (NIEMEYER apud VASCONCELOS, 2005, p.163). Nenhum bloco de fundação deveria ser visto, e o perfil da ponte apenas tocava a água. E eram 200 metros de vão a serem vencidos numa obra de 400 metros de comprimento total. A obra foi iniciada na administração do Prefeito Wadjô Gomide (1933-2003).

Da elaboração de seu projeto até sua conclusão, a ponte passou por diversas adversidades, ficando paralisada por um longo período e sendo inaugurada somente em seis de fevereiro de 1976 pelo Presidente Ernesto Geisel e homenageando o falecido Presidente Costa e Silva com o seu nome. Então surgiu uma das mais belas pontes do país. A visão lateral da ponte em conjunto nos dá realmente aquela sensação que Niemeyer deixava transparecer: uma andorinha roçando o bico nas águas (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Visão lateral da Ponte Costa e Silva. Fonte: (Foto do autor, 2006).

Apesar do projeto da Ponte Costa e Silva ter sido elaborado uma década depois dos principais edifícios de Brasília, a forma resultante segue os mesmos princípios estruturais adotados pelo arquiteto para os Palácios, possuindo menos material e forma mais definida. A espessura delgada do vão central só seria possível se associada a vãos laterais, e assim o arquiteto o fez, colocou o vão central maior com 200 metros, associado a vãos laterais menores de 100 metros cada. A solução de um grande e esbelto vão, ladeado por vãos curtos, que conferem engastamento, pode ser percebida em vários palácios.

Esse conhecimento estrutural permitiu que no momento do preparo do croqui, o arquiteto estivesse desenvolvendo uma obra que pudesse ser construída, e não apenas um simples desenho sem solução.

A arquitetura de Oscar Niemeyer sempre é referenciada como uma obra que busca uma maior integração entre qualidade plástica e estrutural, com o projeto de uma ponte essa virtude fica mais evidenciada. A investigação da concepção estrutural, projetual e de fatores históricos da ponte, como sua construção, poderão contribuir para uma constatação da existência da integração entre arquitetura e engenharia na obra de Niemeyer.

2.2 - CONCEPÇÃO E PROJETO

O projeto de pontes é sempre associado a engenheiros. Um dos motivos, talvez seja que cada ponte é, ou deveria ser, a melhor solução estrutural para um problema específico (SALVADORI, 2006). Esse problema consiste em ligar dois pontos, prover uma ligação; em alguns casos essa função acaba sendo mais complexa, como é o caso da Ponte Vecchio

(1345), em Florença, que é um misto de ponte, rua, mercado e moradia, ou da Casa Ponte (1934), em Mar Del Plata, na Argentina e projeto de Amancio Williams (1913-1989), onde casa e ponte se misturam em um projeto arquitetônico. Mas mesmo com essa variedade de funções, a sua principal característica reside na ideal sujeição às cargas e pleno equilíbrio estrutural.

A complexidade espacial é obra prototípica do arquiteto, a ponte com função simples, apenas vencer o vão, é prototípica do engenheiro (BILLINGTON, 1983).

A forma da ponte ou o tipo adotado é determinado por um grande número de fatores, como o vão a ser vencido, a complexidade de suas margens que podem ser entre rios ou desfiladeiros, materiais e mão-de-obra disponíveis, tipo de tráfego adotado, entre outros, mas um dos motivos não menos importante é o estético, que garantirá a beleza à estrutura. Esse é o motivo que denomina pontes como obras de arte no vocabulário da engenharia.

As obras de Niemeyer são caracterizadas principalmente por apresentarem grande valor estético, nada mais justo, já que uma obra arquitetônica se pretende, acima de tudo, artística. A beleza de suas obras está relacionada com a leveza de suas formas. No início, essa leveza era alcançada pelo uso constante das formas e geometrias curvas, posteriormente essa leveza foi atribuída a esbeltez dos elementos estruturais constituintes, como vigas, pilares e o encontro desses ao solo, bem representados em Brasília com os projetos de seus principais palácios.

No concreto armado, Niemeyer encontrou sua expressão compensadora elaborando um novo vocabulário plástico e realizou diversas pesquisas em conjunto com seus colaboradores, dessas pesquisas os resultados são obras que fogem do critério repetido e monótono comum à técnica do concreto armado (NIEMEYER, 1978).

Esses preceitos arquiteturais elucidam um conhecimento profundo das razões e fundamentos do equilíbrio estrutural, principalmente do material escolhido pelo arquiteto como principal componente de suas obras que é o concreto armado. Em nenhuma outra obra a sua afirmação de que quando a estrutura está pronta minha arquitetura está completa, é tão verdadeira. Uma ponte é pura estrutura. *“Hoje, quando uma estrutura termina, a arquitetura também está presente. É a síntese arquitetura-engenharia há muito procurada”* (NIEMEYER, 1978, p.35).

O projeto da ponte sobre o Lago Paranoá foi considerado um monumento cruzando o lago e por isso foi primeiramente batizada de Ponte Monumental (CORREIO BRAZILIENSE, 1976), projetada em 1967 e inaugurada em 1976, como Presidente Costa e Silva, pode ser considerada como um exemplo do conhecimento estrutural adquirido ao longo dos anos pelo arquiteto com estudos e projetos em concreto armado onde o que se buscava; além da lógica estática, era a leveza e esbeltez de uma estrutura utilizando um material de construção tão visualmente pesado como o concreto armado. Essa é a única ponte projetada por Niemeyer que chegou a ser construída.

O arquiteto realizou o projeto de outras três pontes: Ponte da Academia em Veneza, Itália, projeto elaborado em março-abril de 1985 a pedido do Comitê Científico da mostra “As Venezas possíveis: de Palladio a Le Corbusier”, realizada de maio a julho daquele ano no Museu Correr. O projeto foi constituído de um dossiê de esboços e uma maquete, expostos naquela ocasião e hoje guardados na Galeria de Arte Moderna de Ca'Pesaro, os quais propuseram a alternativa entre 2 estudos: a primeira solução, com estrutura descoberta, possuindo dupla rampa tendendo a um plano horizontal e a segunda - que foi a escolhida - coberta e em curva, cujas paredes laterais em concreto possuem três janelas ovais (Figura 2.2).

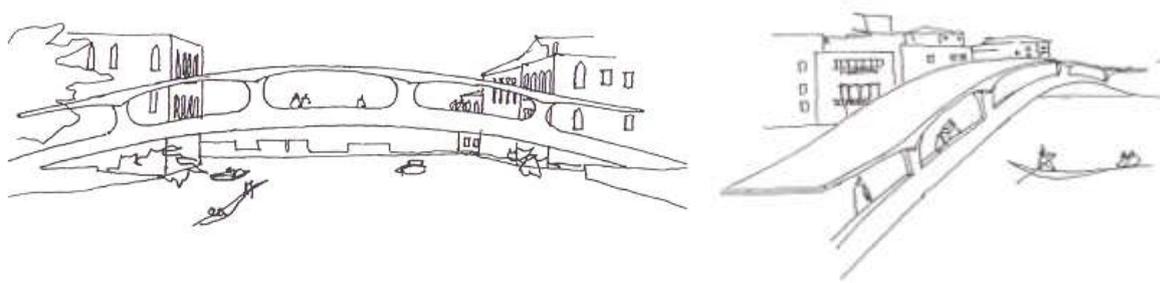


Figura 2.2 – Ponte da Academia, croqui Niemeyer. Fonte: (CORONA, 2001).

As outras duas pontes foram projetadas para Brasília, a Ponte da Asa Norte em 1986, e a Terceira Ponte do Lago Sul em 1987, projeto apresentado ao CAUMA (Conselho de Arquitetura, Urbanismo e Meio Ambiente) em 27 de outubro de 1987, que, por falta de recursos do governo do Distrito Federal, foi aceita a sugestão de repasse dos gastos com as obras aos moradores do Lago Sul, essa ponte teve trajeto traçado por Lucio Costa, ligando o Clube de Golfe a QL 26 (FUNDAÇÃO OSCAR NIEMEYER, 2006).

A construção da Ponte Costa e Silva pode ser considerada como uma das mais complexas e repletas de dificuldades já enfrentadas por uma obra pública brasileira. A primeira implicação se deu ao fato de uma ponte não contar nos planos originais de Lucio Costa, a idéia de sua construção provocou sérias controvérsias, necessitando de diversas justificativas e argumentos que favorecessem a sua construção. Uma das justificativas foi seu planejamento para prover uma ligação mais rápida do Setor Residencial da Península Sul à área central da cidade, antes de sua conclusão o setor ligava-se através da Estrada Parque Dom Bosco e Estrada Aeroporto (Figura 2.3).

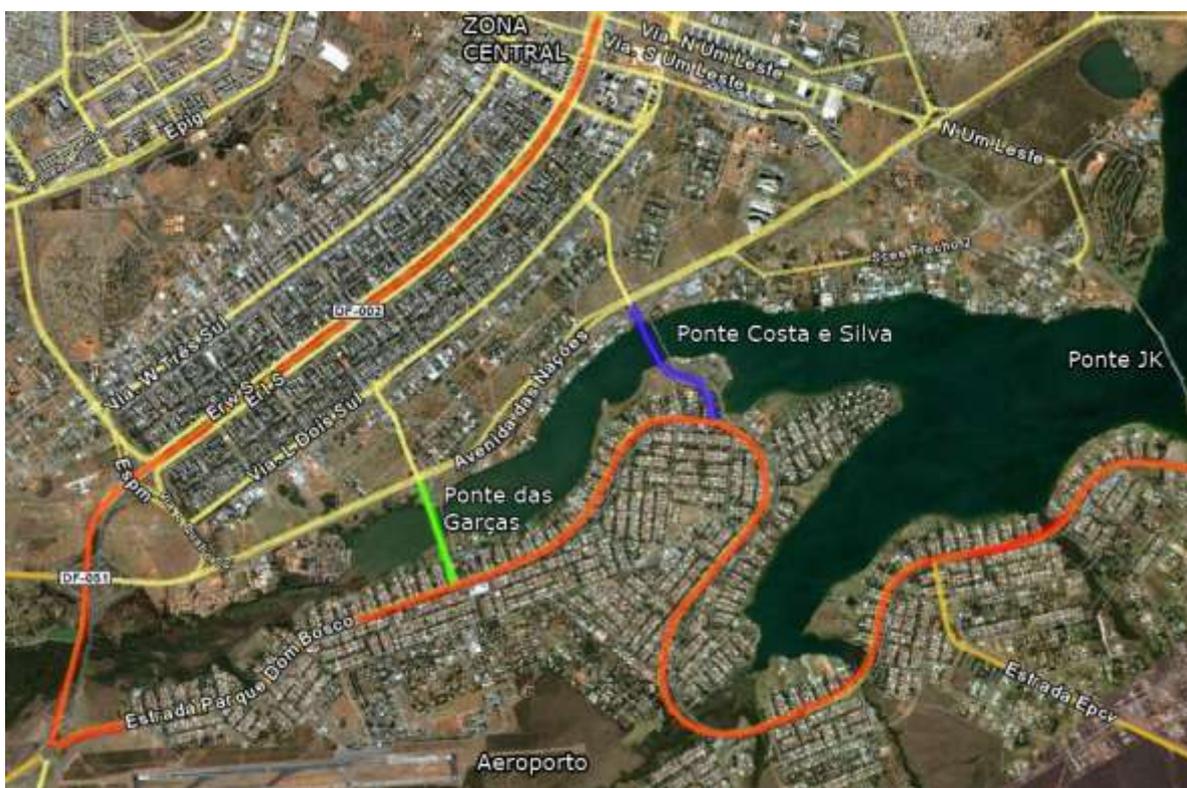
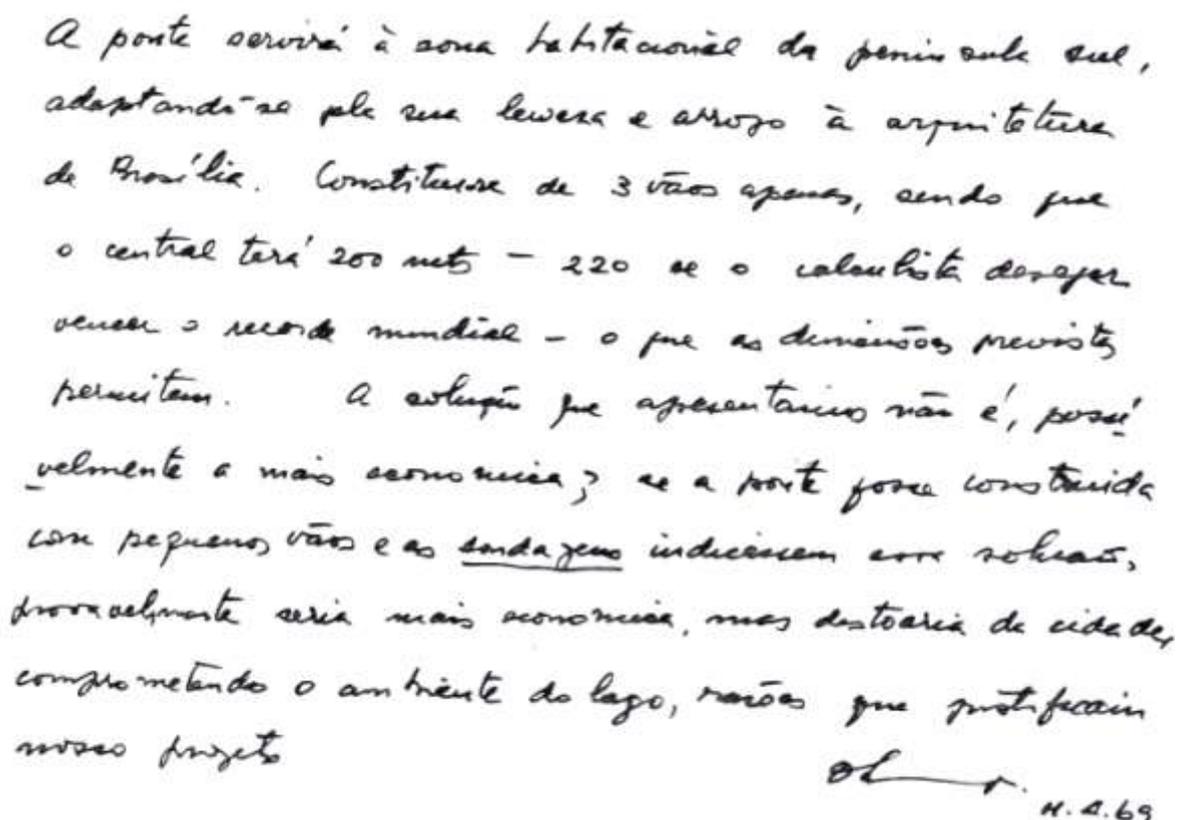


Figura 2.3 – Imagem de Satélite. Via em vermelho demonstrando o acesso da Península Sul à Zona Central do Plano Piloto pela Estrada Parque Dom Bosco. As pontes em verde e azul foram construídas para prover uma ligação mais rápida. Fonte: (Google Earth, retirado do programa em 12/09/2007).

Com o considerável aumento da população e crescimento horizontal do setor no final da década de 1960, foi planejada uma ligação visando uma economia em tempo e percurso, essa ligação foi proposta em forma de uma ponte, da Avenida das Nações (L4) à altura da Q-3 com a Península Sul, à altura da QL/3. Com esta ligação a economia no percurso é de cerca de 20 quilômetros, além de evitarem-se vias de tráfego muito intenso.

Após os primeiros obstáculos à sua construção, a necessidade de uma ponte para aquele setor se tornou justificável e a obra foi iniciada na administração do Prefeito Wadjô Gomide (1933-2003). O projeto arquitetônico desenvolvido por Oscar Niemeyer possuía uma nota poética evidenciando a leveza que tanto buscava em uma obra que geralmente se mostra muito pesada, “A ponte deve apenas pousar na superfície como uma andorinha tocando a água” (NIEMEYER apud VASCONCELOS, 2005). Essa busca pela leveza em pontes de concreto armado nos lembra Robert Maillart, e Niemeyer tenta se aproximar desse grande construtor no seu projeto para a ponte, atraído pela maneira elegante que Maillart desenhava suas pontes (NIEMEYER, 2002).



A ponte servirá à zona habitacional da península sul, adaptando-se pela sua leveza e arrojo à arquitetura de Brasília. Constitui-se de 3 vãos apenas, sendo que o central terá 200 metros – 220 se o calculista desejar vencer o recorde mundial – o que as dimensões previstas permitem. A solução que apresentamos não é, possivelmente a mais econômica; se a ponte fosse construída com pequenos vãos e as sondagens indicassem esse caminho, provavelmente seria mais econômica, mas destoaria da cidade, comprometendo o ambiente do lago, razões que justificam nosso projeto

Oscar Niemeyer
H. 4. 69

Figura 2.4 – Nota de próprio punho de Niemeyer na planta da ponte¹. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969-1971).

¹ Transcrição do texto de Niemeyer no projeto original. “A ponte servirá à zona habitacional da península sul, adaptando-se pela sua leveza e arrojo à arquitetura de Brasília. Constitui-se de 3 vãos apenas, sendo que o central terá 200 metros – 220 se o calculista desejar vencer o recorde mundial – o que as dimensões previstas permitem. A solução que apresento não é, possivelmente a mais econômica, se a ponte fosse construída com pequenos vãos e as sondagens indicassem essa solução, provavelmente seria mais econômica, mas destoaria da cidade, comprometendo o ambiente do lago, razões que justificam nosso projeto”

Niemeyer compreendia que a solução de se cruzar uma ponte com apenas três vãos poderia apresentar um orçamento mais elevado para a construção do que uma ponte com vários trechos e apoios. A forma adotada por ele, mesmo que menos econômica, encontraria maior identidade com a arquitetura da cidade e não destoaria do conjunto já existente, além de que não comprometeria o ambiente do lago.

O vão a ser vencido era de 200 metros, em uma obra de 400 metros de comprimento total. Nenhum bloco de fundação poderia ser visto, e a ponte possuía um perfil que simplesmente tocava à água (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Ponte Costa e Silva. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).

2.3 - A CONSTRUÇÃO – PROJETO EXECUTIVO

Em 24 de abril de 1969, é lançado o edital de concorrência pública nº 003/69/CPC-2, pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital para a *construção*, sob o regime de empreitada por preço global, de uma ponte sobre o lago Paranoá em Brasília, ligando o SHI SUL na altura do QL 3/9, com o Setor de Clubes Esportivos Sul (Figura 2.6). A Comissão de concorrência foi presidida pelo Engenheiro Jorge Gonzalo Barreto Buitrago, podendo concorrer qualquer firma individual ou social que satisfizesse as condições estabelecidas pelo edital, dentre elas a prova de capacidade, responsabilidade total pelo projeto da superestrutura, cálculos estruturais e complementares (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).



Figura 2.6 – Montagem fotográfica com a proposta original da posição da Ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).

O resultado da concorrência pública foi liberado no dia 09 de junho de 1969, onde demonstrava as firmas concorrentes com seus valores de preço global. Em primeiro lugar e ganhadora pelo menor preço ficou a Sociedade Brasileira de Engenharia e Comercio “SOBRENCO” S/A com NCr\$ 6.280.600,00; seguida por Construtora Ferraz Cavalcanti S/A com NCr\$ 6.468.729,00; depois a Construtora Rabello S/A com NCr\$ 6.898.680,00 e por ultimo a Rossi Engenharia S/A com NCr\$ 7.241.458,40.

Em 16 de junho de 1969 é homologada a vitória da firma SOBRENCO S/A, estando completamente apta para a execução da obra após parecer de nº 250, sob o protocolo nº 48.915/69 onde constava que todos os projetos estruturais apresentados eram da melhor qualidade sendo esses, atestados por parecer técnico do Sr. Victor Fadul, engenheiro pertencente à equipe do Dr. Joaquim Cardozo. O documento de homologação foi assinado pelo diretor Hugo Martins Borges.

Em 19 de Junho de 1969 a empresa assina o contrato de empreitada para a execução da obra (Figura 2.7), compreendendo a construção da estrutura propriamente dita, a elaboração do projeto estrutural, a execução das sondagens e dos aterros de acesso. O engenheiro Sergio Marques de Souza incorporou sua firma SEMARCO à Sociedade Brasileira de Engenharia e Comercio S/A – SOBRENCO, pioneira na aplicação da técnica de balanços sucessivos na construção de obras especiais de grandes portes no Brasil, sendo responsável pela construção de grandes pontes brasileiras.



Figura 2.7 – Flagrante de assinatura do contrato da construção da ponte, quando o prefeito Wadjô da Costa Gomi de assinava o documento. À sua direita o Secretário de Viação e Obras, Sílvio Jaguariibe; em pé Paulo Novack e Leo David; João Stocco Neto, Gerente Administrativo da Beter, Leo Lobi, Gerente Técnico da Beter; sentados: Professor Sérgio Marques de Souza, Diretor SOBRENCO e Ronald Horácio Cumplido, Diretor Técnico da SOBRENCO. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).

A primeira grande ponte construída pela empresa foi sobre o Rio Tocantins, na Belém-Brasília em 1960, com 523,70 metros de extensão e vão livre de 140 – o maior vão do mundo na época – executada em 270 dias, depois a ponte do Rio Pelotas, na BR-116, ligando o estado de Santa Catarina ao Estado do Rio Grande do Sul, com o comprimento de 250 metros e vão livre de 189. Executou também outra ponte na Belém-Brasília, sobre o Rio das Almas com 180 metros de comprimento e vão livre de 90. No ano em que ganha a concorrência da ponte sobre o Lago Paranoá, a SOBRENCO estava realizando a construção do terceiro maior vão livre do mundo, de 140 metros em um total de 648 metros sobre o Rio Tietê. E com a ponte de Brasília com 210 metros de vão, a engenharia brasileira acumularia um novo recorde mundial, ultrapassando a ponte alemã Bendorf Bridge sobre o Rio Reno com 208 metros de vão livre (CORREIO BRAZILIENSE, 1969).

A instalação do canteiro de obras ocorreu em julho de 1969, e alguns problemas foram constatados pela empresa. De acordo com o anteprojeto apresentado obedecendo às condições impostas pelo edital de concorrência, a obra fora prevista em concreto protendido, com um comprimento total de 400 metros, compreendendo um vão central de 210 metros, dois vãos laterais de 94 metros e dois balanços de 1 metro. Quanto à execução foi planejada a construção dos dois vãos laterais apoiados sobre um escoramento direto e o

vão central em balanços sucessivos - escoramento indireto, (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

Em 13 de agosto de 1969 a SOBRENCO estava com o laudo técnico da sondagem realizada pela empresa TECNOSOLO ENGENHEIROS CONSULTORES – ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE SOLOS E MATERIAIS S.A. (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71). Pelo exame das sondagens S1 e S6 localizadas junto às margens e na posição correspondente aos aterros, verificou-se a ocorrência de camadas espessas de material de fraca resistência (resistência a penetração com amostrado igual a zero). De modo simples o resultado indicava que as margens do lago Paranoá possuíam uma espessa camada de lodo, inviabilizando a locação dos blocos de fundação (Figura 2.8).

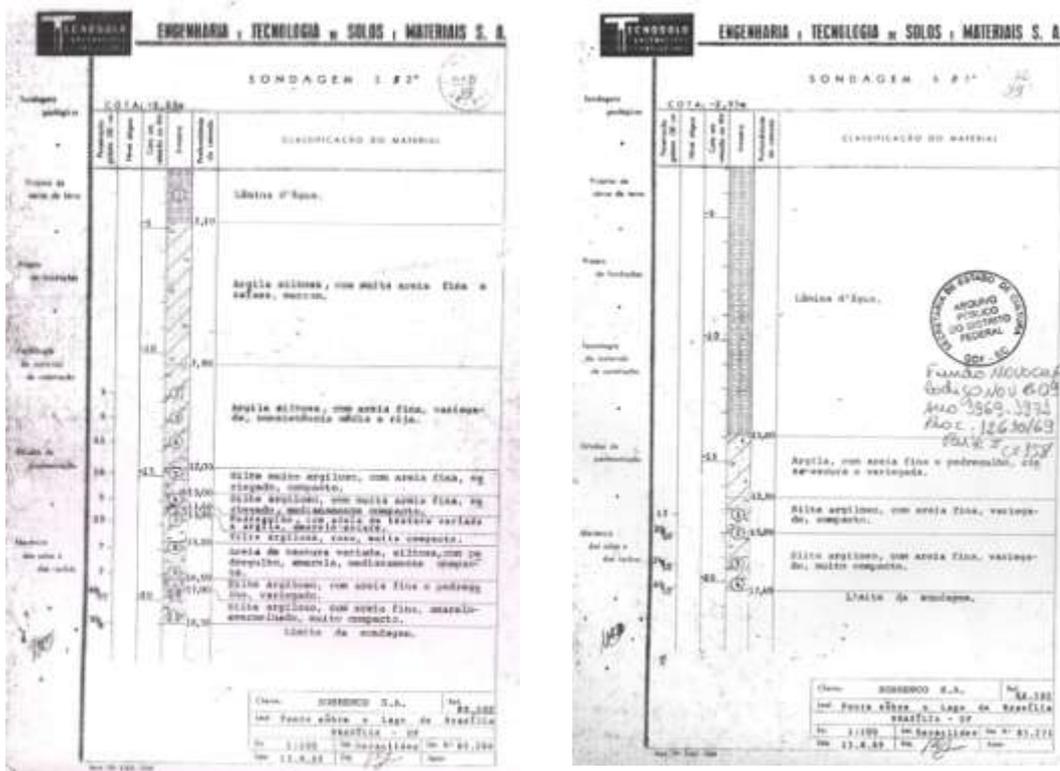


Figura 2.8 – Sondagens S01 e S06. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1969-71).

Implantando o anteprojeto da obra nas dimensões acima referidas – adotando por questão de ordem estética a disposição simétrica em relação às duas margens – considerando que o lago tem uma largura de 461,55 no local a transpor, seriam necessários dois aterros de

30,775 metros de comprimento cada um, dentro da água, com uma altura de 8,50 metros na margem da Avenida das Nações e 17 metros na margem do Aeroporto.

As camadas de terreno de fraca resistência que ocorrem nas margens, não teriam condições de suportar o peso de um aterro de 17 metros de altura. As tensões produzidas no terreno seriam da ordem de $3 \text{ kg} / \text{cm}^2$, incompatíveis para solo com estas características. Além disso, estas camadas são bastante inclinadas, havendo por isso uma forte tendência de escorregamento lateral, e que o aterro neste local ficaria imerso numa espessura de 12 metros. Um aterro com 17 metros de altura, nestas condições, não teria estabilidade.

Procurou-se então deslocar a ponte para o lado da margem do Aeroporto, de modo a obter aproximadamente a mesma altura de aterro de ambos os lados, abandonando a idéia de simetria, já que a questão da estabilidade face às condições indicadas pelas sondagens era preponderante.

Fixando-se o início da ponte 50 metros a partir da margem da Avenida das Nações, os aterros teriam cerca de 11 metros de altura. Mesmo com esta solução, ainda ocorreria uma tensão no terreno, ordem de $2 \text{ kg} / \text{cm}^2$, valor ainda bastante elevado para este tipo de solo. Outro fator considerado além da questão da estabilidade dos aterros foram os feitos danosos sobre a estrutura da ponte.

Diante deste fato, a SOBRENCO procurou algumas soluções que foram elucidadas para a NOVACAP, onde os principais tópicos seriam (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71):

- 1) Projetar a obra com um comprimento em que os aterros de acesso tivessem uma altura tal que as tensões sobre o terreno fossem compatíveis com a sua resistência;
- 2) Executar os aterros antes da estrutura, aguardar o seu adensamento, executando após os pilares e fundações extremas da obra.

Para se adequar a esses principais tópicos a obra precisaria ter pelo menos 440 metros de comprimento, hipótese na qual os aterros teriam uma altura de cerca de 7 metros, o que daria uma tensão no terreno de fundações de cerca de $1,2 \text{ kg} / \text{cm}^2$, valor bastante razoável para este tipo de material. Este comprimento de obra poderia ser realizado através a adoção de um vão central de 220 metros e dois vãos laterais de 110 metros.

O processo construtivo imaginado para a obra também deveria ser mudado. Em vez de serem atacados os 2 vãos laterais como primeira etapa de construção, apoiados sobre um escoramento direto e depois executado o vão central – solução em que a estrutura ficaria totalmente a mercê do adensamento dos aterros – a melhor maneira seria executar a obra em balanços sucessivos simetricamente a partir dos dois pilares centrais. Nesse processo seria fácil resolver questão da influência dos aterros sobre a estrutura. Os aterros seriam executados inicialmente independentemente da obra e o seu adensamento se processaria enquanto a estrutura avançasse. Os pilares extremos seriam executados após a conclusão dos aterros decorrendo prazo suficiente para seu adensamento, e quando a estrutura estivesse se aproximando das margens.

Esses procedimentos foram explicados a NOVACAP, por ordem da contratante exigiram que a contratada entrasse em contato com o arquiteto Oscar Niemeyer explicando o que estava acontecendo e se submetessem à aprovação da modificação do comprimento total da obra (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

A ponte passaria a ter uma extensão total de 440 metros, com vãos de 110, 220 e 110 metros. Essa mudança de escala permitiu que os encontros da ponte fossem construídos fora do terreno fraco e conquistasse a marca de recorde mundial de vão em viga reta de concreto protendido. É interessante notar que, mesmo com esse aumento, a ponte manteve a proporção do vão central ser o dobro dos vãos laterais, especificados por Niemeyer. Em 14 de Julho de 1969, a SOBRENCO obteve aprovação da modificação firmada pelo arquiteto e pela NOVACAP (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

Com essas mudanças foi necessário um aumento do valor da obra. Esse acréscimo foi de 29% do valor da superestrutura, justificados na substituição do cimbramento lateral por plataformas para apoio da superestrutura junto aos pilares e montagem de Tower-Krane. O anteprojeto original previa que a estrutura seria executada parte apoiada em um escoramento direto (cimbramento) e parte através de um escoramento indireto (treliças). No novo projeto o escoramento direto (cimbramento) seria eliminado e substituído por duas treliças e por duas plataformas metálicas junto aos pilares. O valor inicial da superestrutura seria de NCr\$ 3.729.450,00 com esse acréscimo chegou a NCr\$ 4.804.120,00. A Novacap exigiu nova memória de cálculo das fundações e novo cronograma físico financeiro sendo apresentado até o dia 20 de julho de 1969, o prazo de entrega da obra seria o mesmo 20 de abril de 1970.

O início da obra foi no ano de 1970 (Figura 2.9), mas, pelos problemas encontrados, a SOBRENCO, em 16 de janeiro de 1970, entrou com um pedido de prorrogação de entrega da obra concluída, sua justificativa principal fora a total mudança do processo construtivo e a necessidade de um novo projeto estrutural necessitando de um adiamento de 120 dias (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

O parecer nº 50 do protocolo 64.098/69 (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71) autorizava à SOBRENCO uma maior data de entrega da obra, agora o prazo seria estendido até 18 de agosto 1970 e uma alteração do valor do contrato total para NCr\$ 7.034.272,00. O relator dessa decisão fora o Diretor da NOVACAP Eloysio Ribeiro de Souza juntamente com o Conselho de Administração do órgão com assinaturas de Bernardino Jardim de Oliveira, Ildeu Diniz e Francisco Luiz de Bessa Leite.

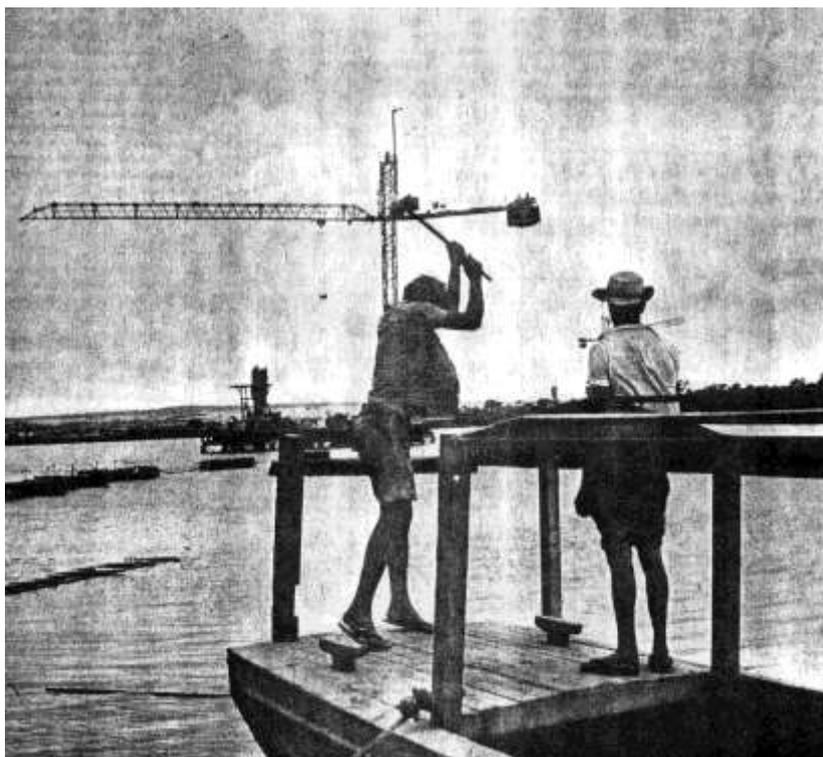


Figura 2.9 – Início das obras da ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1969).

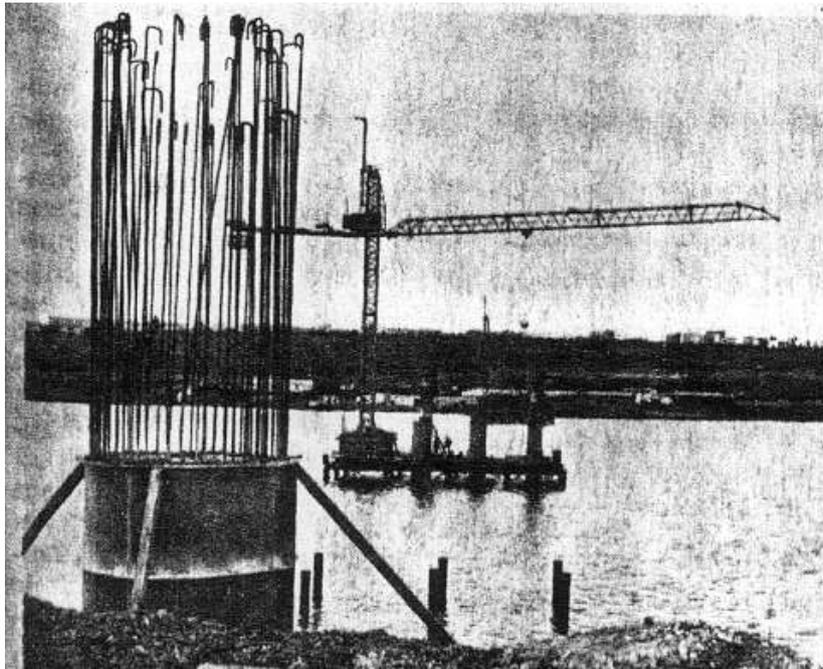


Figura 2.10 – Tubulões centrais da ponte já concretados e finalizados. Fonte: (Correio Braziliense, 1970).

2.4 - O ACIDENTE DA CONSTRUÇÃO

A superestrutura foi iniciada mais precisamente em junho de 1970 (Figura 2.10) (CORREIO BRAZILIENSE, 1970). Foram executadas pelo processo dos balanços sucessivos apenas sete aduelas de cada lado, resultando o balanço total de 35 metros. A estrutura possuía 4 pilares, apenas dois dentro do lago (Figura 2.11).

A seção transversal da superestrutura é constituída de 3 células de 4,5 metros, resultando a largura total de 13,5 metros sem balanços. Passeios de 1,5 metros diminuem a faixa de rolamento para 10,5 metros, suficiente para 3 pistas de tráfego. A altura de seção é variável, começando nos apoios de 12 metros e terminando no meio do vão com 2,1 metros.

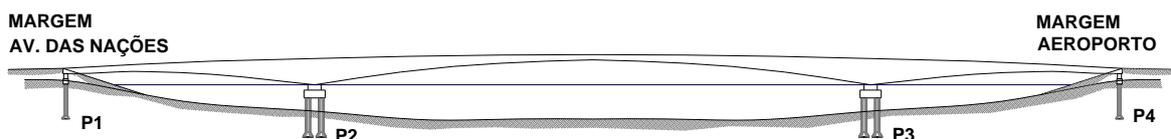


Figura 2.11 – Localização dos pilares conforme proximidade com as margens. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

Ao ter início a terceira aduela, com os cabos todos pendentes e apoiados horizontalmente em flutuadores, fortes ventanias causaram em meados 1970, um enorme transtorno. No dia 13 de junho de 1970 ocorreu o primeiro acidente com os flutuadores que suportavam os cabos da superestrutura correspondente ao pilar P2 (Av. Nações). Os flutuadores balançaram tanto com as fortes ondas geradas pelo vento que os cabos envolvidos em bainhas foram jogados na água e se enrolaram de tal maneira que foi necessário um árduo trabalho para recuperá-los. Diante do ocorrido foi providenciado a construção de novos flutuadores e o resgate dos cabos. Em 18 de julho de 1970, sobreveio novo acidente com os flutuantes e os cabos já colocados em parte sobre os mesmos, novamente a fundaram.

Em decorrência a esse fator, que demonstrava a impossibilidade de conseguir uma ancoragem perfeita para os flutuantes suficientemente segura para resistir à violência das águas do Lago por consequência dos fortes ventos que sopram em Brasília nesta época, a SOBRENCO solicitou à NOVACAP, providencias no sentido de ser interditada a navegação no local a fim de se evitar novos acidentes. Este trabalho se encerrou em 17 de agosto de 1970, em seguida foi iniciado o levantamento dos cabos e sua colocação em cima dos flutuantes sendo concluído em 30 de setembro de 1970 (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

Devido ao forte entrelaçamento dos cabos com os flutuantes no fundo do lago, foi necessário fazer um içamento com auxílio de guindaste instalado na plataforma do Pilar P2 (Av. Nações) essa operação foi feita suspendendo um cabo de cada vez. Após a colocação dos cabos sobre os flutuantes é feita a sua arrumação, separando as diferentes camadas, este trabalho é feito manualmente, requerendo um grande tempo dos funcionários, e fora realizado no mesmo momento da execução dos balanços sucessivos.

Com o acidente ocorrido, as bainhas ficaram bastante danificadas (Figura 2.12). Praticamente, ficaram inutilizadas 80% de sua extensão, sendo necessária a sua recuperação, que só pôde ser feita no campo de trabalho de cada elemento em execução. Para garantir um bom comportamento dos cabos por ocasião da protensão, a cada 5 metros de execução da laje superior, as bainhas receberam um enxerto de chapas metálicas envolvidas em plástico.

Como os cabos caíram no lago, temia-se pela fragilidade dos cabos ao serem submetidos à protensão, depois de retificados os laços produzidos pelas ondas (Figura 2.13). No final do mês de agosto de 1970, a NOVACAP decidiu contratar uma firma consultora para assessoria técnica e avaliação das condições de trabalho na obra. A firma contratada foi a Sociedade Técnica para a Utilização da Pré-Tensão-STUP.

Os 760 cabos foram distribuídos em várias camadas (Figura 2.14), um ao lado do outro, ocupando a largura total do tabuleiro. Os espaços reservados para a entrada do concreto foram os mínimos exigidos pelas normas. Ao ser aplicada a protensão, diversos cabos não puderam ser adequadamente alongados, e assim a protensão ficou aquém dos resultados esperados. A cada aduela acrescentada, a protensão era cada vez menor do que o valor desejado, esperando-se no final perdas superiores a 50%.

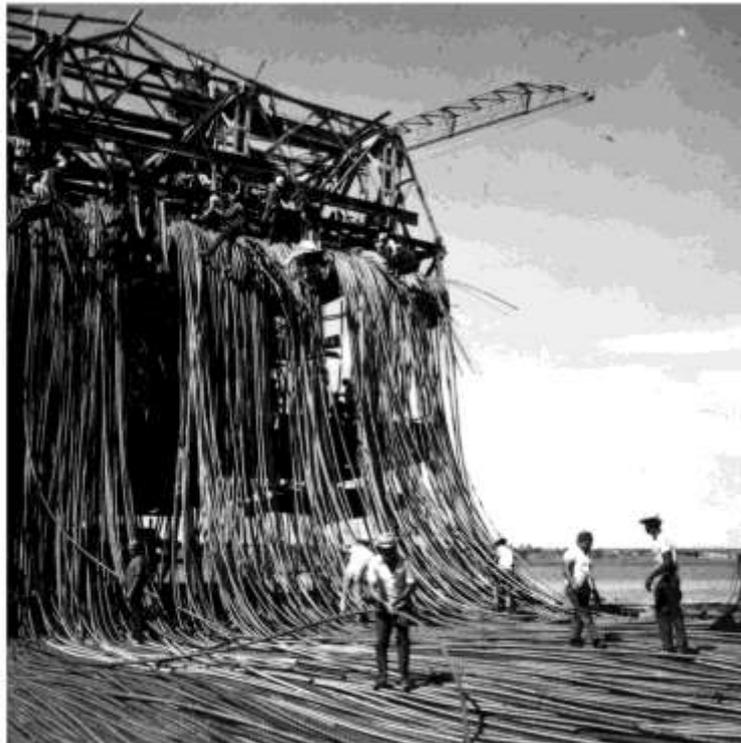


Figura 2.12 – Arrumação dos cabos sobre os flutuadores. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1970).



Figura 2.13 – Separação dos cabos em diferentes camadas, para a correta arrumação sobre os flutuadores. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1970).

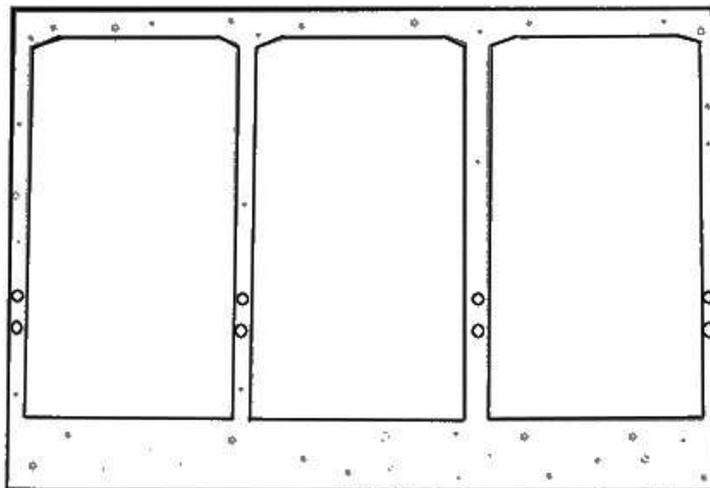


Figura 2.14 – Disposição dos cabos de protensão. Seção transversal da aduela 1, lado margem. Foto: (ODC, 1975 apud VASCONCELOS, 1985).

No dia 15 de outubro de 1970, a SOBRENCO entra com ofício pedindo alteração no prazo de entrega da obra, devido aos fatores decorridos acima, essa prorrogação seria de 150 dias a partir do término da prorrogação já concedida anteriormente. Apesar de todas as explicações, a NOVACAP rebate o pedido argumentando outros motivos que não foram explanados no ofício e assinalados pela fiscalização da NOVACAP (CORREIO BRAZILIENSE, 1970, 1 cad. p. 2).

Os motivos de atraso na obra verificados pela fiscalização da contratante foram falta de cimento, descontentamento dos operários em consequência de atraso de pagamento, falhas administrativas, faltando à obra uma administração atuante e ativa, onde serviços que deveriam ser orientados por responsáveis especializados ficaram a cargo de sub-encarregados e quantidade deficiente de operários especializados. Outro fator que foi considerado é o fato do Pilar P3 (margem Aeroporto) não ter tido problema de afundamento de cabos e apresentar atraso maior do que o Pilar P2, demonstrando que existiam problemas que iam além de cabos afundados. No dia 5 de novembro de 1970 o Engenheiro Fiscal Rubens José Dias não concorda com o pedido de prorrogação do prazo de entrega da obra, e solicita um esclarecimento maior em relação à obra da ponte. A diretoria da NOVACAP realiza uma reunião com a SOBRENCO no dia 14 de janeiro de 1971 e aborda diversos fatores como protensão, cabos dobrados, injeção, eventual reforço e prova de carga (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

Todas as dúvidas levantadas foram esclarecidas pela SOBRENCO em 18 de janeiro de 1971 onde seguem as principais exposições, conforme demonstradas em ofício assinado pelo diretor da empresa, Sérgio Marques de Souza, no qual destacamos (Ofício 1971, pag. 1-4) (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71):

“1) Protensão:

Problemas com referência a protensão dos cabos ao ser executado o 2º elemento do Pilar P3, verificamos que na seção central da ponte, a protensão poderia atingir até 86,1% do valor previsto, sem que houvesse tração na borda superior. (...) É oportuno esclarecer que em nosso cálculo, além de terem sido calculadas as tensões que se manifestam em todas as seções em decorrência de todas as cargas atuantes, foi feita a verificação à ruptura das seções mais solicitadas de acordo com o critério das normas brasileiras. (...) Não há porque temer, portanto, qualquer problema quanto à segurança da obra, tanto no futuro, quanto durante a sua execução. Considerando o fato de que qualquer verificação deverá ser feita para o conjunto da obra, não há

como fixar valores mínimos absolutos a serem tolerados nos próximos elementos.

2) Cabos dobrados:

Com relação ao problema que ocorreu com os cabos que sofreram dobramento em consequência do acidente ocorrido com os mesmos, cabos esses que representam menos de 5% do total. (...) Verificou-se, mediante o Certificado, que não houve a menor redução de resistência do aço com dobramentos análogos aos ocorridos com os cabos.

3) Injeção:

Com relação à injeção dos cabos, após a sua protensão é inevitável numa obra dessa extensão e com essa quantidade de cabos que as bainhas sejam eventualmente afetadas em alguns pontos, durante a concretagem, e que possa haver a penetração da argamassa do concreto, obstruindo os cabos em alguns pontos. (...) Como a injeção tem o efeito apenas de proteger os cabos que já estão totalmente envolvidos pelo concreto, da estrutura, e criar também a aderência dos mesmos. Não tendo qualquer função em relação à resistência da obra, não há porque ter qualquer receio quando ocorreu uma eventual obstrução, que poderia no máximo ocasionar uma falta de injeção em pequenos trechos do cabo.

4) Eventual reforço:

Diante dos fatos expostos, dos critérios adotados no projeto e no cálculo estrutural e a forma como estão se processando os serviços, consideramos de todo absurdo admitir qualquer hipótese de eventual necessidade de reforço da obra.

5) Prova de carga:

Tendo em vista os critérios adotados no cálculo da estrutura e as verificações da segurança à ruptura a que procedemos em que ficou constatado que o número de cabos existentes em cada seção é sempre bastante superior aos indicados pelo cálculo, o que confere a obra coeficiente de segurança à ruptura bastante superior aos exigidos pela norma brasileira de concreto pretendido. Não há motivo para dúvidas quanto a sua segurança tornando-se desnecessária qualquer prova de carga para controle dessa segurança. (...)”

Esclarecidos os pontos abordados, a SOBRENCO afirmara no final do documento o seguinte: *“desejamos afirmar, que se tivéssemos constatado qualquer problema que pudesse afetar a integridade da obra, já teríamos tomado as providências que se fizessem necessárias e dado a solução conveniente”* documento assinado pelo presidente da Empresa Sergio Marques de Souza (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

Dentre os esclarecimentos prestados pela SOBRENCO à NOVACAP, somente o item de injeção sofreu objeção onde segue a justificativa da Divisão de Estudos e Projetos assinada pela Engenheira Chefe Andréa Toscano, onde se lê:

“a injeção, além de garantir a aderência, é o único meio de garantir a protensão do aço. Isto é particularmente importante na obra em questão, por se tratar de concreto exposto ao tempo e em vista da prolongada exposição primeiramente ao tempo, e em seguida à água do lago, a que foram submetidos os cabos. A diferença da armação do concreto armado comum, o aço do concreto protendido (em vista também do pequeno diâmetro) é particularmente sujeito as corrosões se não for bem protegido. Trata-se em geral de fenômenos lentos, que poderão criar problemas a distância de vários anos, talvez depois de terminado o prazo de responsabilidade civil do construtor; mas não por isso pode ser tolerado pela Administração. A questão foi levantada em vista dos problemas surgidos na obra. Foi já exigido da firma providenciar uma bomba elétrica para melhorar o serviço da injeção” (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

A NOVACAP permitiu a continuidade da obra e estendeu o prazo de entrega para mais 250 dias, sendo esse para 28 de junho de 1971. No dia 11 de fevereiro de 1971, 50% da superestrutura da ponte já estavam concluídas, com 134 metros construídos dos quais 50 metros tinham sido construídos em apenas um mês, as obras para seu término estavam a todo vapor. Apesar de toda confiança depositada à empresa SOBRENCO S/A, as obras não pareciam avançar muito além do que constatado após fevereiro de 1971, a empresa demonstrava constantes atrasos e problemas técnicos que fizeram a NOVACAP paralisar a obra (Figura 2.15 e Figura 2.16).

Em junho de 1971 a paralisação das obras era justificada por um problema com a resistência dos materiais. O engenheiro responsável pela construção da ponte Sr. Fernando Cardoso de Castro, com apenas 25 anos, acreditava que os cabos de sustentação eram suficientes para que se desse prosseguimento à obra, já o engenheiro fiscal da NOVACAP não concordava achando ser necessário mais cabos para a sustentação. Como o problema existente não poderia ser colocado em plano secundário, o Governador Prates da Silveira anunciou em 28 de julho de 1971, o envio de um perito para o reexame conclusivo da situação existente (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71) e (CORREIO BRAZILIENSE, 23 agosto de 1970).



Figura 2.15 – Panorama das obras no momento de paralisação, Pilar P1. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).



Figura 2.16 – Pilar P2, momento da paralisação das obras. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).

Em 20 de novembro de 1971, ocorreu um fato na cidade do Rio de Janeiro que provocou o reexame de toda a construção (CORREIO BRAZILIENSE, 1971). Parte do viaduto Paulo de Frontin, no centro da cidade, desabou, a causa externa determinante fora o desequilíbrio da estrutura por presença de um caminhão carregado de concreto. No momento de descarregamento de material, o caminhão fez uma transferência de peso para uma das alas da pista que resultou na ruptura da ferragem do pilar central em virtude da força de arrasto provocada em uma só direção. Houve mortos e feridos. A firma construtora do viaduto era a mesma que iniciara a Ponte Costa e Silva, contratada pelo departamento de Estradas e Rodagens. As obras da ponte em Brasília foram paralisadas em junho de 1971, e no início de 1972 a NOVACAP rescindiu o contrato de forma amigável com a SOBRENCO S/A (ARQUIVO PÚBLICO DO DF, 1969-71).

A Ponte Médici (atual Ponte das Garças) (Figura 2.17) foi construída, às pressas, devido ao atraso nas obras da Costa e Silva. Uma construção simples, em linha reta, iniciada em 29 de junho de 1973 e concluída seis meses depois, 14 de janeiro de 1974. Para essa construção foi escolhido um trecho estreito e pouco profundo do lago, no mesmo braço e a 3 quilômetros de distância (Figura 2.3), mas sem o caráter monumental da primeira; apenas como uma decisão política do então governador do Distrito Federal Hélio Prates da Silveira (1939-2004) que ocupara o novo cargo seguido do prefeito Wadjô Gomide. A Ponte das Garças, entretanto, foi feita a uma altura inferior àquela que permitiria a passagem de barcos à vela, felizmente em área extrema do Lago Sul, onde a atividade de veleiros é menor (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.25).



Figura 2.17 – Ponte da Garças. Fonte: (Foto do autor, 2007).

Em março de 1974, quando Elmo Serejo (1928-1994) tomou posse do governo do Distrito Federal, anunciou que terminaria a ponte de Oscar Niemeyer, retomando as obras e transformando o esqueleto em passagem efetiva sobre o lago (Figuras 2.18 e 2.19) (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.11).



Figura 2.18 – Obras da Ponte Costa e Silva totalmente paralisadas. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).



Figura 2.19 – Panorama das obras paralisadas, da rescisão de contrato até a sua reconstrução esse foi o panorama do lago visto pelos brasilienses. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1971).

2.5 - O REFORÇO ESTRUTURAL

A ECEL, com o contrato de reconstrução da ponte, fez com o escritório técnico J. C. de Figueiredo Ferraz, uma análise circunstanciada da obra. A empresa foi fundada em 1941 pelo engenheiro e professor da Escola Politécnica de São Paulo Figueiredo Ferraz, de grande competência técnica acabou se consolidando como uma das mais importantes na área da construção brasileira entre seus inúmeros projetos pode-se destacar: Metrô de São Paulo e Rio de Janeiro, Porto de Santos, MASP em São Paulo com a estrutura protendida pelo Processo Ferraz, além de diversos aeroportos e plataformas de exploração de petróleo da Petrobras.

A empresa Figueiredo Ferraz verificou a memória de cálculo, as tensões no concreto e as reações nos apoios, constatando assim a real situação da obra. Após os estudos e definidas as opções, o processo construtivo foi completamente modificado, o sistema de concreto protendido foi substituído pela utilização de uma estrutura metálica de 58 metros para o vão central (Figura 2.20), onde resultou em um alívio para a superestrutura reduzindo seu peso e criando duas articulações, em vez de uma, prevista pelo projeto inicial.

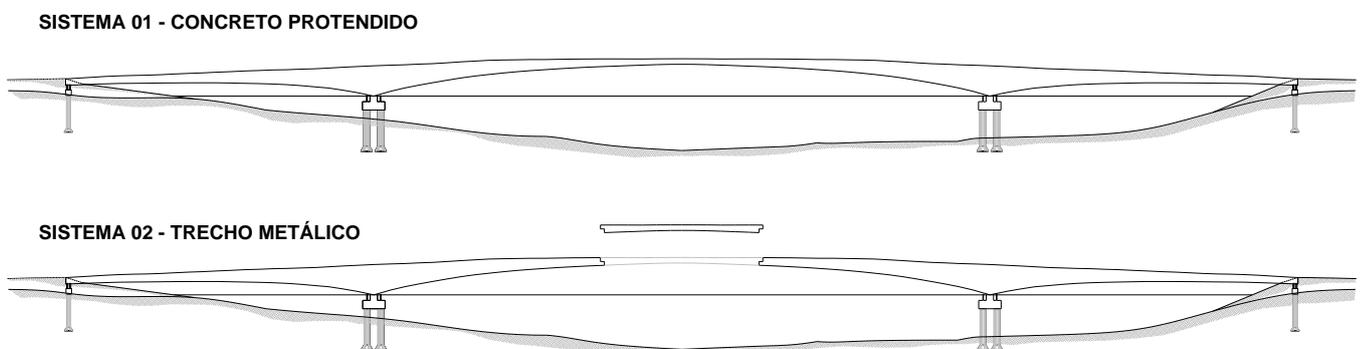


Figura 2.20 – Comparação entre os sistemas construtivos. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

O sistema escolhido foi o Gerber, em aço corten (anti-corrosivo), que consistia em um vão central metálico de 58 metros.

A adoção de estrutura metálica em face do seu reduzido peso (cerca de 1/3 do peso da estrutura protendida inicial), reduziu substancialmente os esforços solicitantes, permitindo um método seguro de recuperação. Na época, essa era a maneira correta e mais moderna de coroamento de grandes vãos em viga, por a estrutura Gerber oferecer melhores condições de concordância vertical, possibilitando a eficiência mais rigorosa do greide de concreto.

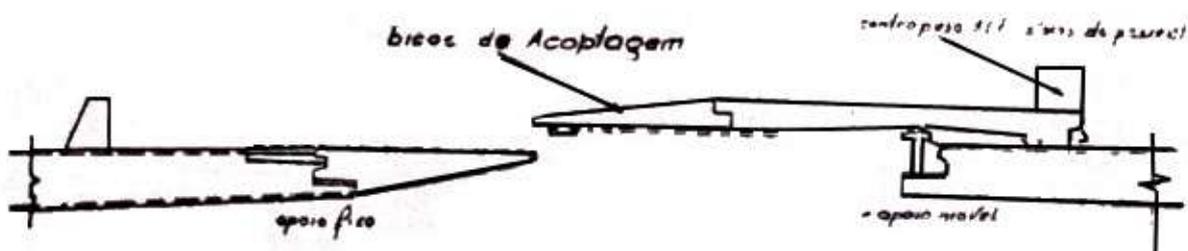


Figura 2.21 – Esquema de colocação da laje central metálica da ponte Costa e Silva. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).

Encontradas as soluções para a conclusão da ponte, mediante o reforço da estrutura e a adoção do vão central metálico (Figura 2.21) é iniciado a empreitada prestada pela empresa ECEL, onde o planejamento da obra fora elaborado com esmero sendo despontado todas as minúcias da obra. As operações e os detalhes dos serviços foram realizados de tal modo que o engenheiro residente, seus auxiliares, mestres e operários tomavam prévio conhecimento de cada etapa do serviço (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.se3).

As primeiras etapas de trabalho foram a retirada dos cabos de protensão ainda não protendidos e injeções de nata de concreto; depois injeção dos cabos protendidos não injetados, a seguir colocação de 12 cabos de reforço de 200 toneladas em cada pilar; colocação de 18 cabos de reforço de 300 toneladas em cada um desses pilares e colocação de cabos inclinados, era realizado, praticamente uma nova superestrutura. Os cabos que ficaram durante anos pendurados foram retirados, pois não serviam mais para a obra e substituídos por cabos de maior potencia (200 toneladas e 300 toneladas pelo sistema VSL).

Ao se retirar esses cabos antigos foi proporcionado à estrutura um alívio durante a fase de reforço, posteriormente a essa retirada de peso, aproximadamente 300 toneladas, procedeu-se a injeção dos cabos existentes no trecho concretado para tornar a estrutura solidária e

homogênea. Foram consumidos 106.304 litros de pasta de injeção, totalizando 1.408 sacos de cimento.

Nos pilares existentes foram encontradas fissuras comprometedoras. A ECEL juntamente com o apurado estudo da Figueiredo Ferraz encontrou a solução para este problema introduzindo junto aos pilares centrais cabos inclinados (Figura 2.22 e Figura 4.19) com inclinação de 10° a 30° graus em relação a vertical em número de 576 unidades, para esse serviço foram utilizados cabos de 40 toneladas (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.se3).

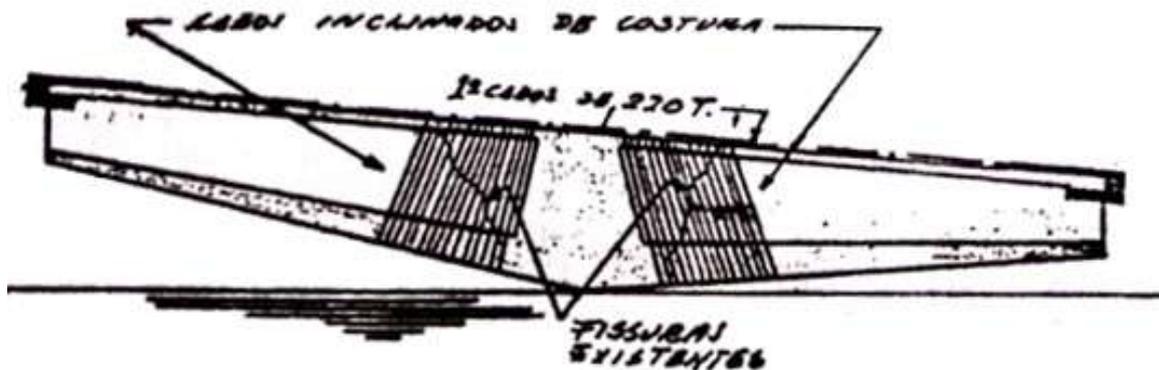


Figura 2.22 – Esquema do reforço dos pilares da ponte, cabos inclinados garantiram a solidez da ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).

Enquanto se realizava o reforço dos pilares, procedia-se uma detalhada pesquisa das condições das fundações e do solo onde se apoiava a ponte. Esse estudo foi realizado por uma grande equipe de técnicos comandados por Josias Pugliese da Fonseca, da ECEL. Essa equipe executou sondagens atingindo a cota de 20 metros abaixo da base dos tubulões já existentes. Para uma correta identificação do terreno procedeu-se a retirada de amostras indeformadas do solo, em seguida enviadas para laboratórios no Rio de Janeiro e São Paulo.

Os resultados obtidos foram verificados pelo professor Sigmundo Golombek, com um parecer conclusivo: “não se deve ultrapassar no tipo de material examinado, a taxa de bordo de 10 quilos por centímetro quadrado”. Essa consideração acarretaria outros problemas, seu significado principal seria de que os tubulões e toda a infra-estrutura da ponte, fincada para além do fundo do lago, teriam que ser reforçados, o que demandaria novas técnicas, inclusive subaquáticas. Com o parecer do professor Golombek, a ECEL constatou que a taxa de trabalho das fundações haviam sido reduzidas de 19,1 kg/cm² originais, para 15,75 kg/cm².

A necessidade de um reforço nas fundações da ponte era imprescindível. O projeto de reforço foi realizado pelo diretor da Figueiredo Ferraz, engenheiro João Antônio Del Nero.

A solução para o reforço das fundações submersas na água a uma profundidade de 9,50 m foi a de se acrescentarem aos seis tubulões de 1,50 m de diâmetro existentes, mais quatro tubulões. O problema técnico passou a ser qual o processo ideal para conseguir a ligação entre os tubulões existentes com os novos que serviriam de reforço (Figura 2.23).

A escolha foi de um método inédito para a engenharia nacional, cravaram-se os quatro tubulões (camisa metálica com 1,5 m de diâmetro) com auxílio de martelo Delmaq a explosão com 7.500 kg, utilizando-se duas campânulas pneumáticas que permitiram o trabalho a mais de 25 metros de profundidade. Cada tubulão de reforço foi armado e concretado até a cota 12,38 (a cota 0,00 é o nível da água). Em seguida colocou-se dentro do tubulão de reforço um outro metálico de 0,80 m de diâmetro que se apoiou na cota 12,38 e foi armado e concretado. Foi executado o corte do tubulão por especialistas da firma B.H. Engenharia de 1,50 na cota de 12,38, ficando, portanto, os tubulões de reforço com dois diâmetros: da cota 4,00 a cota 12,38 com diâmetro de 0,80 m e da cota 12,38 até a base alargada com diâmetro de 1,50 (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.se3).

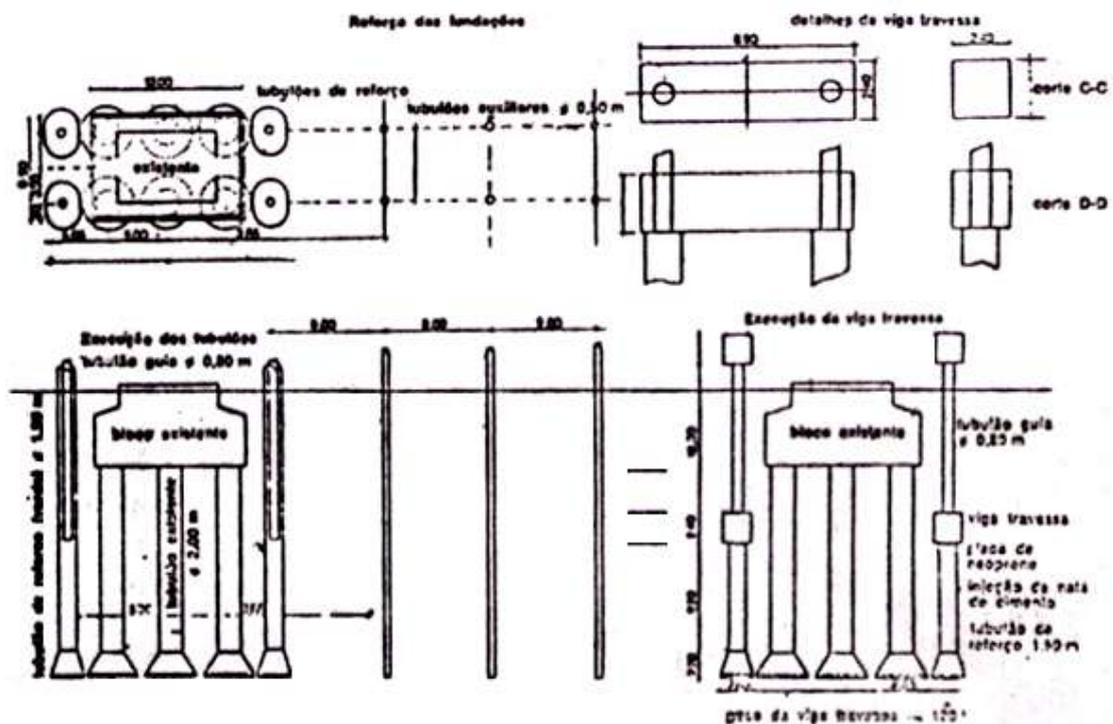


Figura 2.23 – Detalhe da solução de reforço das fundações adotada para a ponte. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).

Sobre cada par de tubulões, um de cada lado da ponte, foi executado em concreto armado uma viga travessa pesando 120 toneladas. Com auxílio de uma estrutura metálica, um sistema de macacos e réguas metálicas perfuradas, a viga travessa desceu lentamente até se apoiar a 12,38 m abaixo da água, onde o tubulão se alarga para 1,50 m.

No mesmo momento em que esse processo era realizado, foi construído sobre cimbramento, apoiado em estaqueamento de trilhos, a viga celular pesando 400 toneladas e deslocando 250m³. A viga foi construída em concreto armado e protendido, em caixões perdidos para aliviar seu peso na flutuação. Ao lado do cimbramento foram cravados trilhos 3 TR, que formaram um pórtico para a descida da viga celular até a água, utilizando-se o mesmo sistema de estrutura metálica, macacos e réguas metálicas perfuradas presas à viga.

Após executada e protendida, a viga celular foi baixada até a água e acoplada de topo a dois flutuantes metálicos, construídos em quatro tubos de 14 m de comprimento. Essa viga, flutuando, navegou ao encontro do pilar em percurso preparado e dirigido por engenheiros mergulhadores da B. H. Engenharia, colocando-se por entre os seis tubulões auxiliares, cravados e concretados a frente de cada pilar.

Com o auxílio de válvulas colocadas nos flutuadores, o conjunto foi injetado de água e todas as vigas celulares flutuantes foram submergidas por um sistema parecido com de um submarino, até se apoiarem sobre os roletes colocados nos tubulões auxiliares a 9,50 m abaixo do nível da água. Por cabo de aço, a viga foi puxada e entrou sobre a primeira viga travessa, depois sobre o bloco da ponte e, finalmente, sobre a segunda viga, ficando assim posicionada sobre as duas vigas travessas e sob o bloco existente.

Desse momento em diante, a fundação (Figura 2.24 e 2.25) ficou sobre dez tubulões, restando apenas a solidarização do bloco existente sobre os quatro novos tubulões, o que foi obtido com o emprego de aparelho de transferência de carga entre o bloco existente e a viga celular, espaço onde foram injetados nata de cimento, sob pressão de 17 kg/cm². As fundações possuem grandes dimensões em função de seu reforço (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.9).



Figura 2.24 – Engenheiros explicam com maquete o método adotado para permitir a conclusão da ponte em visita do Governador na data 19/09/74. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1974).

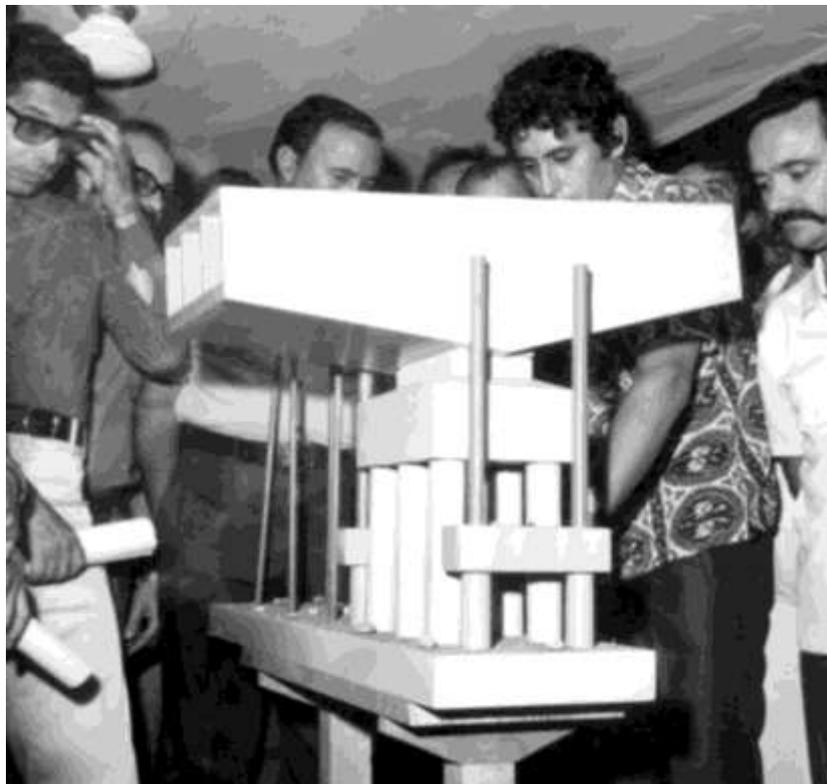


Figura 2.25 – Visita do Governador Elmo Serejo do Distrito Federal para verificação do projeto de reforço da estrutura da Ponte na data 19/09/74. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1974).

Após essa etapa a solidez da ponte estava garantida, sem qualquer interferência ou modificação na sua forma final – o trabalho inédito, inovador, anônimo e portentoso da engenharia nacional se esconde sob as águas do lago.

Quando os reforços de fundação terminaram prosseguiu-se com os trabalhos de conclusão da superestrutura. Adotou-se o método de balanços sucessivos com protensão por aduela devido aos grandes vãos a serem executados, 220 metros e 110 metros, e a profundidade do lago que tornaria a obra mais onerosa se usado o método tradicional de cimbramento.

Cada aduela de cinco metros seguiu o seguinte cronograma de operação: movimentação das treliças; transferência de apoio das treliças; posicionamento do andaime principal; colocação de formas externas; armação da laje inferior; concretagem da laje inferior; armação de vigas, forma de vigas e da laje superior; armação da laje superior; concretagem das vigas e da laje superior; cura do concreto; protensão dos cabos e injeção e finalmente a desforma (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.9).

Estando concluída a superestrutura em concreto protendido executou-se o fechamento do vão central com o trecho em estrutura metálica, com o sistema construtivo de uma viga Gerber, com 58 metros de comprimento (Figura 2.26).

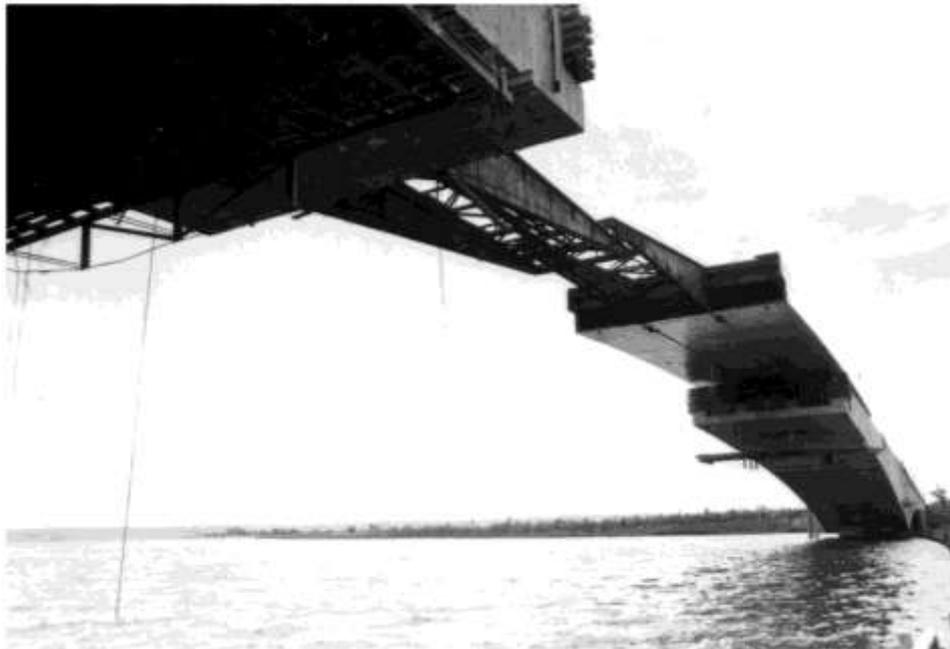


Figura 2.26 – Trecho em estrutura metálica da Viga Gerber, 16/01/76. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).



Figura 2.27 – Vão central às vésperas de ser fechado e concluído, 16/01/76. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).

A viga Gerber foi fabricada *in loco*, no canteiro de obras pela empresa USIMEC e teve que percorrer uma trajetória de aproximadamente 365 metros até a sua posição final. Para a operação de seu transporte foram construídas pistas de lançamento em concreto com canaletas de aço; apoios deslizantes foram acoplados à viga metálica para permitir seu deslizamento sendo a peça tracionada por um guincho elétrico instalado sobre a própria ponte. Os vestígios desse sistema de transporte podem ainda ser encontrados até hoje na margem leste do lago Paranoá.

Às onze horas e quinze minutos do dia 6 de fevereiro de 1976 o General Ernesto Geisel que era o quarto presidente imposto pelo regime militar, e a convite do Governador Elmo Serejo, inaugurou a primeira ponte monumento a cruzar o lago Paranoá – a Ponte Costa e Silva. Surgindo, então uma das mais belas pontes do país. A visão lateral da ponte em conjunto nos dá realmente aquela sensação que Niemeyer deixava transparecer: uma andorinha roçando o bico nas águas.

Concluída a Ponte Costa e Silva, o Lago Sul consolidou-se, definitivamente, como o bairro preferido da sociedade brasiliense, e sua expansão acelerou-se. Seu adensamento se processou em poucos anos, forçando a ampliação do número de lotes (que alcançou oito mil) proporcionando o surgimento de inúmeros núcleos de comércio local, como apoio às quadras que iam sendo ocupadas em rápida sucessão (TAMANINI, 1997).



Figura 2.28 – Ato solene de inauguração da Ponte com a presença do Presidente Ernesto Geisel e do Governador do DF, Elmo Serejo. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).



Figura 2.29 – Logo após a inauguração, a ponte é aberta ao tráfego. Fonte: (Arquivo Público do DF, 1976).

Tabela 2.1 – Dados da Ponte Costa e Silva. Fonte: (Correio Braziliense, 1976).

1) Comprimento entre pilares extremos	440,00 m
2) Laje de aproximação	12,00 m
3) Comprimento Total	452,00 m
4) Largura	13,50 m
5) Área do Tabuleiro	6.102,00 m ²
6) Número de vãos 3 – extremos e central	110,00 m e 220,00 m
7) Volume de concreto protendido	9.905,31 m ³
8) Armadura de protensão com cabos de 40, 220 e 300 ton.	546.266,00 kg
9) Armadura convencional	1.013.309,00 Kg
10) Área de forma	15.666,00 m ²
11) Passeio: comprimento	904,00 m
12) Volume de concreto do passeio	271,20 m ³
13) Guarda corpo: comprimento	904,00 m
14) Volume de concreto do guarda corpo	282,50 m ³
15) Vibradores: comprimento	904,00 m
16) Volume de concreto dos vibradores	33,90 m ³

2.6 - CONCLUSÃO

Após sete anos de vicissitudes foi finalmente concluída a construção da Ponte Monumental sobre o lago Paranoá em Brasília. Durante um quinquênio, a obra desafiou Governos, empresas de construção e de consultorias. Suas estruturas chegaram a ser condenadas por diversos especialistas e permanece, até hoje, na memória dos brasilienses a lembrança de um esqueleto de concreto armado quebrando a serenidade encontrada nas águas do Paranoá.

Um projeto arquitetônico e de engenharia, projetado por um dos maiores arquitetos brasileiros e idealizador da própria capital, acabou desafiando o poder de iniciativa e de decisão de três governos. A determinação de sua construção veio do então prefeito Wadjô da Costa Gomide (1933-2003), que governou de 05/04/67 a 30/10/69. Os problemas iniciais aconteceram em seu governo, ficando a cargo do governo seguinte a continuação da obra. Já com o título de Governador do Distrito Federal, Hélio Prates da Silveira (1939-2004) assumiu o governo em 12/11/69, e permaneceu até 15/03/74. Os maiores problemas foram enfrentados em sua administração, que demonstrou pouco poder de empreendimento para a concretização da obra.

Um dos personagens mais importantes para a conclusão da obra pode ser encontrado na figura do Governador Elmo Serejo Farias (1928-1994) que governou o Distrito Federal no período de 02/04/74 a 29/03/79 e intensificou os trabalhos de recuperação e conclusão da

Ponte de Oscar Niemeyer. O engenheiro Elmo Serejo Farias possuiu um mandato marcado pela realização de grandes obras públicas, tornando evidente seu grande poder de decisão.

Até o início dos anos 80, o setor que mais absorvia a mão-de-obra pouco qualificada era a construção civil, depois este contingente foi migrando para o comércio e serviços, talvez por esse motivo, a política de Elmo Farias esteve voltada para a construção e melhoramento de Brasília com grandes obras públicas. Além da conclusão da Ponte, seu governo foi responsável pela ligação das Asas Norte e Sul com a construção dos viadutos da Via W3 e outras obras viárias como o Eixo Rodoviário, entrada do Setor de Indústrias e L2 Sul, empreendimentos voltados para dar outra dimensão ao tráfego rodoviário da cidade.

Além das obras no sistema viário urbano e suburbano que até hoje sustentam confortavelmente o trânsito de Brasília e cidades satélites, na gestão de Elmo Farias foram entregues o Terminal Rodoviário de Cargas do Distrito Federal, a Barragem do Rio Descoberto que abastece de água Brasília e a construção do Parque da Cidade.

A conclusão da Ponte Costa e Silva constituiu um alívio para os engenheiros e construtores nacionais, eis que ela representava sem dúvida à época, o maior e enervante desafio que, permanentemente queria desmentir a capacidade executiva da Engenharia Brasileira, essa vitória honrou uma administração trazendo alegria para as classes dos construtores e engenheiros brasileiros, da qual o Governado do Distrito Federal Elmo Serejo Farias, fazia parte.

É importante ressaltar, que o sistema de concreto protendido adotado para a construção da ponte, se consagrou no Brasil, nas últimas décadas como, técnica construtiva. Este fato pode ser comprovado através do grande número de obras civis realizadas, desde silos e tanques, passando por pontes e viadutos, até edifícios de todos os tipos, incluindo obras com mais de 40 anos.

A primeira grande obra de protensão no Brasil foi realizada em 1948, na ponte do Galeão no Rio de Janeiro utilizando o sistema Freyssinet e com todos os materiais importados da França. Em 1952 a Companhia Siderúrgica-Belgo Mineira iniciou a fabricação do aço de protensão em nosso país e a ponte Juazeiro, a segunda obra protendida brasileira, utilizou o aço nacional.

Talvez um dos motivos que agravaram a conclusão da ponte foi o sistema de protensão adotado. A ponte foi executada pelo método de balanços sucessivos, sistema aplicável em qualquer tipo de tipologia – viga contínua, arcos, tirantes e etc. – que possui um princípio em que, a cada escoramento e formas executadas em balanço, concretiza-se a cada três dias um trecho. No sistema da ponte, os cabos de protensão já estavam estirados sobre flutuadores, se o sistema de protensão utilizado fosse por trechos – a cada trecho concretado fosse realizado a protensão – muitos dos problemas passados não teriam nem existido.

Brasília possui atualmente, três pontes sobre o Lago Paranoá, que ligam o Plano Piloto ao Lago Sul, até pouco tempo todas levavam nomes de presidentes do Brasil, a Ponte Costa e Silva, Ponte Juscelino Kubitschek e Ponte Médici. A Ponte Médici voltou a ser chamada de Ponte das Graças em 2005. O Decreto 12.053, de 14 de dezembro de 1989 havia mudado o nome, mas as placas ainda apresentavam o nome do presidente militar.

A ponte Costa e Silva, obra de Oscar Niemeyer completou 30 anos em 2006, por trás de toda a vitória da engenharia nacional fica apenas uma decepção, o nome dado a ponte. Projetada com o nome de Ponte Monumental, a obra foi batizada de Ponte Costa e Silva em homenagem ao ex-presidente militar em sua inauguração. Na cidade idealizada por um democrata e concebida por dois arquitetos libertários, que pensaram Brasília com base num sonho democrático, ter um monumento celebrando os militares, é uma ofensa à memória de Juscelino Kubitschek e do próprio Niemeyer. A mudança do nome é defendida pelo escritor e jornalista Cláudio Bojunga e Carlos Murilo, sobrinho de Juscelino.

A filha de Juscelino Kubitschek, Maristela Kubitschek Lopes, prefere seguir os princípios do pai, “*um conciliador por natureza*” e acredita que a mudança do nome da ponte não deve ser feito por vingança e sim por um plebiscito pela vontade popular. E se tivesse que escolher um nome para a ponte seria o de Oscar Niemeyer. “quando estou em Brasília, passo pela Ponte JK ou pela ponte, linda, de Oscar Niemeyer. E se tivesse que mudar o nome dessa ponte, que fosse para *Oscar Niemeyer*. Meu pai ficaria muito feliz” (CORREIO BRAZILIENSE, 2006).

3 - FORÇAS INTERNAS E FORMA

3.1 - INTRODUÇÃO

Toda forma construída, para que se mantenha estável e perene, necessita de um sistema estrutural. Não existe forma, natural ou construída, sem o uso desse sistema e de seus componentes, todo esse sistema é composto de elementos que se inter-relacionam para desempenhar uma função, permanente ou não, que estarão sujeitos aos fenômenos físicos que ocorrem nos sistemas estruturais.

Os elementos estruturais são usualmente considerados corpos rígidos, apesar de definidos como corpos rígidos essa disposição esconde o fato de que são corpos deformáveis – são determinados rígidos para o cálculo dos esforços – pois as forças que atuam nas formas arquitetônicas têm diferentes pontos de aplicação. As forças que atuam sobre corpos rígidos são classificadas em *forças externas* e *forças internas* (VIERO, 2004).

As forças externas são decorrentes da ação de agentes externos sobre os corpos em análise. São inteiramente responsáveis pelo comportamento externo dos corpos rígidos, causando-lhes movimento ou os mantendo em repouso, para efeito de determinação, são divididas em *forças ativas* e *forças reativas* (VIERO, 2004).

As forças externas ativas podem ser representadas pela ação de diversos fenômenos físicos impostos pela natureza, como: atração gravitacional, ventos, variações térmicas, abalos sísmicos e neve, entre outros, são conhecidas também como cargas. As interações entre os corpos também são consideradas forças externas ativas. As forças externas reativas são as forças que atuam nas posições vinculares, ou seja, nos pontos de ligação de determinada estrutura ao solo. Essas forças agem sobre os corpos rígidos impedindo movimentos de translação e rotação, onde são usados dispositivos que possibilitam o controle de movimento das estruturas como um todo e de cada uma de suas partes.

As forças internas são os esforços provenientes das tensões desenvolvidas pelos materiais que constituem os corpos rígidos, ou seja, os elementos constituintes da estruturas. As forças internas são responsáveis por manterem unidos os vários pontos materiais que constituem um corpo rígido.

Todos os corpos rígidos, ao serem submetidos a forças externas ativas (cargas) e reativas (reações de apoio), apresentam mudança na forma geométrica (deformações). No momento em que um corpo deforma, entra em estado de tensão, que é o estado que a matéria assume decorrente de uma deformação. As forças se transmitem internamente de um ponto a outro, em um determinado elemento estrutural, por meio das tensões. Determinar os esforços internos implica, em última análise, determinar o estado de tensão a que o elemento está submetido. Essa determinação pode ser feita com os esforços internos associados em estados simples ou duplos de tensão, representados pelo esforço cortante, esforços normais, que são os de tração e compressão simples e o momento fletor, somados a esses também o momento torsor.

A determinação das forças internas independe das características dos materiais, dependem somente da forma geométrica da seção transversal e dos esforços externos ativos e reativos, quando constituídos de um único material. A determinação das forças internas é de fundamental importância para o dimensionamento correto dos elementos estruturais. Determinados os esforços internos, muitas das decisões de projeto são tomadas, como por exemplo, a escolha do material mais adequado para a execução do sistema estrutural, assim como as dimensões mais adequadas dos elementos que compõem esse sistema.

Em termos de dimensões das seções transversais das peças estruturais, alguns esforços influenciam a forma de seus componentes. Dependendo do esforço aplicado ocorre uma exigência diferente em relação à quantidade, à forma de distribuição e à qualidade de material. Existem esforços que exigem mais e outros menos, portanto, existem esforços mais econômicos do que outros quanto ao consumo de material.

Os esforços de tração simples são os que apresentam desempenho mais favorável, exigem a menor quantidade de material resultando em seções mais esbeltas e leves, tanto física quanto visualmente. Os esforços de flexão apresentam desempenhos menos favoráveis exigem seções com uma distribuição mais adequada de material assim, como esse material deve apresentar também, grande resistência e maior quantidade. A compressão simples fica entre esses dois exemplos (BOTELHO, 1998).

Os esforços, representados pelas forças, são elementos fundamentais para a composição estrutural e, influenciam consideravelmente as formas de seus elementos. Com o intuito de facilitar a visualização das deformações provocadas pelas forças internas atuantes nos

elementos estruturais, é possível traçar gráficos que são chamados de diagramas dos esforços internos. Os gráficos traçados são os gráficos de esforço cortante, esforço normal e momento fletor. O gráfico de esforço cortante facilita a visualização das forças internas atuantes na estrutura responsáveis pelas tensões de corte.

O gráfico de momento fletor representa os esforços de flexão, devido às tensões de flexão. Como a força de flexão apresenta o desempenho menos favorável que uma estrutura pode estar submetida – se comparada com a tração simples e compressão simples – e o gráfico de momento fletor é o responsável pela sua visualização gráfica, ele se torna um elemento indispensável e responsável para a melhor elaboração das seções dos elementos estruturais (BOTELHO, 1998).

Utilizar o gráfico de momento fletor como resultado formal das seções estruturais e elementos arquitetônicos garante uma distribuição mais adequada de material, assim como resistência nos pontos onde necessitam de maiores solicitações. Ao associar as formas arquitetônicas com as formas do gráfico de momento fletor, o arquiteto consegue demonstrar o entendimento do comportamento estrutural a que seu projeto estará submetido.

3.2 - RELAÇÃO ENTRE A FORMA ARQUITETÔNICA E ESTRUTURAL

Antes de se considerar a diversidade da relação entre essas formas, que os projetistas podem explorar com o motivo de enriquecer o caráter estrutural é necessário esclarecer o significado de diversos termos.

Forma Arquitetônica: é muito usado, mas pouco definido. Ching sugere que forma arquitetônica é um termo exclusivo que se refere primeiramente ao desenho ou forma externa de um edifício. Ele também acrescenta que o modelo é cercado de diversas relações visuais e propriedades como tamanho, cor e textura, posição, orientação e inércia visual. Forma, em seu ponto de vista, é geralmente e primordialmente entendida como o volume ou a massa tridimensional, mas também incorporada de aspectos arquitetônicos adicionais, incluindo configuração estrutural e formal (CHING, 1996).

Para o objetivo de nossa discussão, forma arquitetônica é essencialmente entendida e limitada como a forma ou formato encerrado e restrito. Essa ponderação simples serve para conceitualmente excluir da forma arquitetônica, qualquer consideração organizacional de

estrutura interna ou externa. Separando a forma estrutural do conceito de forma arquitetônica são criadas oportunidades para se examinar a relação entre forma arquitetônica e forma estrutural.

Forma Estrutural, no contexto dos estudos tradicionais de arquitetura é usualmente explicada como a essência de sustentação do edifício, geralmente associado como esqueleto ou como o sistema estrutural. Segundo Charleson, forma estrutural é entendida como o elemento primordial ou de predominância visual para a concretização do edifício, alguns edifícios possuem mais do que um sistema estrutural e outros apenas um (CHARLESON, 2005).

O estudo de Suckle sobre o método projetual de dez arquitetos, comprovou que os mesmos determinam a forma do edifício considerando um amplo número de fatores que, a primeiro momento, não incluem preocupações estruturais. Problemas de design como: integração do programa com o terreno escolhido, orçamento que possa exceder o design escolhido, tendem a ser considerados como primordiais no início de projeto (SUCKLE apud CHARLESON, 2005). Entretanto, alguns arquitetos partilham do mesmo pensamento do arquiteto Arthur Erickson, com a seguinte afirmação: *“Estrutura é o elemento mais forte e poderoso da forma, ao ponto de não poder ser levado como última consideração na elaboração da forma de um edifício, de fato a estrutura dita acima de todos os outros aspectos, a forma”* (ERICKSON apud CHARLESON, 2005). A estrutura passa a dominar o design, apresentando maior importância.

Com o preceito de se examinar a relação entre forma arquitetônica e forma estrutural, e analisar a estrutura de maneira arquitetônica e não somente estrutural, é que Charleson defende a divisão da relação de suas formas em três modos – síntese, consonância e oposição. Em muitos os casos a estrutura contribui com a arquitetura esteticamente estimulando o sentido pessoal e empregando emoções e intenções.

Síntese entre forma arquitetônica e estrutural: existem sistemas estruturais que exemplificam uma síntese entre a forma arquitetônica e a forma estrutural, nesses casos a estrutura define a forma arquitetônica e, freqüentemente, funções. Algumas vezes definem parcialmente como o edifício se desenvolve.

As estruturas em casca demonstram a mais pura síntese entre forma arquitetônica e estrutural. Outros exemplos são as estruturas em membranas, as estruturas com formas

catenárias, as estruturas com formas parecidas com costelas e esqueletos, os exoesqueletos, os arcos, estruturas como paredes e estruturas em barras. Esses exemplos podem ser executados com os mais diversos tipos de materiais, contando que estejam de acordo com suas necessidades técnicas construtivas.

Consonância entre forma arquitetônica e estrutural: muitos edifícios arquitetônicos se encontram nessa categoria, caracterizada pela existência de uma similaridade não tão concordante, como na existente na síntese e nem tão conflitante quanto na de oposição. Na realidade, demonstra uma co-existência entre diferentes sistemas estruturais para a concretização de uma forma arquitetônica.

Suas formas não podem ser caracterizadas sintéticas, mas, apesar de tudo, são altamente bem integradas, apesar de que a falta de hierarquia da função estrutural pode esconder o componente principal da forma estrutural.

Oposição entre forma arquitetônica e estrutural: a forma arquitetônica e estrutural entra em oposição ou contraste, quando ocorre uma justaposição das qualidades arquitetônicas como geometria, material, escala e textura para definir a qualidade estrutural.

A forma arquitetônica não possui nenhuma ligação com a forma estrutural, a forma estrutural fica totalmente independente da arquitetônica, atualmente é o sistema mais utilizado na concepção formal dos arquitetos, onde a forma arquitetônica quase não possui ligação com a estrutural e passa a ser o elemento de vedação do edifício. A forma arquitetônica se comporta como um invólucro e os componentes estruturais passam a ser internos. Apesar dessa oposição os elementos estruturais acabam, em alguns casos, tomando para si a capacidade de surpresa, espanto e admiração.

Charleson consegue com esse estudo definir a relação existente entre forma arquitetônica e forma estrutural, mas com um caráter apenas compositivo e hierárquico. Com a divisão proposta, o autor não se interessa pelo estudo do comportamento estrutural. Não estuda se a forma geométrica adotada para os elementos estruturais está de acordo com o desenvolvimento e encaminhamento mais intuitivo e racional das formas estruturais propostas.

3.3 - FUNÇÃO ESTRUTURAL NA ARQUITETURA

A arquitetura requer da técnica a possibilidade de sua afirmação palpável, com sua aplicação é possível à arquitetura encontrar suas formas e ser construída, edificada. O domínio da técnica, que sempre fez parte de toda concepção artística, se perdeu com a sua autonomia e a técnica construtiva foi se tornando cada vez mais uma particularidade exclusiva de engenheiros, restando para os arquitetos as tarefas decorativas (SIEGEL, 1966).

No entanto, qualquer esforço por orientar a arquitetura moderna somente por questões decorativas acarretará em uma falta de êxito, assim como não podemos caracterizar a arquitetura por um excesso de técnica, sem assimilações artísticas. É necessário o encontro da arquitetura e da estética com a técnica. Nesse sentido, não se pretende analisar ou propor teorias da arquitetura, nem discussões de caráter estético, o que se pretende é um estudo das construções que apresentam resultados notáveis de encontro com as leis estruturais.

Entende-se aqui por formas técnicas, todas as formas que possuem em sua concepção um encontro perfeito entre arquitetura, técnica e leis estruturais. A compressão das formas técnicas evidencia um grande conhecimento, tendo em vista que pela intuição não se é possível compreendê-las. As formas arquitetônicas apresentam o campo prático da estética. Atualmente, as formas da arquitetura moderna, geralmente demonstram uma interseção entre formas técnicas e formas arquitetônicas. Deve-se compreender esse feito se quiser analisar os problemas da forma no âmbito da arquitetura atual, orientada pela técnica (SIEGEL, 1966).

As formas modernas sempre geraram uma inquietação da arquitetura acadêmica e conservadora com a dúvida se essas formas novas seriam belas ou teriam qualidades estéticas. A utilidade possuiria beleza? Os estudos de Billington determinam de maneira racional como poderia ser o encontro da técnica com a beleza arquitetônica, uma nova forma de arte (BILLINGTON, 1983). Van de Velde definia como caráter essencial da beleza arquitetônica: “*como a correspondência completa dos meios com os fins*” e Mies van de Rohe dizia: “*A função é uma arte*” (SIEGEL, 1966) essas citações segundo Siegel, se interpretadas e levadas pelo prisma estrutural, expressam a unidade que deveriam formar a arte e a técnica na arquitetura moderna.

As formas provenientes deste pensamento, cuja sua concepção está definida igualmente pela técnica da construção, podem ser chamadas de formas estruturais. As formas estruturais não podem existir sem possuírem dimensões plásticas, portanto, sem possuírem uma forma. Essas formas devem estar de acordo com o seu princípio estrutural e relacionado com sua aptidão estrutural e técnica.

Se tomarmos, por exemplo, uma viga ou trave em pedra que descansa sobre apoios, teremos diversos exemplos arquitetônicos em inúmeras culturas, cada material e método construtivo modificarão sua aparência, mas o princípio de conservação da forma é mantido se repetindo a lei estrutural. Entretanto, nas formas tardias do neoclassicismo, essa trave é construída com uma viga de aço revestida com pedra, se perdendo a força expressiva da forma estrutural autêntica, se extinguindo a forma estrutural (Figura 3.1).

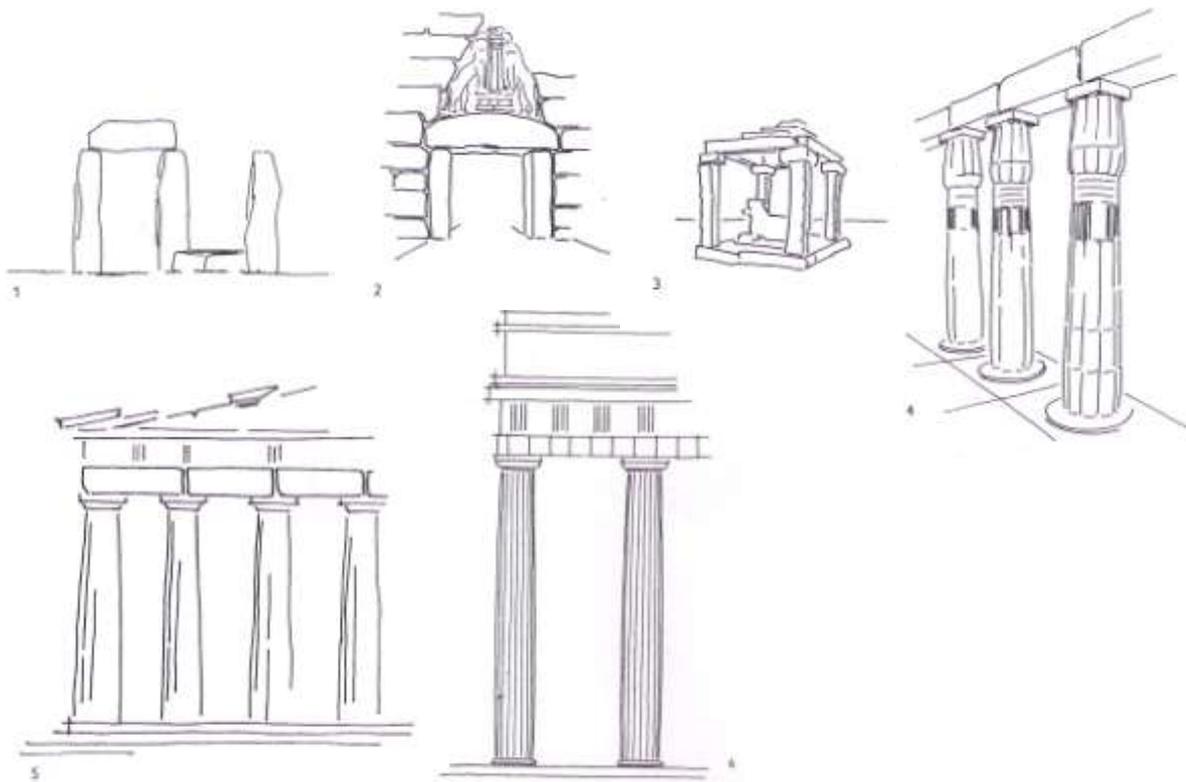


Figura 3.1 – A trave de pedra se encontra em todas as culturas. 1) Santuário pré histórico; 2) A porta dos Leões em Micenas; 3) Santuário Hindu; 4) Arquitetura Egípcia; 5) Parthenon; 6) Nas formas neoclássicas, o significado estrutural de viga se perde sendo substituída por pedra aplicada. Fonte: (SIEGEL, 1966).

O aspecto formal também pode ser responsável por essa “falsificação ou mentira estrutural”. O pilar, que é um apoio vertical simples, representa um membro que suporta determinada carga estando presente em diversas formas de construção, por mais que existam diferentes fustes e bases, decorações de acordo com as ordens etc. sua forma

sempre será compacta, cilíndrica ou prismática acentuando sua verticalidade e o encaminhamento das forças. Entretanto, ao torcer a coluna como as colunas salomônicas ou do barroco tardio, temos um exemplo de como é descaracterizado seu sentido estrutural (Figura 3.2).

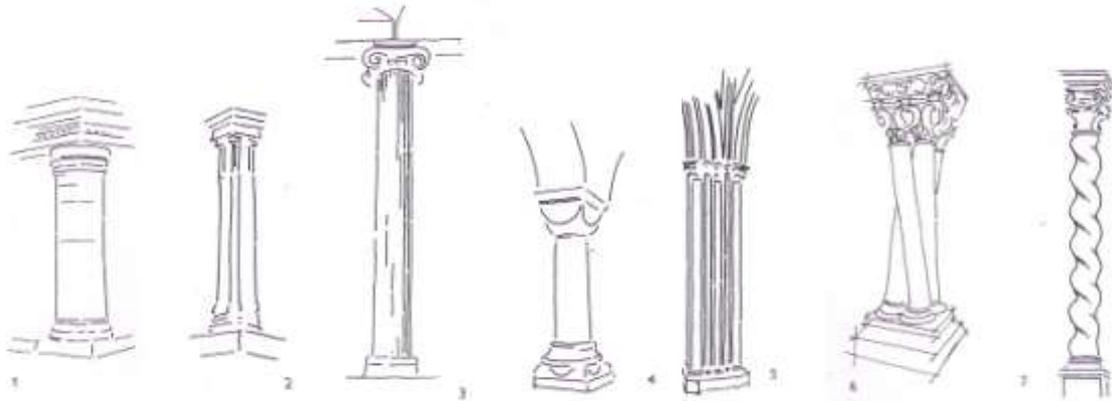


Figura 3.2 – O membro estrutural vertical necessita de um fuste maciço de acordo com o desenvolvimento estrutural da linha de forças. 1) Angkor, Camboja; 2) Índia; 3) Coluna Jônica; 4) Coluna Românica; 5) Coluna Gótica; 6) Um fuste torcido não corresponde ao sentido da forma estrutural como membro de carga; 7) Coluna Salomônica isolada, a forma adotada não demonstra sentido estrutural, somente decorativo. Fonte: (SIEGEL, 1966).

Outros exemplos podem ser encontrados, como na decoração excessiva de abóbadas, nas novas formas estruturais do final do século XIX, exemplificadas pelos ornamentos desnecessários da torre Eiffel e dos arranha-céus de Chicago, essas, representações práticas das novas funções dos edifícios de pisos múltiplos e como referência lógica da técnica e forma estrutural/arquitetônica, tiveram que ceder ao ornamento em virtude do gosto reinante.

No entanto, na década de 1920, quando se utilizaram em larga escala as idéias técnicas e essas foram impostas como princípios de desenhos, de maneira a influenciarem a arquitetura, foram os arquitetos e não os engenheiros, os responsáveis pela assimilação dessas novas idéias como um estilo, representados pelos arquitetos da Bauhaus e pelo próprio Le Corbusier (SIEGEL, 1966). Nas décadas seguintes, as idéias convencionais sobre arquitetura sofrem uma enorme mudança e se impõem as idéias da técnica e da arquitetura moderna.

Nesse novo momento, a arquitetura e a técnica passam a se integrar naturalmente, arquitetura é técnica, construtiva ou projetual, é lógico que com toda essa nova tecnologia

é possível se construir qualquer forma, se eliminando o termo “tecnicamente impossível”. É com essa facilidade que se aumenta a gratuidade da forma estrutural, com uma referência mais estilística do que racional. A racionalidade da forma estrutural passa a ser abordada por alguns arquitetos, que se utilizam da técnica como um dos principais elementos para concretização de suas formas estruturais.

3.4 - A RELAÇÃO DOS ESFORÇOS COM A FORMA

A arquitetura tem técnica e é necessária uma apreciação exata e racional desses seus aspectos (SIEGEL,1966). Com essa afirmação o autor nos demonstra que é possível uma apreciação da forma arquitetônica sem considerações formalistas e sim com seus fundamentos técnicos. Portanto, nesse momento, é possível dar valor a formas relacionadas à mecânica, estática e todas as premissas necessárias para a sua melhor condição estrutural, entretanto, a repetição de determinada forma e escala que corresponderam de forma estruturalmente perfeita para uma obra ou objeto, não garantem o mesmo sucesso para outra escala e material (Figura 3.3).

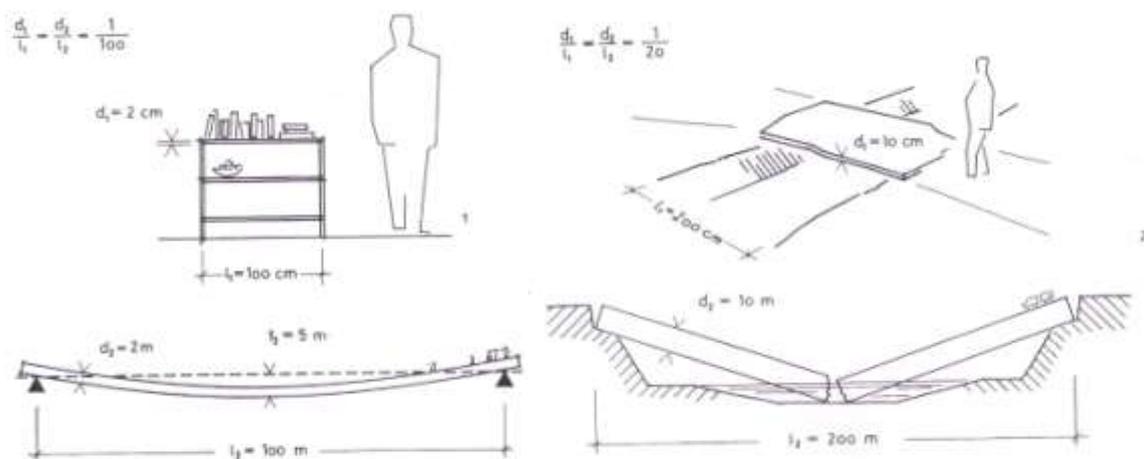


Figura 3.3 – A forma estrutural “correta” deve possuir uma relação com a escala da construção. 1) Peças de madeira iguais em proporção, para a confecção do móvel suas dimensões garantem resistir ao esforço de flexão de livros e objetos, mas em escala aumentada, essa construção é inutilizada; 2) Duas lâminas de pedra com proporções parecidas mas em tamanhos diferentes, a menor suportará o peso próprio e uma carga adicional, como a do pedestre, mas a peça maior sofrerá ruptura unicamente com seu peso próprio. Fonte: (SIEGEL, 1966).

É necessária uma relação da forma com a carga, escala e material. A repetição do Parthenon em uma escala muitas vezes maior resultaria em rupturas da estrutura,

principalmente de suas vigas de mármore. Ao extinguir a relação entre cargas do Parthenon ele perde o seu valor como arquitetura, porque se desarranjaria sua unidade estrutural desaparecendo seu valor estético. Na arquitetura moderna essa repetição da escala errada para edifícios aconteceu de forma gratuita e repetitiva, alguns construtores aproveitaram as dimensões de moveis e gavetas para a criação das formas retas que a nova arquitetura almejava.

O ponto de partida foi a associação das formas arquitetônicas com o marco de gavetas, que se prestavam corretamente para a fabricação de móveis. A assimilação da escala de móveis para a classe da arquitetura é completamente incorreta.

No período da arquitetura gótica, a componente técnica tomou parte ativa e decisiva para o seu desenvolvimento estrutural. Sem a ajuda da técnica, da abóbada e de suas influências em todos os detalhes, o gótico, possivelmente não teria alcançado uma expressão tão forte na arquitetura. Um dos membros mais importantes para a construção com abóbadas de grande altura é o pilar, o qual recebe os empuxos horizontais das abóbadas, produzindo de maneira natural a forma em V invertida para pilares. O desenvolvimento das linhas de forças o exige essa forma e desta maneira podia-se construir em alvenaria e pedra (Figura 3.4)

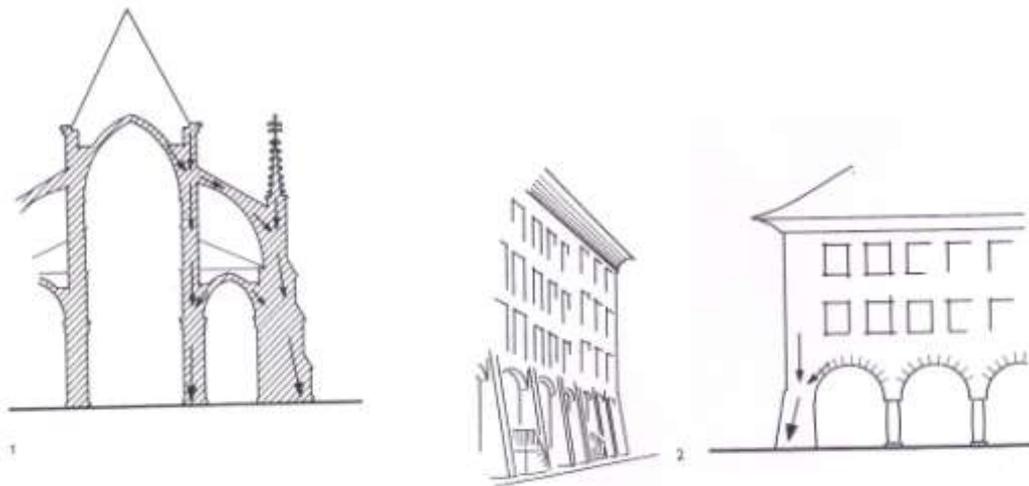


Figura 3.4 – 1) No estilo gótico se obtêm o apoio em V invertido como forma lógica das leis de estabilidade; 2) Contrafortes em alvenaria dos prédios da cidade de Berna, a racionalidade presente na elaboração da forma. Fonte: (SIEGEL, 1666).

Todas as formas em V invertidas que encontramos na história da construção ou na natureza obedecem as seguintes leis: a) todo membro de apoio vertical fixo em sua base e sujeito a uma força horizontal em seu extremo superior está sujeito a flexão; b) o valor da flexão

aumenta de cima para baixo; c) o momento de flexão tem seu valo máximo na base; d) a forma estrutural mais larga na base se adapta ao desenvolvimento estrutural (Figura 3.5).

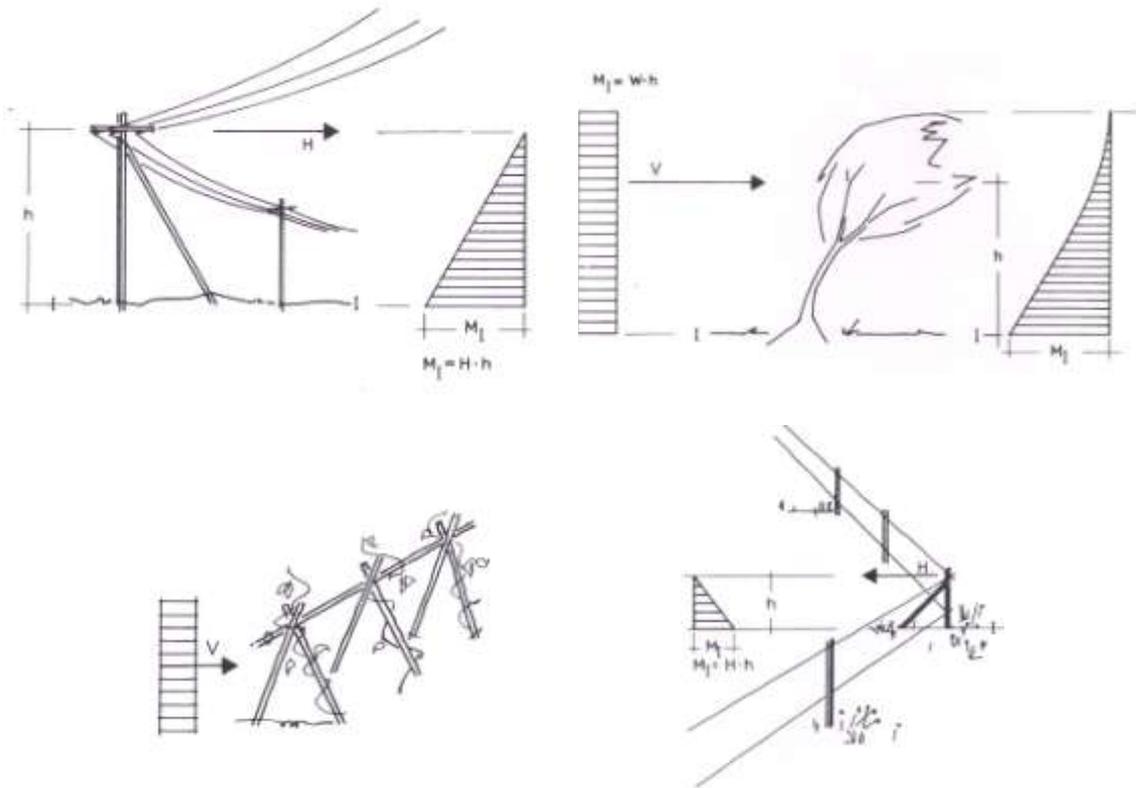


Figura 3.5 – A forma natural da árvore se adapta, organicamente, a ação do vento; Encontramos o apoio em V em sua forma mais primitiva ao ser usado em postes com apoios inclinados, cercas de fechamento ou traves para plantações. Fonte: (SIEGEL, 1966).

Na arquitetura moderna, se tomarmos como exemplo o apoio em V, com a forma mais esbelta na própria base, transparecerá, à primeira vista, um desafio as leis da estática. Entretanto, tanto a forma em V do passado quanto a forma em V dos pilares da arquitetura moderna brotaram do princípio de sua função técnica. Sua forma se adapta aos esforços de flexão que crescem de zero até o seu valor máximo. E no caso do pilar moderno ele é um exemplo, em alguns casos, da boa interpretação das leis da estática na construção.

Ao compararmos o apoio em V com mobiliários, teremos uma simples explicação da necessidade do aumento de seu topo e diminuição de sua base. O aumento de área da seção em seu topo, no encontro da trave com o apoio, se dá pela necessidade de combater o esforço realizado, a seção está de acordo com o trabalho realizado. Essa mudança da forma é realizada em função da necessidade de transportabilidade do móvel (Figura 3.6).

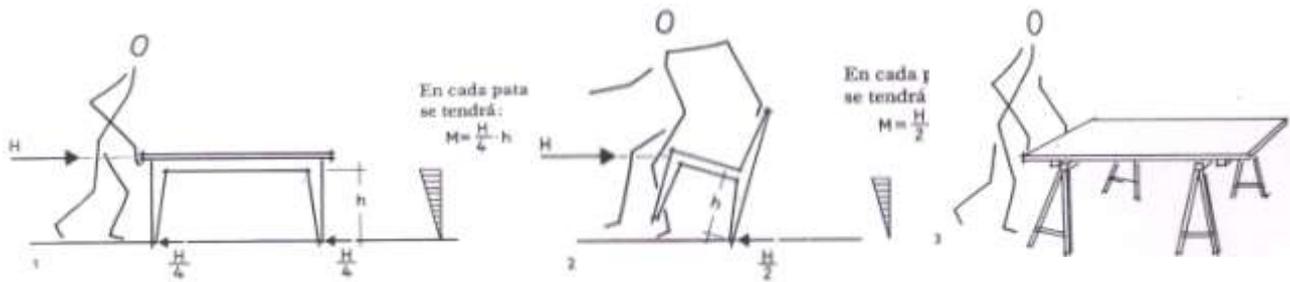


Figura 3.6 – 1) e 2) A forma em V das pernas dos móveis está de acordo com o trabalho realizado nas mesmas, o ponto de união deve possuir maior seção; 3) os apoios de uma mesa mais amplos, não está de acordo com a sua transportabilidade. Fonte: (SIEGEL, 1966).

O apoio em V tem uma direta relação na arquitetura moderna com a construção de pórticos. Se compararmos o sistema construtivo de um pórtico com uma cadeira (Figura 3.7), notaremos que sob a ação de uma carga P e sem possuir um material muito rígido as pernas se abrirão em função da força aplicada e sua trave apresentará uma deformação considerável, no entanto, se fixarmos seus apoios, impedindo seu movimento, perceberemos que estas produzirão uma contra deformação, devido a sua rigidez resultando em uma deformação menor do que a anterior.

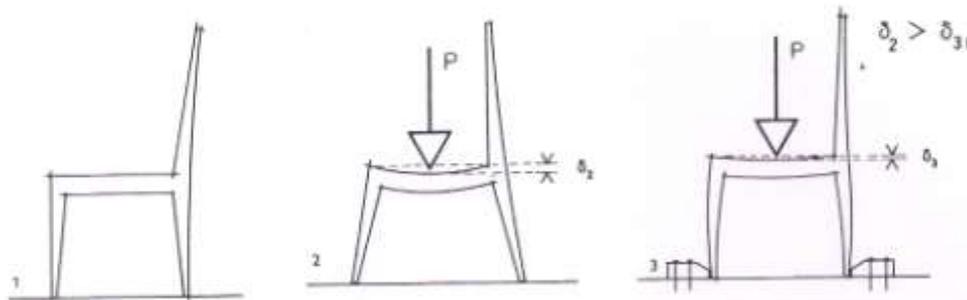


Figura 3.7 – A cadeira como analogia ao pórtico. 1) sem carga não mostra deformação; 2) com uma carga a cadeira deforma e as pernas deslizam-se; 3) ao se impedir o movimento das pernas, ocorre um alívio da deformação da trave, a deformação será menor nesse caso. Fonte: (SIEGEL, 1966).

A figura a seguir (Figura 3.8) mostra o comportamento elástico e o diagrama de momento fletor de um pórtico duplamente articulado, com uma carga vertical uniformemente distribuída. Os momentos definem a deflexão que cada seção do conjunto sofre, e o diagrama reflete graficamente os pontos onde as deformações provocam tensões. A efetividade de construção com pórticos são garantidas pelos seguintes pontos: a) material resistente a flexão; b) união rígida entre a trave e os pilares; c) apoios articulados, sem oscilações laterais.

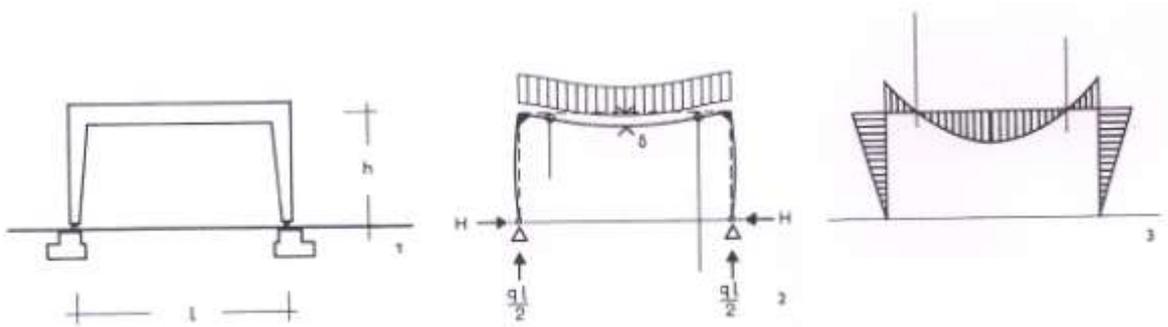


Figura 3.8 – Pórtico duplamente articulado. 1) pode ser comparado com a cadeira com as pernas impedidas de deslizar; 2) deformação se assemelha com a da cadeira; 3) o diagrama de momento fletor mostra o grau de deflexão, os pontos de valor zero coincidem com a mudança de direção da linha elástica . Fonte: (SIEGEL, 1966).

Conseqüentemente, a alvenaria é um material não indicado para a construção de pórticos, a madeira apesar de resistir à tração e compressão, não permite a construção de uniões rígidas entre seus apoios e traves, então, os materiais mais indicados para sua construção são o concreto e aço (Figura 3.9).

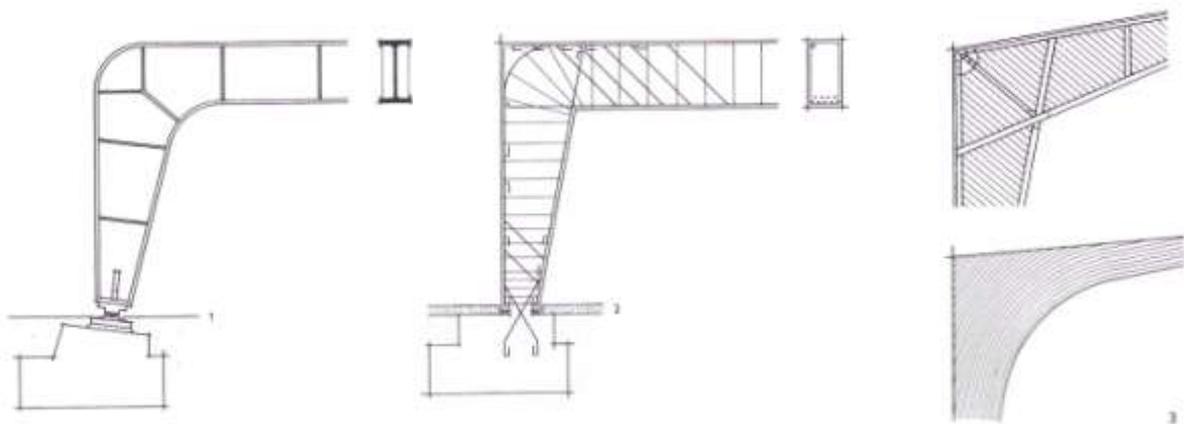


Figura 3.9 – A união rígida dos membros, trave e apoios. 1) pórtico em aço; 2) pórtico em concreto; 3) pórtico em madeira, as uniões precisam de reforço em aço ou prensas, como n madeira laminada. Fonte: (SIEGEL, 1966).

Interessa-nos então, a relação da forma em V com os apoios. Essas são determinadas pelos momentos flexionantes, que tem seus valores máximos nas uniões e são nulos nas articulações. A forma dos apoios de um pórtico duplamente articulado segue a mesma forma do diagrama de momentos da construção (Figura 3.10).

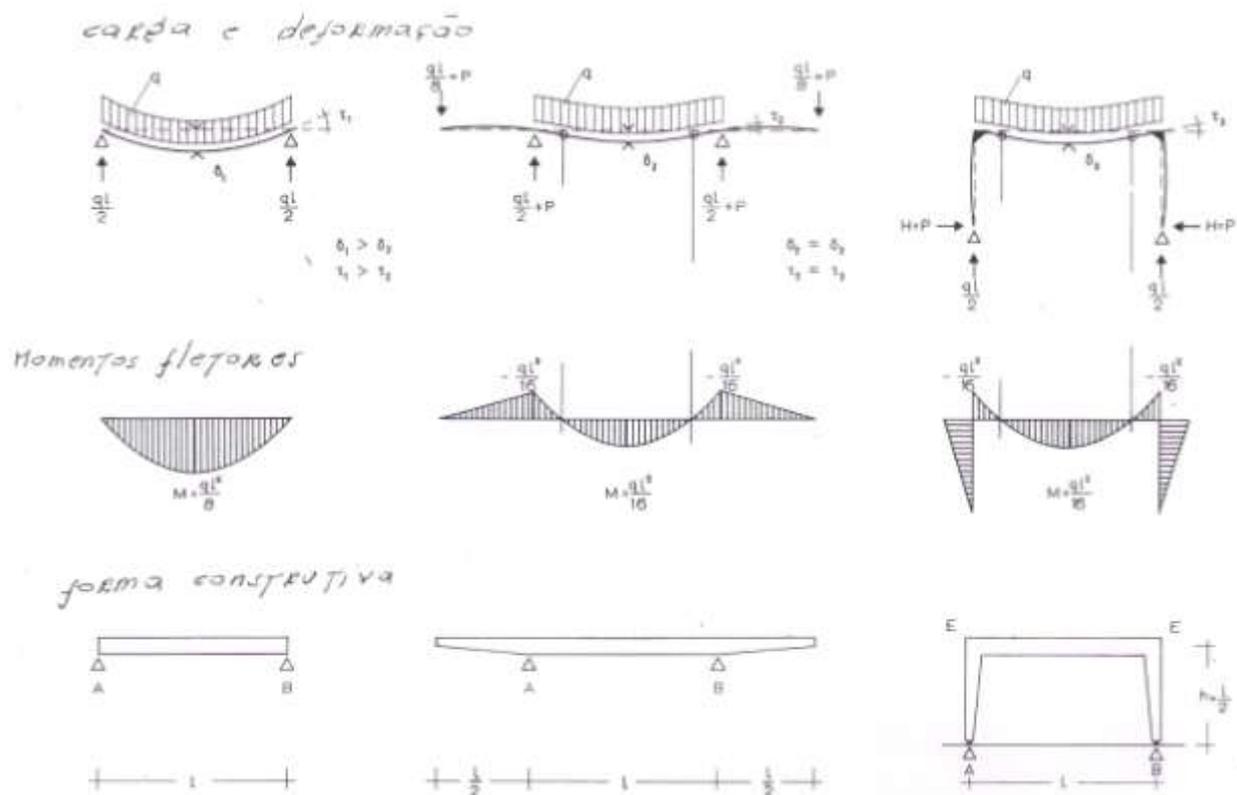


Figura 3.10 – A relação de semelhança entre vigas e pórticos. 1) Coluna 1: deformação e momentos de uma viga apoiada sobre dois pontos; 2) Coluna 2: ao se carregar com balanços, se alivia a carga sobre a viga para os apoios; 3) Coluna 3: os pilares do pórtico aliviam a carga da trave por pelo impedimento de deslocamento. Fonte: (SIEGEL, 1966). Manuscrito: Prof. Ernesto Walter.

É interessante notar que a forma estrutural dos pilares do pórtico não é oriunda somente do resultado do cálculo, o cálculo também é um resultado da forma, um depende do outro. Os momentos flexionantes dependem da forma preconcebida e se encontram onde os membros da construção são mais rígidos e apresentam maior resistência. Os pilares atraem os momentos de flexão na medida em que se aumentam sua rigidez e, com isso, evitam a deformação das uniões (SALVADORI, 1975). Quanto mais rígidas forem as uniões entre viga e pilar, maior será a descarga da trave (Figura 3.11).

Entretanto, quanto mais flexíveis forem os pilares, menos se notará o comportamento de pórtico da estrutura, e a trave se comportará estruturalmente de forma parecida com uma viga comum. O pórtico perderá seu sentido de construção, tendo seus pilares de vigas comuns com ação independente.

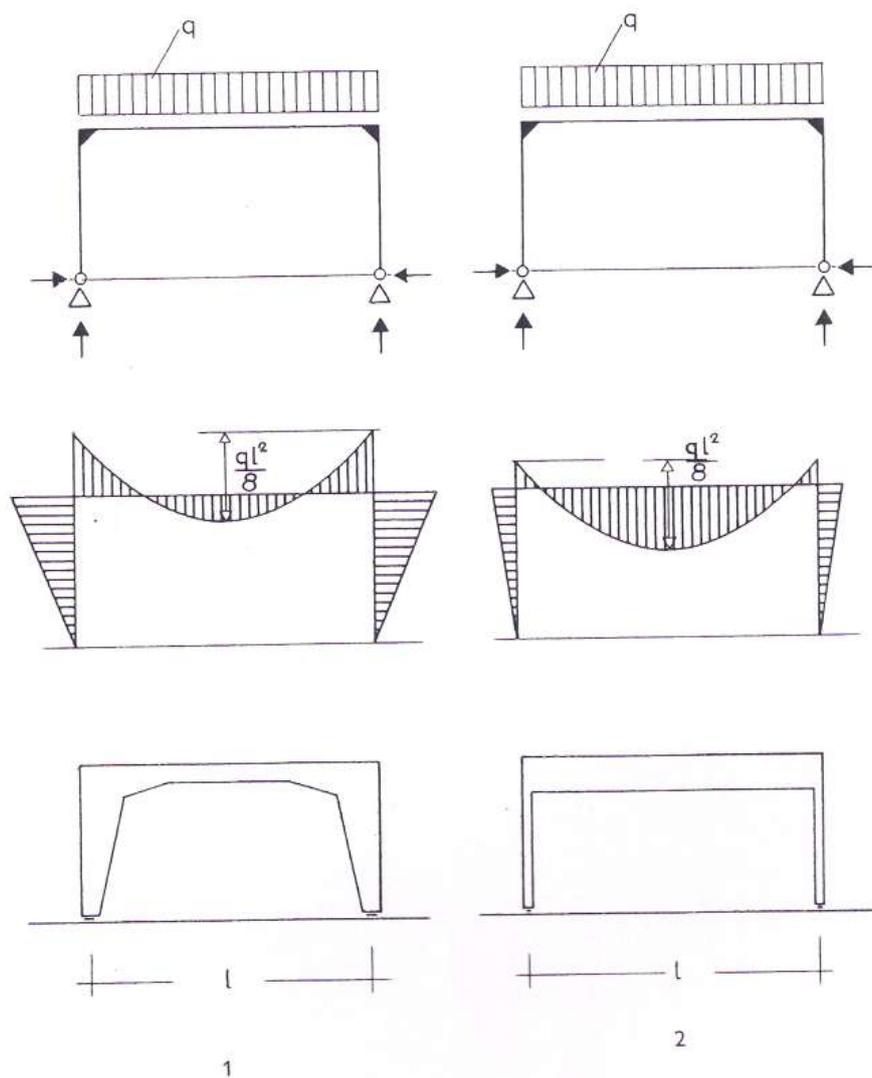


Figura 3.11 – As distintas relações de um pórtico duplamente articulado. 1) os pilares rígidos impedem o deslocamento da união e aliviam a carga da trave ; 2) as colunas quando flexíveis impedem parcialmente esse deslocamento, o esforço na trave se parece com uma viga livremente apoiada nos apoios, e o pórtico perde seu sentido. Fonte: (SIEGEL, 1966).

O exemplo anterior (Figura 3.11) nos demonstra como é possível, com a forma arquitetônica, elaborar uma estrutura sem sentido estrutural. A verdade estrutural pode ser encontrada em diversas obras arquitetônicas, demonstrando por parte do arquiteto um conhecimento do comportamento técnico e das leis de estabilidade do material e da forma adotados.

Le Corbusier (1887-1965) foi um dos arquitetos modernistas que buscaram uma racionalidade técnica em sua obra. Durante a maior parte da segunda década do século XX, Corbusier se dedicou a buscar uma padronização, essa representada nos seus cinco pontos :

os pilotis, a planta livre, a fachada livre, as janelas em fita e o terraço jardim; e também no sistema *Dom-ino*, usando uma estrutura Hennebique.

Corbusier realizou dez conferências, em 1929, em Buenos Aires, sobre arquitetura e urbanismo com a finalidade de contribuir com alguns dados de realidade, com o fatigável desejo de propiciar certezas (CORBUSIER, 2004). Essas conferências foram documentadas e publicadas no livro **Precisões sobre um estado presente da arquitetura moderna e do urbanismo**. Em sua segunda conferência, no dia 05 de outubro de 1929, Le Corbusier defende a técnica na arquitetura, o título desta conferência é “*As técnicas são a própria base do lirismo, elas abrem um novo ciclo da arquitetura*”(LE CORBUSIER, 2004).

Corbusier defende os novos materiais, como aço e concreto, perante a construção secular de pedra. Suas idéias de nova arquitetura são colocadas, assim como um novo discurso arquitetônico, mas nos interessa o domínio da técnica e não os paradigmas quebrados por ele na arquitetura. O arquiteto demonstra domínio do novo material e de suas técnicas: colocadas por ele como: *resistência dos materiais, física e química*. Ao defender seu projeto sobre pilotis, o arquiteto utiliza o concreto como material, que poderia ser o aço, e com um desenho do diagrama de momento, demonstra a vantagem do material e da nova forma estruturalmente (Figura 3.12).

Além de considerações sobre vedação, salubridade da moradia, aproveitamento de espaço etc. O arquiteto faz uma análise da virtuosidade do concreto armado, não desprezando sua característica técnica: “*chamo a atenção dos técnicos para as condições que atuam as vigas da casa de pedra e das casas de concreto. O cálculo dos esforços mostra que a primeira viga, opera com condições duas vezes mais desfavoráveis do que as vigas “em balanço” da construção de concreto armado. Isto precisa ser levado em consideração!*” (LE CORBUSIER, 2004).

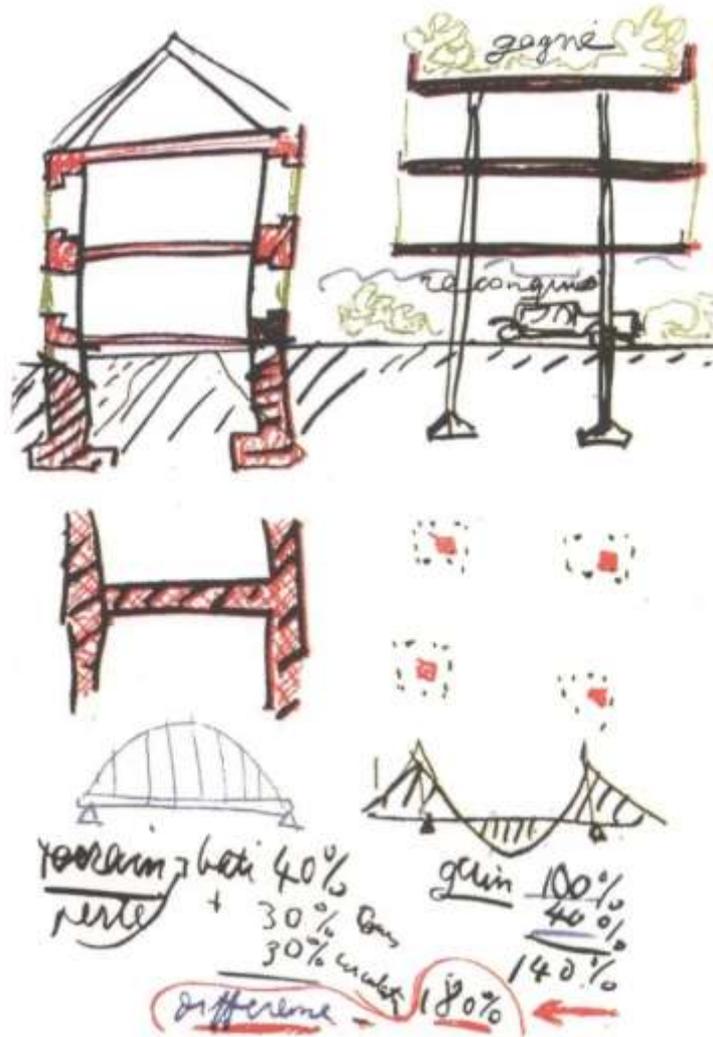


Figura 3.12 – A diferença entre a casa com estrutura em pedra e estrutura em concreto armado, o arquiteto demonstra pelo gráfico de momento a vantagem de utilização de um material em relação ao outro. Fonte: (LE CORBUSIER, 2004).

Uma nova linguagem na arquitetura estava montada, os edifícios em pilotis dominavam as construções e possuíam diversos incentivos para a adoção de pórticos como bases para a sua concepção estrutural. Muitos edifícios possuem seus pilares expostos no pavimento térreo, ou pilotis, em formas de V, a adoção dessa forma é justificada em uma construção que concentre as cargas verticais e as horizontais devidas ao vento na parte de baixo da estrutura com uma forma estruturalmente precisa.

As cargas verticais provenientes do peso próprio da estrutura da construção, assim como dos diversos pisos e do teto possuem importância no cálculo de estabilidade da carga horizontal segundo o vento. A ação de uma carga horizontal em um pórtico exibe uma flexão nos pilares que se reduzem a zero em seus apoios, justificando-se novamente, a forma em V.

A forma em V é justificada em pórticos com duas e três articulações, entretanto, a forma definitiva do pilar de um pórtico duplamente articulado dependerá da influência da carga vertical e da ação do vento. Ambas as cargas produzem um diagrama de momento similar nos pilares com valor nulo nos apoios e nos dois casos será correta a utilização da forma em V. No caso de pórticos sem articulação nos pilares, com suas fundações engastadas, os pilares apresentam momentos fletores e esforços de flexão, as dimensões ideais das seções serão de igual magnitude na união entre pilar e trave, não justificando a forma em V.

Um dos exemplos mais notáveis de edifícios com pilares em V é o do edifício sede da Unesco (1958) em Paris. O edifício de escritório projetado pelos arquitetos Marcel Breuer e Bernard Zehrffuss e calculado por Pier Luigi Nervi possui pilares em V bem definidos onde suas inclinações acentuam a função peculiar dada aos pilotis e, ao mesmo tempo, expressam de forma eloqüente o idioma de uma estrutura técnica moderna (SIEGEL, 1966).

Nervi desenhou a estrutura dando aos níveis superiores uma série de apoios internos que transmitissem as cargas de forma vertical aos pórticos duplamente articulados dos pilotis. As cargas se transmitem longitudinalmente por esse eixo sem produzir momentos fletores de importância. A carga vertical, uniformemente repartida, é proveniente da laje do primeiro nível e dos níveis superiores, não influenciando a forma do pórtico. A forma e função do marco estão condicionadas pelas forças do vento e responsável pela rigidez transversal do edifício. A forma dos apoios é parecida com a forma obtida pelo diagrama (Figura 3.13).

Para Nervi: *“todo desenho construtivo se deduz por si só pelo conhecimento da distribuição de forças e pela busca de formas que estejam de acordo com o desenvolvimento das forças de maneira simples e econômica”* (SIEGEL, 1966).

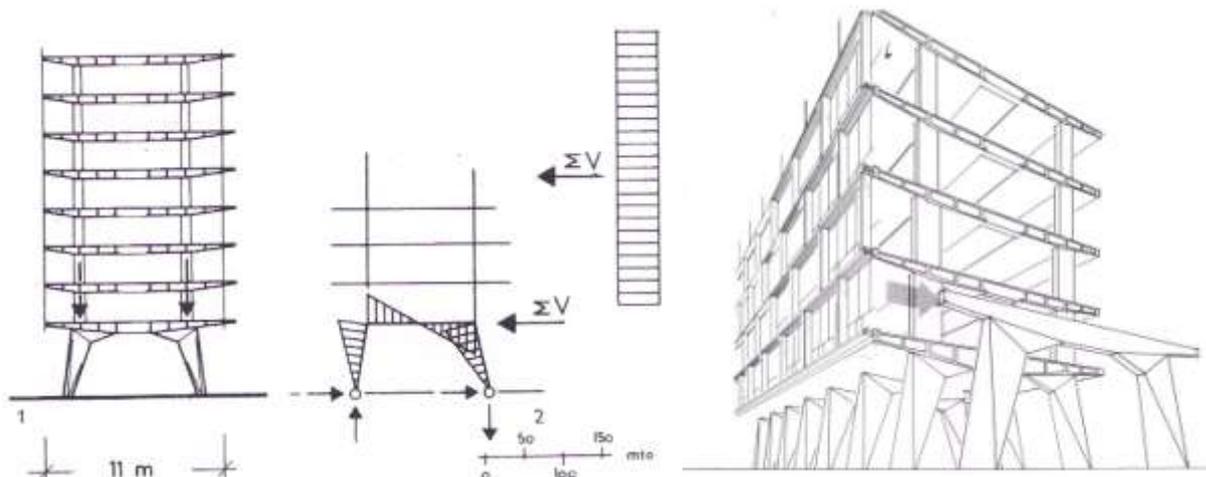


Figura 3.13 – Edifício da UNESCO, em Paris. Corte transversal mostrando o pórtico e os apoios em V do pilotis; momentos flexionantes devidos a carga do vento e perspectiva . Fonte: (SIEGEL, 1966).

Ao elaborar seus projetos de edifícios de múltiplos andares, Le Corbusier toma partido da vantagem em se utilizar balanços laterais somados ao desenho de pórtico, e conseqüentemente, elabora um projeto de acordo com a verdade estrutural. Estão presentes em sua obra os pilares em V, onde a base apresenta a menor seção, o desafio estrutural aos olhos do leigo pode ser entendido estruturalmente como uma analogia à forma adotada pelo mobiliário, presentes nas pernas de mesas e cadeiras, como demonstradas anteriormente.

O projeto do edifício da Unidade de Habitação em Marselha pode ser um exemplo da boa utilização do pórtico tanto estruturalmente quanto arquitetonicamente. A primeira vista a função de apoio em V não é tão direta como no prédio da UNESCO, mas é a mesma relação que define a forma estrutural adotada.

As cargas de vento e a rigidez transversal do edifício são, igualmente, os fatores que definem a função do pórtico. O diagrama de momentos devido ao vento e a forma em V dos pilares demonstram a mesma origem. Os pilares em V apresentam uma forma mais robusta somente para facilitar a passagem de tubos das instalações elétricas e hidráulicas (Figura 3.14).

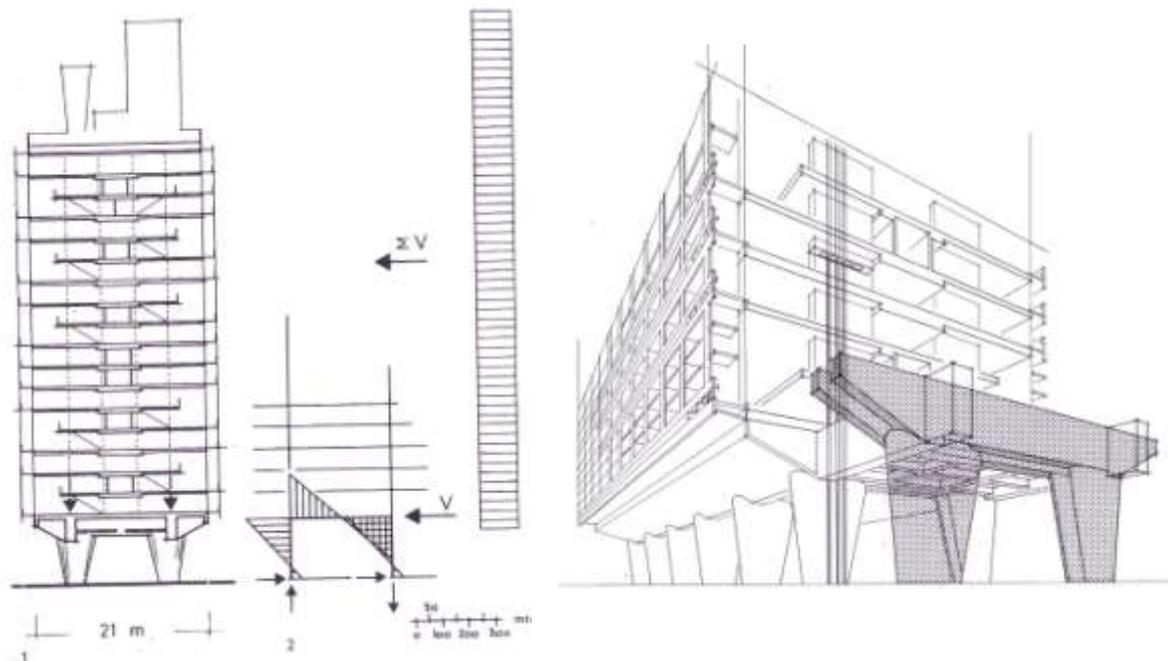


Figura 3.14 – Edifício de Marselha, Le Corbusier. Seção transversal mostrando o pórtico e seus pilares em V, momentos flexionantes devido o vento, perspectiva mostrando os dutos das instalações complementares. Fonte: (SIEGEL, 1966).

Os dois exemplos, o edifício da UNESCO e a Unidade de Habitação de Marselha, mostram como as forças do vento definem a forma do pórtico nos pilotis de um edifício de múltiplos andares. A forma em V do pilar se desenvolve sem dificuldade para o marco duplamente articulado e quanto maior for a altura do edifício mais marcante será a forma do pórtico e dos apoios em V, como expressão de sua estabilidade transversal.

Tanto o pórtico quanto o pilar em V serviram de exemplos para demonstrar a importância do entendimento estrutural na elaboração de formas estruturalmente corretas. Alguns edifícios podem apresentar o uso de formas em V nos pilotis sem a necessidade da mesma. O uso dessa forma é justificado para garantir a estabilidade transversal do edifício em altura. Alguns edifícios atuais garantem essa estabilidade com o uso de caixas de escada ou de elevadores, não sendo justificada a adoção da forma em V dos pilares. Esse é um problema que pode ocorrer na arquitetura atual, a adoção de formas pelo desenho estético e não pela qualidade estrutural.

O pórtico serviu nesse momento de exemplo mais simples para análise, é lógico que existem outros tipos estruturais que possuem mais eficácia se utilizados de acordo com a sua complexidade estrutural e não formalista. Vale ressaltar, que a forma estruturalmente correta não é sinônimo de beleza arquitetural. Diversas obras de qualidade estética comprovada não possuem qualquer relação com qualidade estrutural, entretanto, as obras

da engenharia que possuem maior caráter estético, apresentam geralmente melhor conceito estrutural.

3.5 - TRANSPARÊNCIA DOS ESFORÇOS RESULTANDO NA FORMA

O diagrama de esforços, que representa o comportamento estrutural do edifício, geralmente não aparece na forma final da maioria das obras, mas em alguns casos essa influência é de enorme clareza, e o resultado final fica de acordo com o desempenho estrutural da forma proposta, deixando transparecer o desenho dos esforços. A transparência dos esforços também pode ser justificada como responsável pela forma final da estrutura e, portanto, importante elemento de composição da arquitetura.

Arquitetos como Pier Luigi Nervi (1891-1979), Jørn Utzon (1918), Meinhard Von Gerkan (1935) e Norman Foster (1935), utilizaram em algum momento de suas carreiras a influência do diagrama de esforços no resultado final da forma arquitetônica. Nas obras analisadas, o raciocínio estrutural é responsável por uma criação de condições mais favoráveis para o desenvolvimento estrutural e, conseqüentemente, evidenciado no desenho da forma arquitetônica.

Na fábrica de papel Sociedade Burgo (1961-1962), em Mântova, na Itália, o arquiteto e engenheiro italiano Pier Luigi Nervi vence um vão de 160 metros entre os pilares, com 43 metros de balanço para cada lado, criando uma cobertura de 249 x 30 metros, suspensa por tirantes cuja função era abrigar uma grande máquina contínua de produção de papel (Figura 3.15 e 3.16).

A estrutura projetada por Nervi para a fábrica apresenta a forma do diagrama da (Figura 3.18), as forças de tração são absorvidas pelo cabo e as de compressão pela viga horizontal (Figura 3.17). Nesse exemplo fica claro a influencia do gráfico dos esforços como elemento de composição da forma estrutural e arquitetônica.



Figura 3.15 – Fábrica de Papel Sociedade Burgo. Fonte: (Yoshito Isono, 1995).



Figura 3.16 – Seção da Fábrica de Papel. Fonte: (SHARP, 1973).

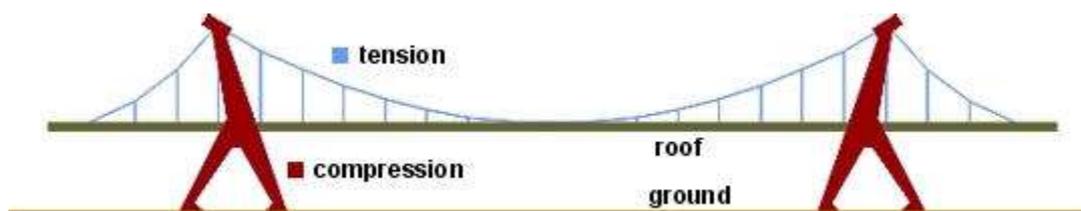


Figura 3.17 – Gráfico do esquema de forças de tração e compressão. Fonte: (HOLGATE, 1986).

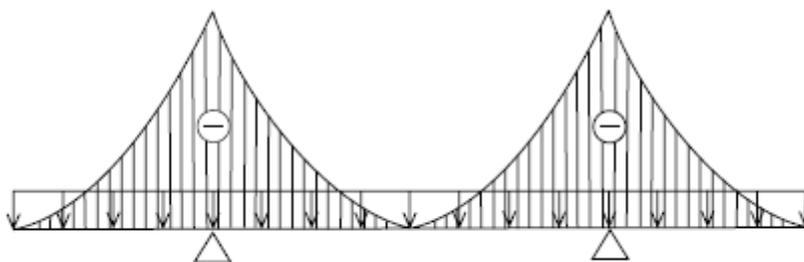


Figura 3.18 – Diagrama do momento fletor da estrutura proposta por Nervi. Fonte: (REBELLO, 2006).

O arquiteto dinamarquês Jørn Utzon é mais conhecido pelas analogias de suas formas arquitetônicas às velas de barcos, gomos de laranjas ou decomposições da esfera para o resultado final de sua obra mais conhecida, a Ópera de Sydney. Mas para o projeto não executado de um teatro (1962) em Zurique, na Suíça, o arquiteto encontrou nos gráficos de esforços uma perfeita solução para a cobertura proposta.

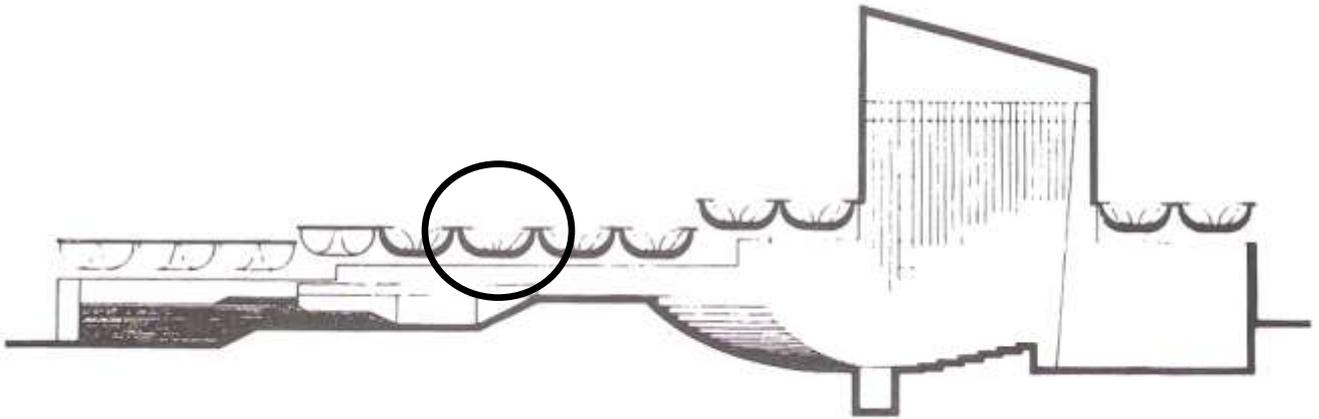


Figura 3.19 – Seção longitudinal do projeto proposto por Utzon . Fonte: (SANDAKER, 1992).

O projeto da cobertura poderia ter sido efetuado como uma superfície plissada, ou lajes inclinadas, as dobras da laje se tornariam mais rígidas, sem se transformarem em vigas, no entanto, a transparência dos esforços fica evidente na forma adotada. Nos suportes o perfil das vigas parece com uma forma em “T”, enquanto no meio dos vãos essas formas se assemelham ao “U”, conforme circulo em vermelho na (Figura 3.19). Note que a forma se assemelha ao gráfico dos momentos de flexão (Figura 3.20), dessa maneira a quantidade maior de massa foi disposta onde se necessita de maior uso de material, a forma adotada segue o gráfico dos esforços.



Figura 3.20 – Momentos de flexão de coberturas plissadas. Fonte: (SANDAKER, 1992).

No meio do vão, onde o momento é máximo, a massa foi concentrada na parte de baixo para combater as tensões existentes nessa região, assim que os momentos diminuem nos encontros dos suportes, a massa é diminuída, e elevada assegurando a forma de “T”.

O arquiteto Meinhard von Gerkan, naturalizado alemão, elaborou em seu projeto para o complexo da estação de trens Lehrter, desenhos baseados nos gráficos de forças, que transparecem na forma final dos edifícios.

O edifício administrativo Lehrter Bahnhof possui uma estrutura em barras em que suas formas acompanham o gráfico de momento fletor (Figura 3.21). Um cabo que desenha a forma externa do gráfico, responde pelos esforços de tração e os demais elementos pelos de compressão, de modo que se possa vencer de maneira bastante econômica um vão de aproximadamente 50 m (BOGÉA, 2006).

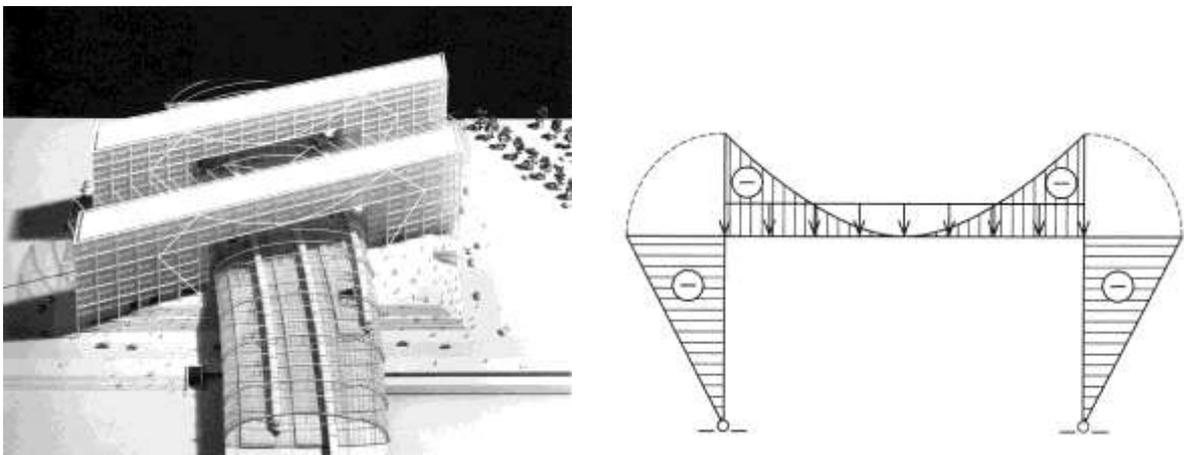


Figura 3.21 – Maquete do edifício administrativo e gráfico do momento fletor. Fonte: (BOGÉA, 2006).

No mesmo complexo, o arquiteto ao fazer o projeto da cobertura das plataformas de embarque e desembarque, optou pela mesma analogia formal ao gráfico dos esforços. A cobertura consiste em um telhado curvado em vidro (Figura 3.22). Um total de 23 suportes de aço do telhado sustentam um arco de 16 metros de altura, 59 a 68 metros de largura e 290 metros de comprimento. O desenho arquitetônico dos elementos estruturais (Figura 3.23) são resultados obtidos diretamente do gráfico de momento fletor de um arco (Figura 3.24), resultando em uma otimização estrutural.



Figura 3.22 – Cobertura em arco das plataformas. Fonte: (Diana Schreieck, 2004).

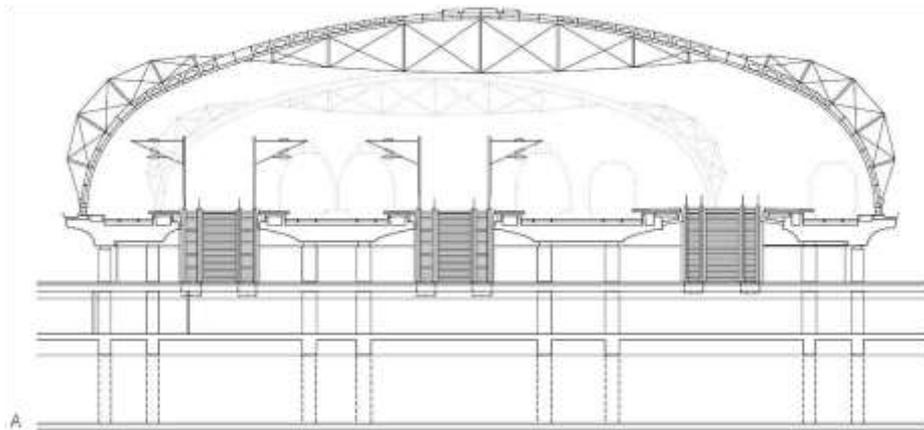


Figura 3.23 – Seção transversal da cobertura. Fonte: (DETAIL, 2005).



Figura 3.24 – Gráfico do momento fletor da estrutura proposta, a forma arquitetônica seguindo a função estrutural. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

O banco Hong Kong e Shanghai, em Hong Kong, projetado pelo arquiteto inglês Norman Foster, possui uma analogia bem peculiar entre a forma final adotada e o gráfico de momento fletor da estrutura proposta (Figura 3.25).

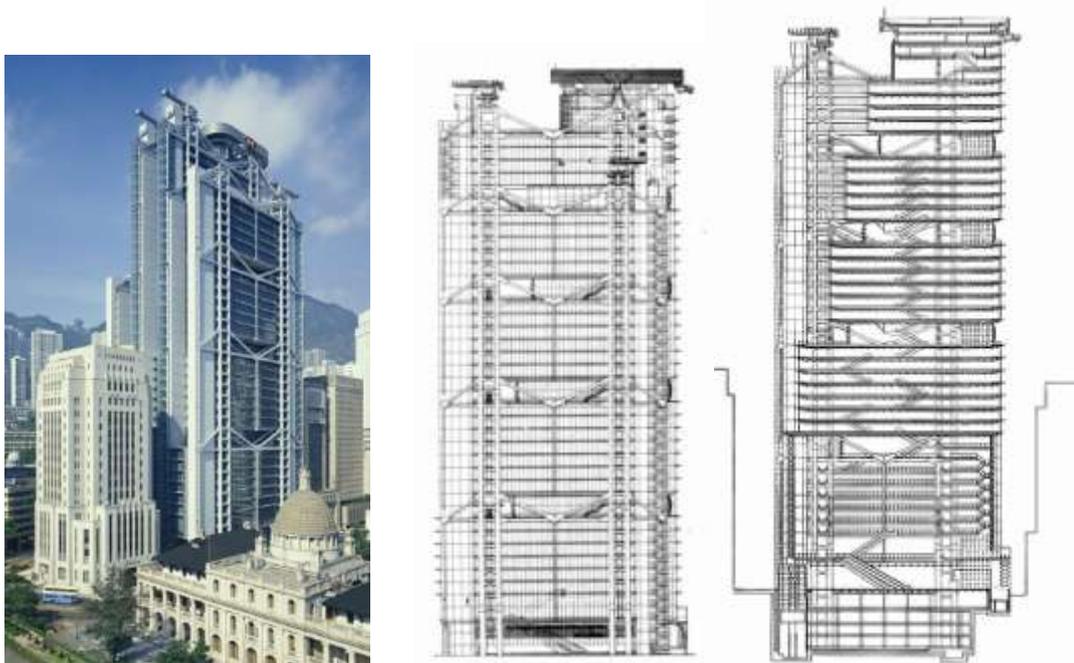


Figura 3.25 – Banco Hong Kong e Shanghai. Foto atual, elevação sul e seção do edifício, respectivamente. Fonte: (FOSTERANDPARTNERS, 2007).

O edifício é constituído por três blocos de alturas diversas. Os pilares, externos a cada bloco, compostos de quatro tubos travados entre si, sustentam dois pares de treliças triangulares, distribuídas ao longo da altura dos edifícios, nas quais os andares estão atirantados.

A figura 3.26 (a) mostra o gráfico de momento fletor para uma barra biapojada com uma carga concentrada no meio de seu vão. O diagrama de momento fletor para essa situação é representado por um triângulo com valor máximo do diagrama sob a carga concentrada. Se nessa viga forem criados dois balanços e nas suas extremidades aplicadas duas outras forças, o diagrama altera-se com a ocorrência de momentos negativos, resultando em um gráfico semelhante ao da figura 3.26 (b).

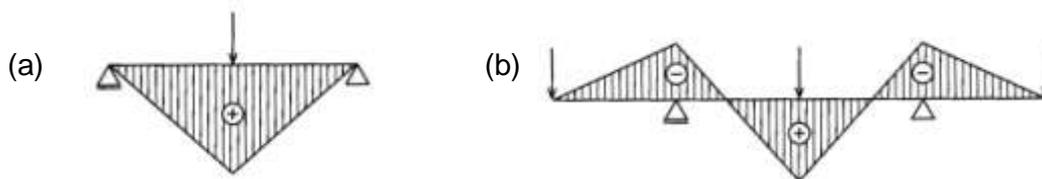


Figura 3.26 – Gráficos de momento fletor, barra biapoiada e com balanços simétricos. Fonte: (BOGÉA, 2007).

Se a medida do vão central for o dobro da medida do balanço e a carga aplicada nesse mesmo vão for também o dobro do valor em relação às aplicadas nos balanços, resulta na viga apenas momentos negativos e o diagrama apresenta-se igual ao da figura 3.27. Momentos negativos significam que as fibras superiores da viga são tracionadas e as inferiores comprimidas. Mas se em vez da viga maciça tivermos uma treliça, a tração superior será absorvida pelas barras inclinadas e a compressão pela horizontal, disposição que tem a mesma forma do gráfico de momento fletor. Esse é o comportamento que ocorre no projeto de Foster (BOGÉA, 2007).



Figura 3.27 – Gráficos de momento fletor, barra responsável pelo comportamento da estrutura do Banco de Hong Kong e Shanghai. Fonte: (BOGÉA, 2007).

Em todos os exemplos apresentados, é notável a transparência dos esforços na forma escolhida para a estrutura. As formas escolhidas possuem um raciocínio aberto, onde a lógica estrutural contribuiu para o resultado formal da arquitetura. A análise do edifício de Foster, realizada pelo professor Yopanan Rebello, nos evidência uma possível variação de formas entre as relações de cargas, balanços e vãos. Essa variação entre essas relações pode resultar em inúmeras formas estruturais, logo uma enorme variedade formal na arquitetura. Essa é a fonte de pesquisa para a possível influência da concepção estrutural no resultado formal da ponte de Oscar Niemeyer.

3.6 - DO ÂNGULO RETO À FORMA LIVRE

As formas arquitetônicas no movimento moderno, ou Estilo Internacional foram marcadas, em seu início, pela rigidez quase que absoluta da linha reta. O racionalismo europeu ressaltava que a nova arquitetura deveria estar de melhor acordo com o seu tempo, portanto, na era da máquina a arquitetura encontraria na postura retilínea sua definição formal. No pós-guerra ocorre uma desilusão com a metáfora estética maquinicista e surge uma arquitetura mais orgânica, marcando a ascensão do movimento moderno às formas livres.

O estilo tardio de arquitetos como Le Corbusier, Frank Lloyd Wright e Eero Saarinen evidenciam essa desilusão com a linha reta. Corbusier com o projeto da capela de Notre Dame du Haut, em Ronchamp (1950-54) e Saarinen com o terminal da TWA, em Nova York (1956-62) demonstraram que a imperante forma reta do estilo internacional, cedeu espaço para uma arquitetura de formas livres e mais orgânicas (UNDERWOOD, 2002).

No Brasil, Oscar Niemeyer demonstrou essa desilusão com o ângulo reto buscando no desenvolvimento de sua obra, uma arquitetura mais livre, leve, fluida, lírica e de grande riqueza escultural (BRUAND, 1999) e (NIEMEYER, 1999). Com o projeto do complexo de Pampulha (1940), Niemeyer precedeu seus contemporâneos europeus e norte americanos na associação da arquitetura moderna ao estilo de formas livres.

A liberdade formal encontrada na arquitetura de Niemeyer foi diversas vezes atribuída, por determinados autores e pelo próprio arquiteto como uma referência à realidade brasileira – as curvas remetem à arquitetura barroca e também a topografia nacional com suas montanhas, morros, praias em crescente e rios sinuosos – essa arquitetura mais leve, preferida pelo arquiteto revela também um protesto quanto à limitação que o funcionalismo exercia, recusando a liberdade de formas que o concreto armado oferecia, além de denunciar a realidade social brasileira (PEREIRA, 1999).

Valorizar as curvas no concreto armado requeria do arquiteto um entendimento lógico e preciso das funções estruturais desse material, e talvez, por esse motivo, Niemeyer sempre esteve cercado de grandes profissionais com enorme conhecimento intelectual e tecnológico. Para realização de seus projetos, a figura do engenheiro calculista acabou

sendo valorizada e em muitos casos, o maior responsável pela concretização da construção da obra.

Niemeyer sempre valorizou a colaboração de seus engenheiros calculistas: *“essa preocupação que sempre mantive com relação às estruturas é compreendida pelos técnicos do concreto armado com que até hoje lidei. Todos da melhor categoria”* (NIEMEYER, 1999). E não esconde que com sua obra formalista, contribuiu não somente para uma nova linguagem na arquitetura, mas também para uma valorização da engenharia estrutural: *“(…) com as minhas fantasias de arquiteto contribuo, por pouco que seja, para a evolução da técnica construtiva”* (NIEMEYER, 1999).

Com essa aproximação de sua arquitetura com a estrutura, é considerável pensar que Niemeyer possui grande entendimento estrutural. Compreende o diagrama de esforços que corresponde diretamente ao comportamento estrutural do edifício, tal diagrama, na maioria dos casos não está aparente, e nem contribui na composição formalista da obra arquitetônica, entretanto, há casos, em que o diagrama pode ser percebido na forma final da edificação.

Em alguns projetos arquitetônicos, o diagrama de esforços pode ser percebido na forma final da obra, não é possível afirmar que o resultado formal tenha como partido principal esse gráfico, mas a evidência estrutural pode acabar sendo mantida na concepção formal final, revelando a transparência dos esforços.

As diversas analogias que justificam as formas adotadas pelos projetos de Oscar Niemeyer são traços marcantes e quase indissociáveis da obra do arquiteto, assim como a estreita relação entre arquitetura e estrutura. O conhecimento estrutural pode ter contribuído e ter influenciado a concepção formal de seu projeto para a sua única ponte construída, a Ponte Monumental (CORREIO BRAZILIENSE, 1976, p.25) em Brasília, atualmente chamada de Ponte Costa e Silva.

3.7 - FORÇAS INTERNAS E AS CURVAS DE NIEMEYER

Niemeyer buscou soluções estruturais que caracterizassem sua arquitetura, soube recorrer ao progresso da técnica moderna com finalidade estritamente plástica, suas obras, quase que em uma seqüência lógica, acompanharam plasticamente a evolução estrutural que ao

concreto armado era permitido. O arquiteto associou pesquisas estruturais à idéia da forma livre.

Mesmo após seu processo de revisão arquitetônica e o desejo de substituir os excessos formais por soluções mais sóbrias, o arquiteto continuou a reafirmar a beleza formal como uma das principais funções da arquitetura, contudo, as soluções propriamente arquitetônicas decorriam de variações de natureza estrutural.

É impossível afirmar que a função estrutural foi responsável pela variação formal da trajetória do arquiteto, essa variação pode ser justificada pela busca por uma série de normas que encontrassem a simplificação plástica e o equilíbrio entre os problemas funcionais e práticos existentes na arquitetura, entretanto, é notória a integração entre arquitetura e estrutura em suas obras.

Niemeyer recorreu a uma variedade de soluções estruturais para a realização de suas obras, seu início foi marcado com a racionalização da estrutura utilizando o esquema pilares e lajes planas passando para a utilização de arcos, abóbadas, cascas e rampas. Entre tantas evoluções formais e estruturais, é possível encontrar algumas associações do gráfico de momento fletor na exploração da forma livre.

Iate clube de Pampulha (1961-1962)

A integração do gráfico do momento fletor na concepção formal na obra de Niemeyer pode ser encontrada em seu projeto para o anexo do Iate Clube de Pampulha, em Belo Horizonte, Minas Gerais.

O projeto do anexo consiste em cobrir uma grande área, com uma imensa cobertura sustentada somente por uma série de fileiras com duplos pilares (Figura 3.28). O espaço delimitado pelos balanços laterais permite uma articulação entre áreas fechadas e abertas, de um lado a parte em balanço é integrada à piscina, e no outro lado essa integração é feita com os jardins do clube. Essa cobertura garante uma grande área de terraço coberto, favorecendo o uso em diversas condições climáticas.

Niemeyer concentrou a expressão arquitetônica dessa construção somente na cobertura, elemento arquitetônico simples mais ao mesmo tempo complexo. Consiste em uma viga transversal, de desenho recortado que se repete de metro em metro, esse desenho teve tratamento de uma escultura abstrata (BOTTEY, 1997).

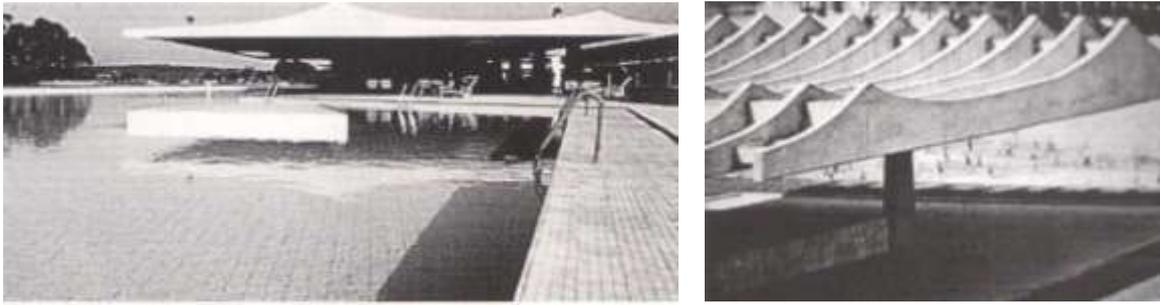


Figura 3.28 – Fotos do Anexo do Iate Clube de Pampulha. Fonte: (BOTTEY, 1997).



Figura 3.29 – Clube atualmente. Fonte: (PIC PAMPULHA, 2006).

Ao associar o desenho recortado a uma escultura abstrata, Bottey demonstra total desconhecimento de associação formal e desempenho estrutural. A forma para ele é obtida de maneira gratuita, somente com a finalidade de gerar uma estética diferenciada do óbvio, que consistiria em cobrir o vão com lajes e vigas planas.

Ao analisarmos a composição de Niemeyer para esse projeto, é possível considerar, que as variações formais das curvas para essa cobertura foram obtidas do estudo do comportamento estrutural e dos gráficos de momento fletor. A elevação esquemática revela a forma adotada para essa estrutura, as dimensões foram estimadas de acordo com as fotos e desenhos existentes e fixadas proporções de acordo com essas informações.

A estrutura da cobertura (Figura 3.29) é constituída de uma viga dividida em 3 vãos e 2 apoios, a seção da viga é variável nos 3 vãos, os vãos são divididos em vão central e dois balanços. Se considerássemos que os balanços tivessem as mesmas medidas e o vão central

tivesse o dobro dos balanços, teríamos somente momentos negativos e os momentos máximos nos apoios seriam iguais, como mostra a figura a seguir.

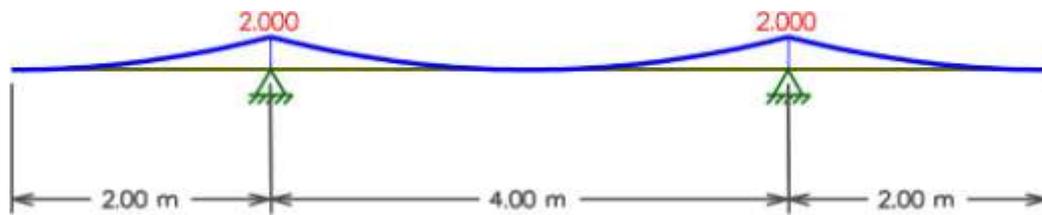


Figura 3.30 – Gráfico momento fletor, vão central sendo o dobro dos balanços laterais. Carregamento distribuído uniforme unitário. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

No projeto de Niemeyer, esses balanços não são simétricos, um corresponde à mesma medida do vão central. O gráfico de momento fletor passa a assimilar uma forma diferente do gráfico acima. O gráfico permanece com momentos negativos, entretanto, o maior momento negativo passa a ser no apoio onde existe o maior vão em balanço. A forma gerada pelo gráfico de momento fletor, representando os esforços, corresponde diretamente à forma adotada por Niemeyer na estrutura dessa cobertura, como mostra a (Figura 3.32). A variação de altura das curvas está diretamente ligada ao gráfico de momento fletor, e não a um simples desejo abstrato.

A análise levou em consideração somente uma carga unitária distribuída, e com isso é possível demonstrar que na medida em que modificamos os vãos, o gráfico também passa a adquirir formas e esforços diferentes. Se tivéssemos um vão central maior que o dobro dos balanços laterais, teríamos momentos negativos e positivos, resultando em um gráfico completamente diferente da forma proposta pelo arquiteto.

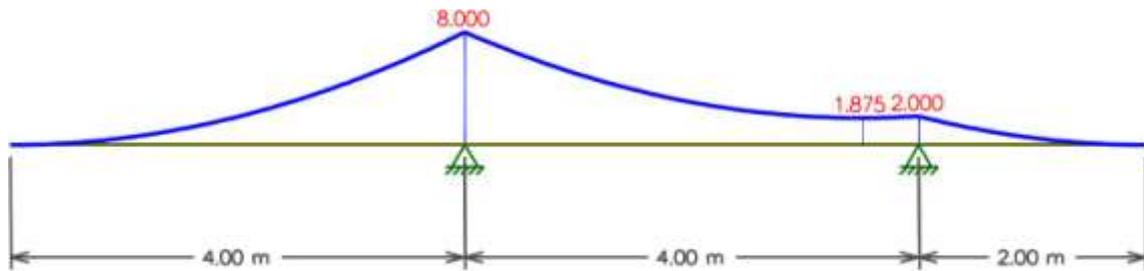


Figura 3.31 – Gráfico momento fletor correspondendo a forma. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

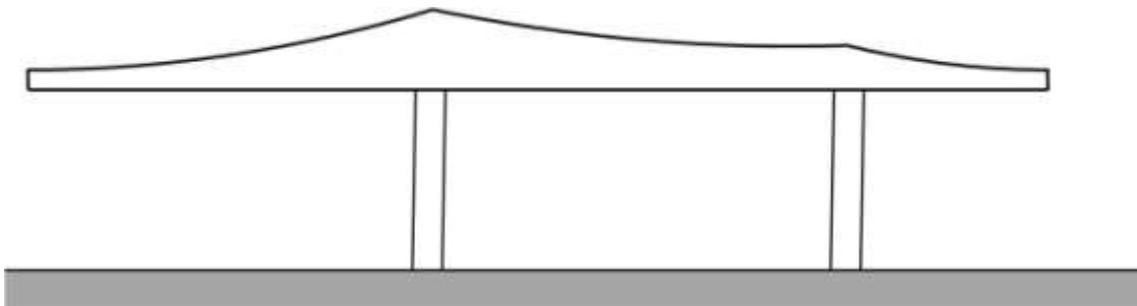


Figura 3.32 – Elevação esquemática. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Com essas considerações é possível afirmar que o entendimento do comportamento estrutural e de seus esforços, assim como o gráfico de momento fletor, pode contribuir para escolha da forma arquitetônica. Niemeyer repetiu essa mesma forma arquitetônica para o projeto do Touring Clube, em Brasília.

Sede do Touring Club do Brasil em Brasília (1962)

Situado na intercessão do eixo-rodoviário e eixo monumental, no Centro Cultural de Brasília, a sua frente principal possui uma extensão de cem metros. Existe uma diferença de cinco metros entre o plano do terreno implantado e o do eixo rodoviário.

O edifício possui dois pavimentos e uma sobreloja (Figura 3.33). No projeto original, foram situados serviços técnicos de assistência automobilística, que compreende mecânica de urgência, abastecimento, lubrificação, lavagens, borracheiro, eletricista, exame de direção e acessórios no pavimento térreo. Também foram colocados nesse pavimento escritório e instalações sanitárias, bar e ambiente de estar além de estacionamento e áreas ajardinadas. Na sobreloja foram instalados os dormitórios, sala de refeição e instalações

sanitárias para os funcionários responsáveis pelo funcionamento de 24 horas do estabelecimento.

No segundo pavimento, esse localizado no nível do eixo-rodoviário, o projeto previu um amplo salão para exposições, tanto automobilística quanto turística com ambientes de estar. Auditório para 140 pessoas com cabines e telas de projeção de filmes e documentários educativos; balcão para vendas de curiosidades turísticas e cartões postais; centro de informações turísticas; cabines telefônicas e demais serviços específicos do Touring Club do Brasil, como: sala de reuniões da diretoria do clube, gabinete do diretor seccional, gabinete do gerente, sala de serviço público de secretaria e correspondência, arquivo e biblioteca especializada, instalações sanitárias, sala de imprensa e leitura, barbearia e amplas varandas circundando o edifício com a finalidade de propiciar agradável ambiente de estar, permitindo uma ampla visão do eixo monumental e da praça dos três poderes (NIEMEYER, 1962). Segundo Lucio Costa no memorial do Plano Piloto (COSTA, 1995), esse local abrigaria uma casa de chá: *“A face da plataforma debruçada sobre o setor cultural e a esplanada dos Ministérios, não foi edificada, com exceção de uma eventual casa de chá e da Ópera”*.

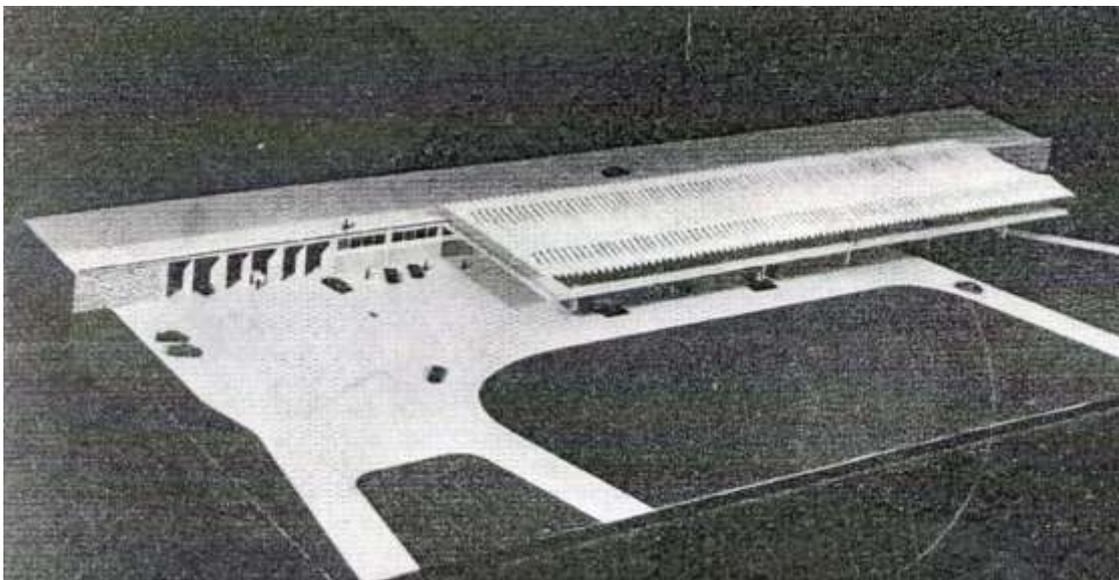


Figura 3.33– Maquete Touring Club de Brasília. Fonte: (NIEMEYER, 1962).

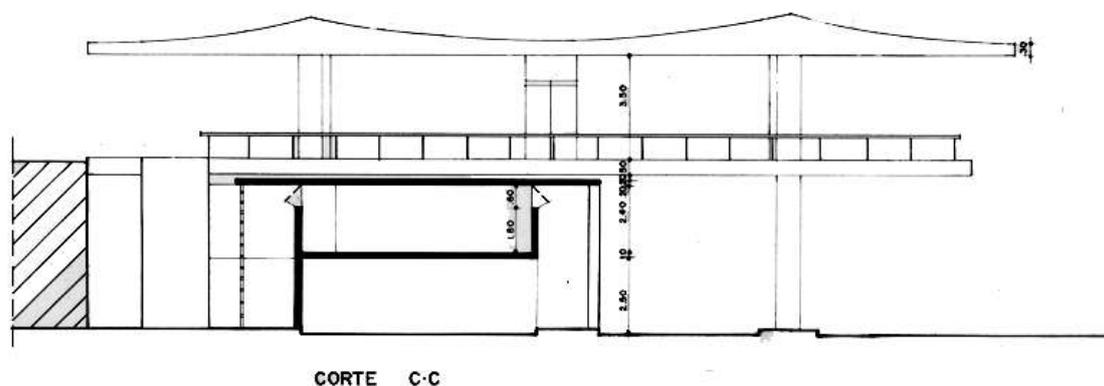


Figura 3.34 – Corte Touring Club de Brasília. Fonte: (GDF – SVO – DAU – DA, 1983).

A estrutura foi projetada de modo a permitir amplos vãos, usando-se os recursos de vigas superiores para sustentação da cobertura. O sistema adotado por Niemeyer é muito parecido ao escolhido para o projeto do Iate Clube de Pampulha. A estrutura da cobertura do pavimento superior é constituída por fileiras de duplos pilares, com vigas recortadas responsáveis pela variação estética da obra (Figura 3.34).

O desenho arquitetônico reflete, de maneira semelhante o esquema utilizado em Pampulha, faz uma analogia formal ao gráfico do momento fletor. Niemeyer utiliza nesse o projeto o conhecimento estrutural adquirido no projeto anterior, e repete na forma arquitetônica o resultado gráfico do momento fletor de uma estrutura com balanços laterais e vão centrais bi-apoiados.

Essa idéia foi utilizada também pelos arquitetos Sabino Barroso, Jayme Zettel e José Leal, para o projeto da Estação Estácio de Sá do Metrô do Rio de Janeiro, projeto de 1968 e construído somente 11 anos mais tarde. As estações do Metrô tiveram em comum um critério de valorização dos espaços públicos, através do dimensionamento das áreas de circulação, claro direcionamento dos fluxos e da utilização de materiais resistentes e de fácil manutenção.

A estação projetada estava em uma área central, e poderia ter o maior fluxo de toda a linha do metrô. Dada sua importância dentro da cidade e da rede, os arquitetos optaram por torná-la um marco urbano, afluindo-a do solo e realçando-a com uma cobertura de grande

efeito plástico, que deixa transparecer evidente influência do projeto de Niemeyer para o Iate Clube da Pampulha, em Belo Horizonte, de 1961. O projeto para o Metrô/Rio foi premiado pelo IAB-RJ em 1968 (Figura 3.35).



Figura 3.35 – Imagem geral da cobertura da estação Estácio de Sá do Metro do Rio de Janeiro. Fonte: (WISSEMBACH, 1981).

3.8 - COMENTÁRIOS FINAIS

As possibilidades construtivas modernas possuem um campo de atuação de demasiadamente amplo, e se tomarmos partido dessa possibilidade técnica atual na elaboração de projetos para arquitetura contemporânea, poderemos encontrar uma temática e um campo de ação muito vasto.

Não é possível representar as formas estruturais modernas da mesma forma como tomamos por referências os estilos do passado, as formas estruturais devem possuir um entendimento lógico e técnico para justificar seu afloramento.

Todas as formas estruturais possuem para o projetista, que toma como base o conhecimento técnico, sua origem na prática intelectual, mesmo aquelas de aparente oposição deve ser testemunho da lógica e consequência de uma boa técnica, que obedece às leis do material ao serviço do problema construtivo.

A forma estrutural moderna não pode ser compreendida em seu aspecto estético sem o conhecimento técnico (SIEGEL,1966). Esse raciocínio demonstra que existe um apelo intelectual para a compreensão da forma estrutural pela técnica, só é possível o entendimento da forma estrutural se agregar a isso o entendimento técnico, não se impedindo que essa forma alcance uma forma artística e bela.

Siegel também defende que outra característica decisiva para o entendimento da forma estrutural é a sua independência conceitual de todas as correntes e tendências na arquitetura. As formas estruturalmente corretas são encontradas em diversos estilos arquitetônicos, não sendo pertencente somente a arquitetura gótica, a arquitetura moderna com seus ângulos retos ou a arquitetura high-tech etc. O que procuramos demonstrar é que o conhecimento estrutural pode ser encontrado tanto nesses estilos arquitetônicos quanto na arquitetura de formas livres, muitas vezes classificadas como uma arquitetura com falta de lógica estrutural.

Em todos os estilos arquitetônicos podemos encontrar formas estruturais tanto autênticas quanto falsas. É importante compreender, e aceitar, que a forma estrutural não surge unicamente da intuição, necessita de conhecimento de suas relações técnicas, dessa maneira se torna mais fácil ir a seu encontro, realizar seu desenho e compreender sua qualidade estética. A forma estrutural se torna um meio típico de expressão para a arquitetura contemporânea.

4 - ANÁLISE DA FORMA ESTRUTURAL

4.1 - INTRODUÇÃO

A partir do final da década de 1950 quando os arquitetos manifestaram uma arquitetura com grande tendência escultórica o espaço na arquitetura passou a ser determinado pelas formas arquitetônicas, segundo Giedion (2004) “*as formas não são definidas por seus limites físicos, as formas moldam o espaço*”. Muitas formas acabam sendo refletidas pela própria estrutura como mostrado no item 3.2.

A forma estrutural aparece quando a arte e técnica caminham juntas. Na arquitetura moderna é possível encontrar uma grande variedade formal de forma gratuita, mas a decorrência de uma forma embasada na racionalidade estrutural gera uma boa arquitetura (SIEGEL, 1966).

A racionalidade estrutural se tornou fator determinante para a elaboração de algumas obras edificadas ao longo dos tempos, temos nos exemplos de Eiffel e Maillart obras notáveis que sofreram a influência da racionalidade estrutural para concepção plástica. Essa influência acabou por afetar também o método projetual de muitos arquitetos.

Para o projeto de sua ponte em Brasília, Oscar Niemeyer procurou encontrar uma forma que possuísse uma ligação com a arquitetura já existente da cidade, não buscava confrontar a unidade criada anteriormente. A forma adotada possuiu inúmeras analogias, como de aves sobre o leito do lago, mas apesar de tantas referências, o projeto se trata de uma ponte onde sua maior relevância é a forma estrutural, que domina e determina a forma arquitetônica.

A análise da forma arquitetônica geralmente é realizada pelo campo da estética, e a análise da forma estrutural é obtida de maneira quantitativa, no entanto, quantitativamente conseguimos aferir a correta dimensão da geometria proposta. Por se tratar de uma obra construída, devemos analisar a forma estrutural existente.

Nossa metodologia de análise nos permite verificar qualitativamente a forma de uma estrutura existente permitindo tirar conclusões do método projetual e racionalidade estrutural adotada pelo arquiteto.

4.2 - GEOMETRIA DA PONTE

Para definir corretamente a geometria da ponte, analisou-se inicialmente os dados fornecidos no projeto original do arquiteto Oscar Niemeyer. O projeto original apresenta a dimensão inicial proposta com a extensão total de 400 metros, onde o vão principal possuiria a dimensão de 200 metros com dois vãos adjacentes medindo 100 metros cada um. A largura da ponte seria de 13,50 metros. A pista possuiria uma largura de 10,50 metros com dois passeios laterais com 1,5 metros cada, servindo de passarelas para pedestres com proteção por um guarda-corpo de apenas 30 centímetros de altura, configurando – por suas medidas e croquis – um banco de contemplação para o lago (Figura 4.1).

No projeto original, a ponte é constituída por um arco circular abatido superior constante com corda de 400 metros de desenvolvimento, o abatimento da geometria desse arco é demonstrado pelo seu pequeno grau apresentado, que é $5,69^\circ$ de angulação, o comprimento de arco é de 400,22 metros. A flecha desse arco possui a dimensão de 12 metros. É designado como *corda* o segmento de reta que une os extremos de um arco ou circunferência, nesse caso igual ao comprimento total da ponte. Designa-se como *flecha* o segmento de reta perpendicular a uma corda, resultando na altura do arco. (Figura 4.3).

A ponte possui dois pilares de sustentação, com alturas iguais de 10,00 metros, resultando em três vãos arqueados. O vão central possui uma corda de 200 metros, comprimento do arco de 201,33 metros com flecha de 10 metros, igualando a altura máxima dos pilares de sustentação. Os vãos laterais apresentam uma forma de arcos interrompidos ao se encontrarem com os respectivos acessos, se configurando em arcos extremamente abatidos, quase retos possuindo uma leve curvatura no encontro com o arco central, são simétricos e apresentam uma corda de 100 metros com uma flecha de 5 metros, com comprimento de arco de 100,23 metros. A seção transversal mínima é de 2,00 metros em toda a extensão da ponte, e a máxima 10,00 metros, representada pelos apoios.

Os blocos de fundação possuíam uma dimensão transversal de 7,5 metros e estavam afastados do corpo principal da ponte 3,00 metros de cada lado (Figura 4.2), esse afastamento garantiria a sensação de flutuação da ponte sobre o lago que o arquiteto buscava proporcionar aos expectadores de sua obra, para fortificar essa idéia os encontros dos arcos nos apoios são feitos de forma a afunilar, estreitando-se a intersecção de suas

extremidades. Na visão lateral, os blocos de fundação possuem uma dimensão de 5,00 metros longitudinais cada.

Ao se realizar as sondagens, foi possível ter a batimetria do lago no local de construção da ponte. A batimetria (Figura 4.10) é necessária para determinação da topografia de seu leito, e o resultado demonstra que a profundidade máxima é de 19,60 metros, no projeto arquitetônico de Oscar Niemeyer essa profundidade era de 11,00 metros. Apesar da diferença entre essas medidas, o lago não apresenta no local de construção da ponte uma profundidade com grandes proporções, entretanto, existe diferença entre a profundidade dos dois blocos de fundação.

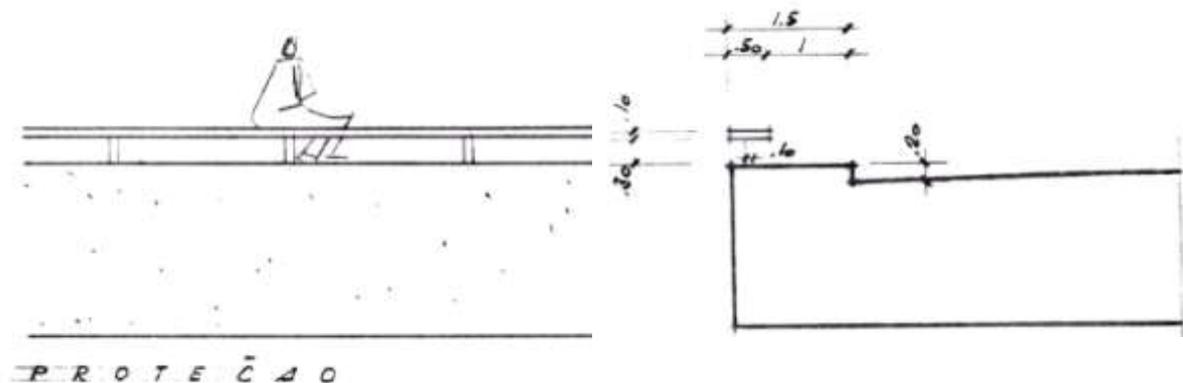


Figura 4.1 – Croqui Niemeyer, proteção dos passeios laterais da ponte servindo como bancos de contemplação do lago. Elevação e corte. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

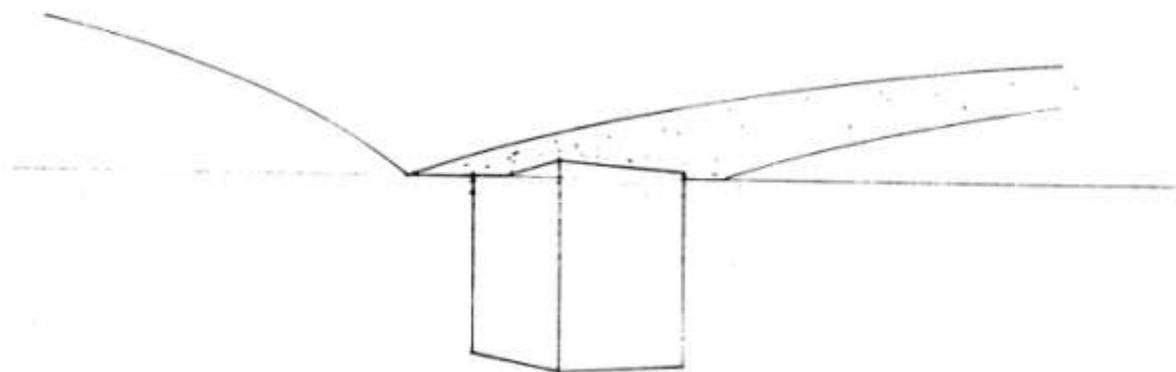


Figura 4.2 – Croqui Niemeyer: encontro da ponte com os blocos de fundação, o afastamento do perfil da ponte do bloco de fundação garantiria a sensação de flutuação da ponte sobre o lago. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

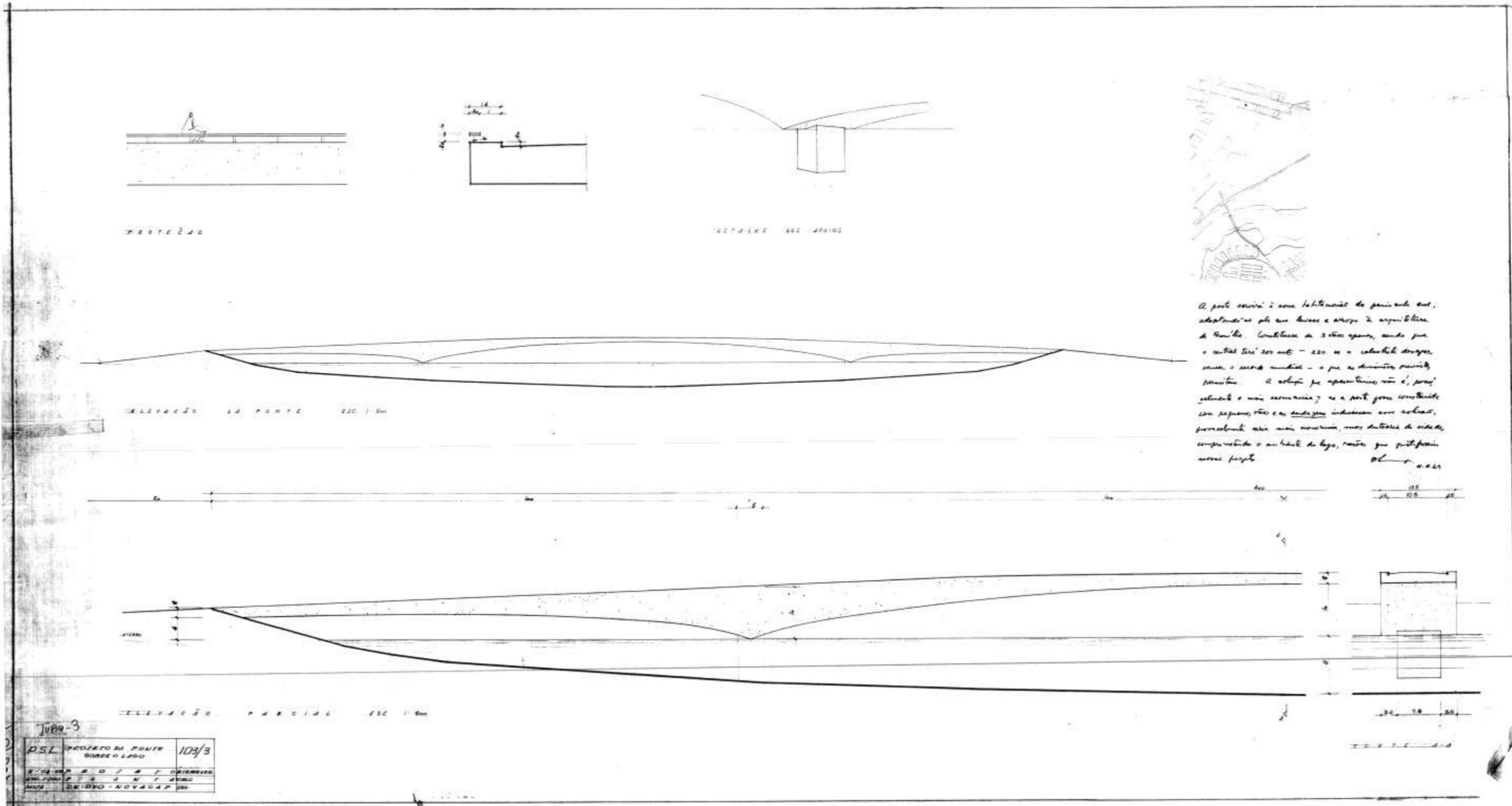


Figura 4.3 – Digitalização do projeto original de Oscar Niemeyer para a ponte Monumental sobre o Lago Paranoá. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

De acordo com a memória de cálculo e do memorial descritivo do engenheiro e proprietário da firma SOBRENCO, Sergio Marques de Souza (ARQUIVO PUBLICO DO DF, 1969-71), a ponte possuiria uma extensão total de 400 metros por 13,50 metros de largura tendo seu vigamento principal composto por 4 vigas longitudinais em caixão de concreto protendido (Figura 4.4) e (Figura 4.5). A estrutura do vão principal era constituída por dois balanços de 105 metros em viga reta, também em concreto protendido, ligadas por uma articulação no meio do vão, totalizando um comprimento de 210 metros (Figura 4.6) e (Figura 4.7). Essa estrutura seria executada pelo sistema de balanços sucessivos (Figura 4.8), com 5 metros de comprimento cada um. As dimensões iniciais de projeto não correspondiam ao tamanho estipulado pelo projeto de Niemeyer, mas mantinham a mesma proporção.

Depois de confirmada a necessidade de aumento de seus vãos, a geometria final da ponte ficou com 440 metros de extensão total, com vão principal de 220 metros e vãos adjacentes de 110 metros (Figura 4.9). Essa proporção foi resultado de entendimentos da firma construtora com Niemeyer – conforme carta anexada aos processos de licitação obtidos na NOVACAP – Arquivo Público do DF – por consequência, a geometria final da ponte possui o vão central com a dimensão igual ao dobro das dimensões laterais, estando de conformidade com o projeto original na razão da proporção do vão total com vão lateral. As dimensões de largura foram mantidas.

A forma original foi mantida, somente aumentada algumas dimensões devido às proporções. O arco circular abatido superior é constante com corda de 440 metros de desenvolvimento, o abatimento da geometria desse arco é demonstrado pelo seu pequeno grau apresentado, que é $7,23^\circ$ de angulação, o comprimento de arco é de 440,32 metros. A flecha desse arco possui a dimensão de 13,44 metros (Figura 4.14) e (Figura 4.15).

Os dois pilares de sustentação ficaram com alturas iguais de 11,00 metros. O vão central possui uma corda de 220 metros – na época o maior vão livre de concreto – com o comprimento do arco de 221,59 metros e flecha de 11,44 metros, não possuindo a mesma altura dos pilares conforme o projeto original. Os vãos laterais permanecem simétricos e apresentam uma corda de 110 metros com uma flecha de 4,80 metros, com comprimento de arco de 110,26 metros.

Os blocos de fundação permaneceram com o afastamento de 3,00 metros da lateral da ponte, garantindo seu aspecto de leveza. Todos os reforços realizados, conforme narrado no Capítulo 2, ficaram submersos.

Na Figura 4.3 encontra-se o projeto de Niemeyer digitalizado conforme projeto original fornecido pela NOVACAP (Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil). Na nossa metodologia de estudo, a primeira etapa é marcada pela obtenção de fontes primárias como desenhos, projetos, e etc. todos contribuindo para catalogação histórica.

Os projetos originais foram obtidos na Divisão de Projetos Urbanos e Divisão de Edificações - NOVACAP, posteriormente foram realizadas cópias xerográficas, para em seguida, serem digitalizadas no programa AutoCad da AutoDesk. A digitalização permitiu aferir as medidas geométricas da ponte, de acordo com os dados fornecidos.

Os projetos obtidos foram: o projeto original de Oscar Niemeyer, que corresponde à dimensão inicial de 400 metros, croquis esquemáticos de detalhamento e memorial justificativo da forma. Esse material foi digitalizado como uma imagem e anexado ao presente trabalho. A digitalização como imagem permite uma documentação do desenho e croquis realizados pelo arquiteto (Figura 4.3).

Os projetos técnicos foram realizados pela empresa SOBRENCO S.A., onde são divididos por elevação geral (Figura 4.4), locação das fundações (Figura 4.5), corte longitudinal (Figura 4.6), e cortes transversais (Figura 4.7). Em seguida foram digitalizadas também as fases de construção (Figura 4.8). Na Figura 4.9 realizamos uma comparação da geometria da ponte projetada com o vão total de 400 metros com a ponte construída com 440 metros.

Os últimos desenhos digitalizados foram o da batimetria (Figura 4.10) do lago no local de construção da ponte e seção longitudinal com o trecho metálico. A batimetria foi obtida com os dados oriundos das sondagens fornecidas pela NOVACAP e realizadas pela empresa TECNOSOLO. A seção longitudinal com o detalhe do trecho metálico (Figura 4.11) foi fornecida pela divisão de edificações no setor de reformas da NOVACAP. Fotos do trecho metálico foram realizadas pelo autor (Figura 4.20) e (Figura 4.21).

Todos os desenhos foram digitalizados pelo autor do presente trabalho, baseados nos dados originais sem sofrerem quaisquer intervenções.

ELEVAÇÃO GERAL
SOBRENCO - 400 M
SEM ESC.

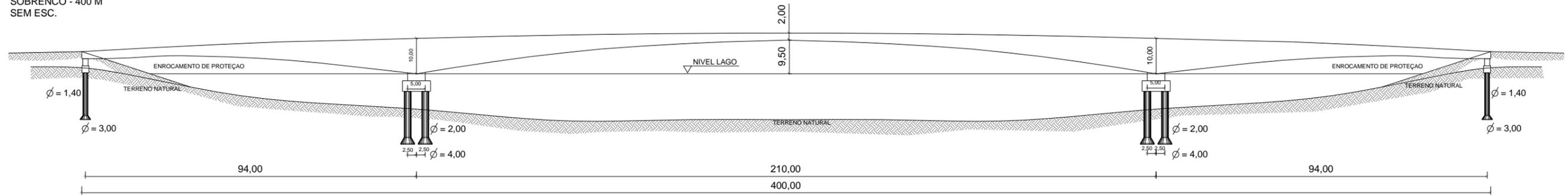


Figura 4.4 – Elevação Geral: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

LOCAÇÃO DAS FUNDAÇÕES
SOBRENCO - 400 M
SEM ESC.

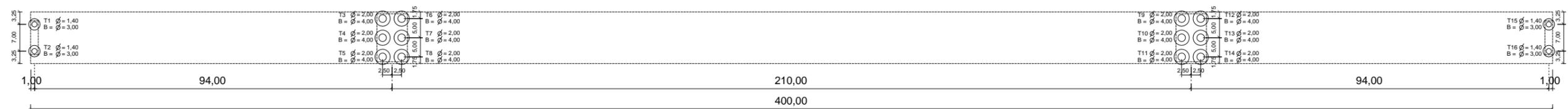


Figura 4.5 – Locação Fundações: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

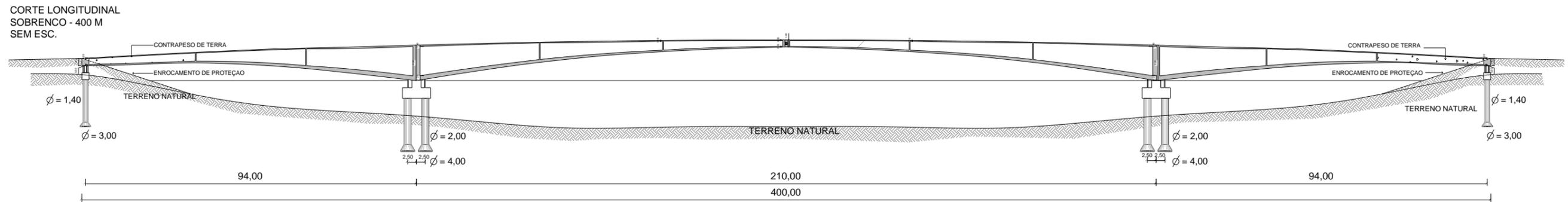
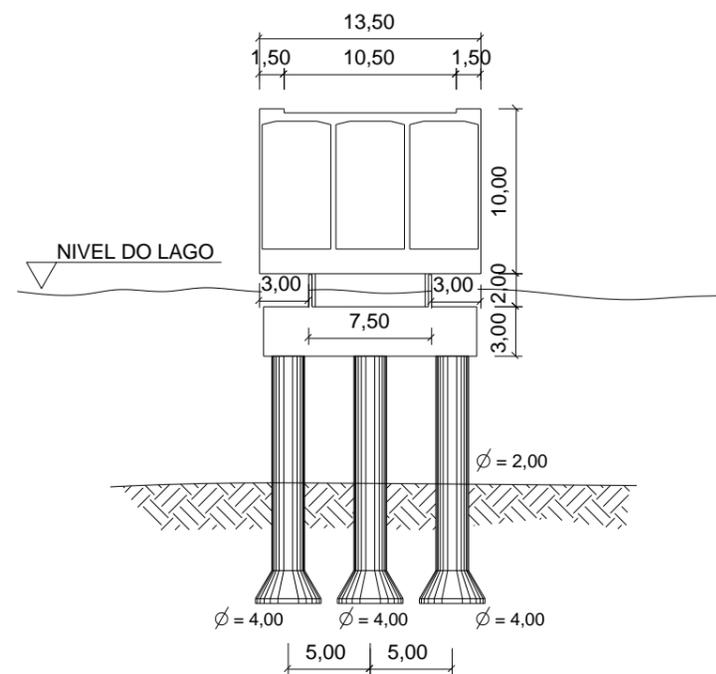


Figura 4.6 – Corte Longitudinal: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

CORTE B - B
SOBRECO - 400 M
SEM ESC.



CORTE A - A
SOBRECO - 400 M
SEM ESC.

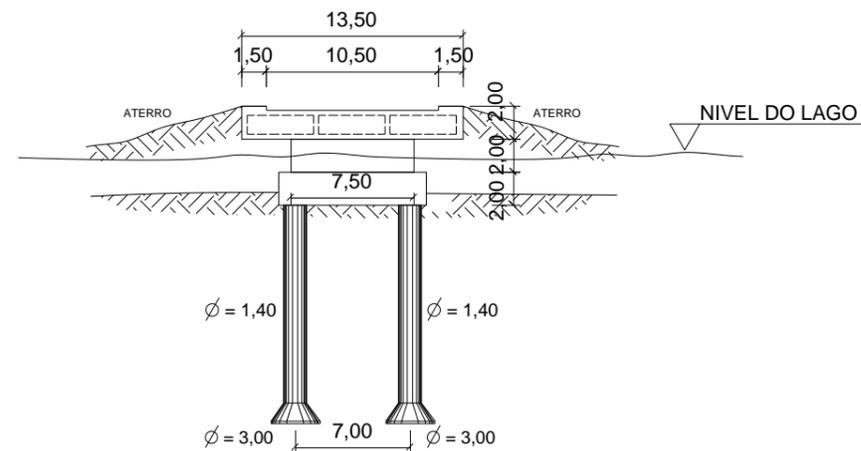
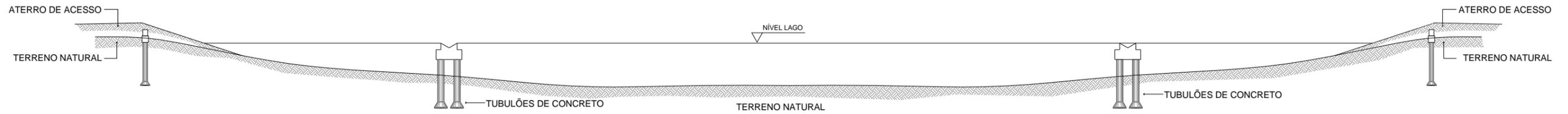
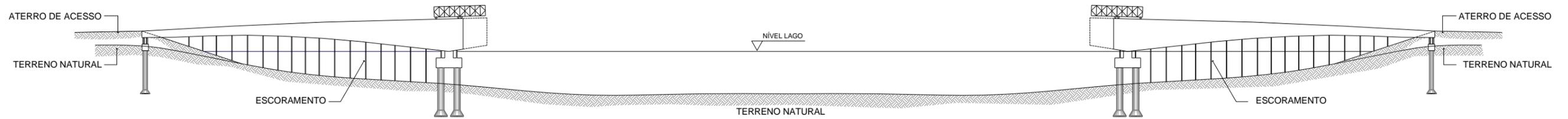


Figura 4.7 – Corte Transversal: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

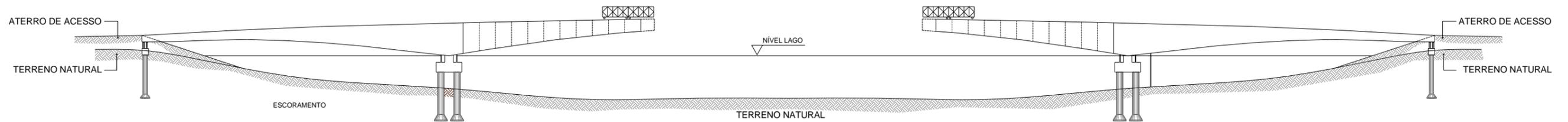
01 EXECUÇÃO DAS FUNDAÇÕES E DOS ATERROS DE ACESSO



02 EXECUÇÃO DOS VÃOS LATERAIS



03 EXECUÇÃO DO VÃO CENTRAL (BALANÇOS SUCESSIVOS)



04 ESTRUTURA TERMINADA

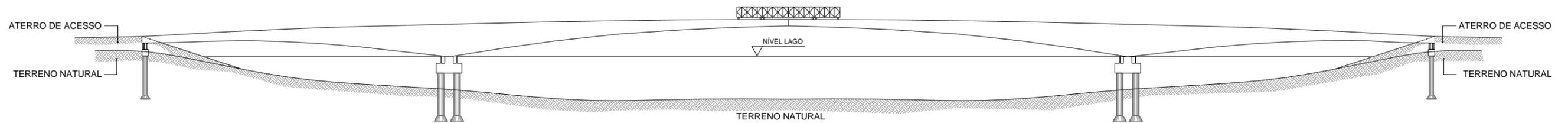
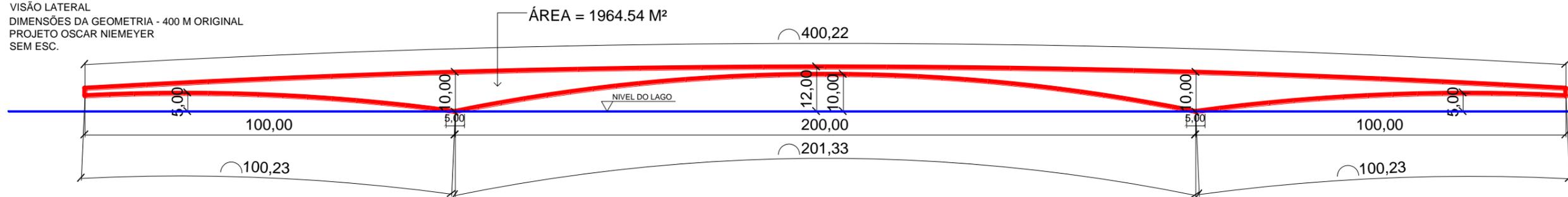


Figura 4.8 – Fases da Construção: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

VISÃO LATERAL
DIMENSÕES DA GEOMETRIA - 400 M ORIGINAL
PROJETO OSCAR NIEMEYER
SEM ESC.



VISÃO LATERAL
DIMENSÕES DA GEOMETRIA - 440 M CONSTRUÍDO
PROJETO OSCAR NIEMEYER
SEM ESC.

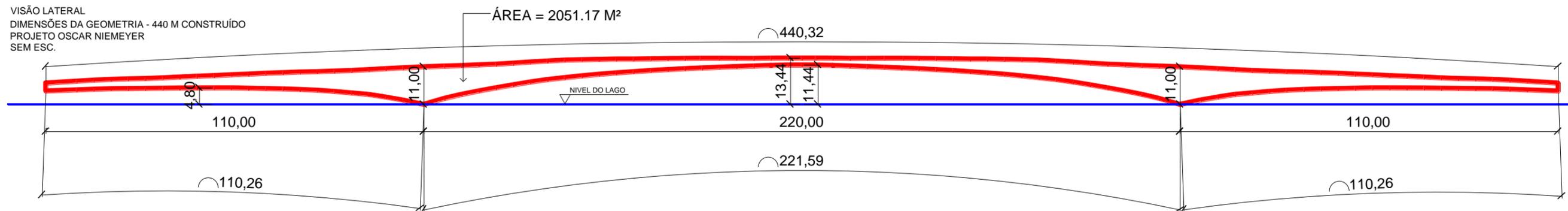


Figura 4.9 – Comparação das geometrias, projeto original com 400 metros e projeto construído com 440 metros.
Desenhos CAD realizados pelo autor segundo projetos originais. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

BATIMETRIA SEGUNDO SONDAGENS
SEM ESC.

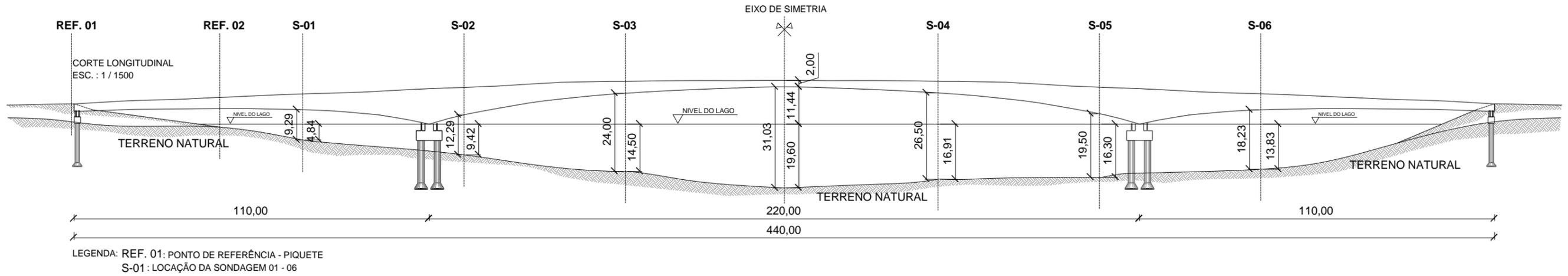


Figura 4.10 – Batimetria demonstrando a topografia do lago no local de construção da Ponte Costa e Silva. Desenhos CAD realizados pelo autor segundo projetos originais. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

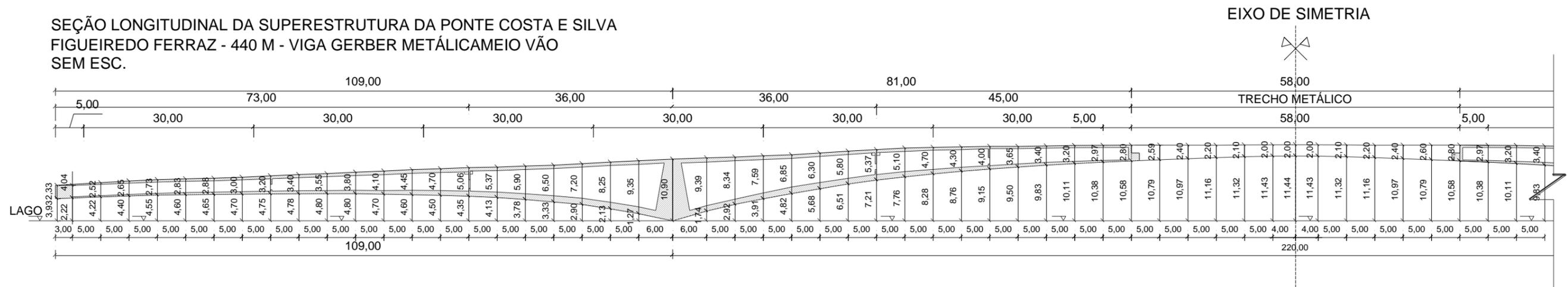


Figura 4.11 – Seção Longitudinal da ponte terminada mostrando a viga metálica Gerber utilizada para conclusão da superestrutura. Desenhos CAD realizados pelo autor segundo projetos originais. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).



Figura 4.12 – Foto panorâmica da Ponte Costa e Silva no contexto urbano de Brasília. À esquerda: Lago Sul, à direita: Plano Piloto. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.13 – Ponte Costa e Silva no Lago Paranoá, visão frontal, notar os blocos de fundação recuados. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.14 – Ponte Costa a Silva. Fonte: (Foto do autor, 2006).



Figura 4.15 – Ponte Costa e Silva. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.16 – Ponte Costa e Silva, imagem aérea. Fonte: retirada do site www.infobrasilia.com.br (Augusto Areal, 2007).



Figura 4.17 – Ponte Costa e Silva com a vista do Lago Sul. Fonte: retirada do site www.infobrasilia.com.br (Augusto Areal, 2007).



Figura 4.18 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos: bloco de fundação recuado e do reforço da fundação aparente em virtude do baixo nível de água do lago no período da seca. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.19 – Ponte Costa e Silva, detalhes construtivos: cabos inclinados de costura, ver Figura 2.22. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.20 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos: trecho metálico comumente chamado de dente Gerber visão lateral. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.21 – Ponte Costa a Silva, detalhes construtivos: trecho metálico comumente chamado de dente Gerber visão frontal. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.22 – Ponte Costa a Silva, imagem lateral com a escala humana. Fonte: (Foto do autor, 2007).



Figura 4.23 – Ponte Costa a Silva, detalhe de um dos pilares com a Ponte JK ao fundo. Fonte: (Foto do autor, 2007).

4.3 - AVALIAÇÃO ESTRUTURAL QUALITATIVA

O modelo de racionalidade que permitiu o desenvolvimento das ciências exatas mostra-se cada vez mais insuficiente para a compreensão das questões que envolvem componentes sociais, culturais, humanos, como é o caso das questões educacionais. Por outro lado, a pesquisa qualitativa, de desenvolvimento mais recente, procura – sempre vinculada a idéia de processo – procedimentos, técnicas de investigação e métodos mais adequados ao mundo social (TEIXEIRA, 2004).

O rigor matemático reconhece relevância científica no que pode ser quantificado, representado muitas vezes pela avaliação quantitativa e pelo modelo que privilegia razão sobre todos os aspectos, expõe atualmente, que existem limites para a produção de conhecimento. A pesquisa qualitativa, busca abarcar os desafios postos pelos fenômenos educacionais.

Na pesquisa qualitativa são adotados pressupostos absolutamente distintos daqueles que orientam o modelo quantitativo. Qualquer que seja seu enfoque, a realidade é de uma forma ou de outra, dependente da mente: aquilo que é investigado não é autônomo do processo de investigação, e a compreensão de uma determinada ação é sempre inseparável da compreensão do contexto que lhe dá a origem e a envolve (TEIXEIRA, 2004).

O entendimento estrutural não pode ser alcançado somente com as análises quantitativas, o conhecimento matemático se faz importante para a aferição do conhecimento qualitativo, um depende do outro, mas sem a compreensão qualitativa dos fenômenos físicos e matemáticos não é possível entender completamente qualquer avaliação estrutural.

Uma pesquisa baseada em análise estrutural qualitativa permite que seja determinado o comportamento de sistemas físicos capazes de receber e transmitir esforços, inferindo a sua geometria não somente com dados matemáticos. Os dados matemáticos podem justificar uma forma pela força, já as análises qualitativas podem justificar uma forma pela compreensão de sua análise.

Na análise da ponte de Oscar Niemeyer em Brasília, a avaliação estrutural qualitativa se faz necessária como uma ferramenta metodológica que possa contribuir para justificar a forma adotada. O arquiteto esclarece que se fosse levado apenas em consideração os dados matemáticos, a melhor forma adotada seria a com pequenos vãos (p. 19), portanto, os dados

matemáticos determinariam a forma pela força de seus componentes, representado pela dimensão de suas geometrias.

Com a experiência de análise realizada na disciplina *Evolução da Forma Estrutural*, onde os estudos qualitativos se sobrepõem aos estudos quantitativos, conseguimos aferir como a forma pode ser justificada pela avaliação estrutural qualitativa, resultando em uma estrutura mais coerente, ou no mínimo, de maior acordo com o seu sistema construtivo facilitando, conseqüentemente, a sua montagem e execução. A intenção arquitetônica pode ter um resultado formal calcado nas virtudes estruturais.

O programa FTOOL (MARTHA, 2002) pode servir como uma ferramenta para inferir a geometria, isso foi mostrado no item 3.7 do presente trabalho. As análises a seguir, realizadas nesse programa computacional, são referentes ao objeto de estudo. Nosso estudo não possuirá resultados quantitativos – as aferições matemáticas não se fazem necessárias – serão descartados os valores matemáticos existentes, sendo substituídos por valores unitários representando o peso próprio e cargas acidentais, dessa maneira, os resultados demonstrarão o conhecimento estrutural utilizado pelo arquiteto para encontrar a forma.

A primeira análise é realizada com uma viga reta vencendo o vão total a ser transposto pela ponte de 400 metros (Figura 4.24). A segunda análise apresenta uma viga reta, com os mesmos vãos presentes no projeto original de Oscar Niemeyer, 200 metros de vão central com dois vãos adjacentes de 100 metros cada (Figura 4.26). As cargas mostradas representam o peso próprio da estrutura, sendo adotada uma carga unitária uniformemente distribuída, a estrutura possui uma seção transversal também unitária. O programa nos permite obter o gráfico de momento fletor (Figuras 4.25 e 4.27), onde sua curvatura está ligada diretamente com a flexão.

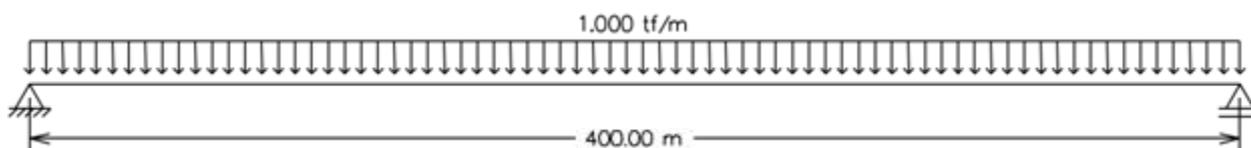


Figura 4.24 – Análise de viga reta transpondo o vão total, sem vãos intermediários realizada pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

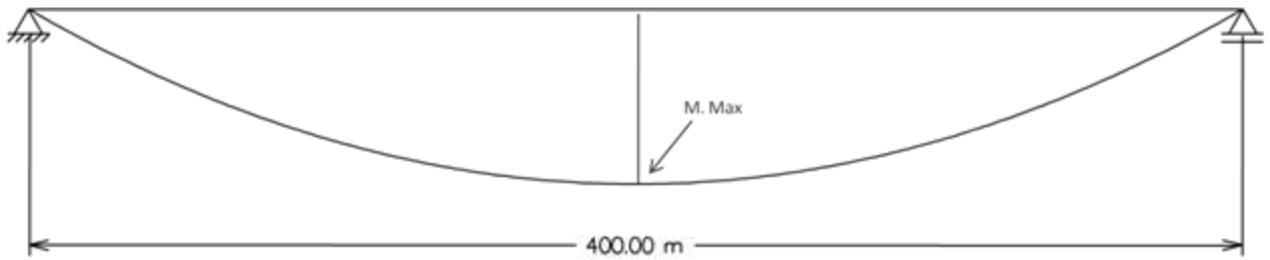


Figura 4.25 – Resultado gráfico do momento fletor para a viga reta sem apoios intermediários, realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

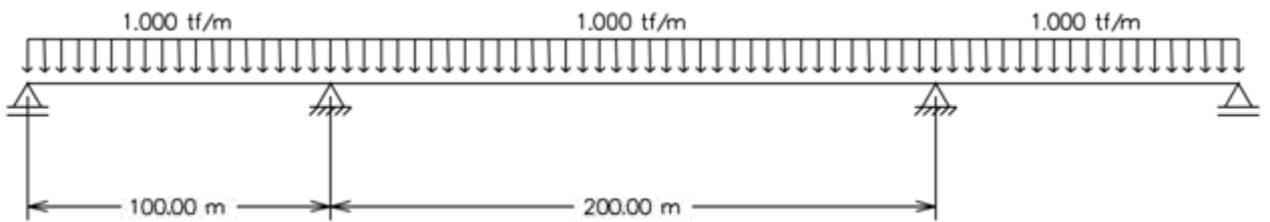


Figura 4.26 – Análise da viga reta com os vãos do projeto de Niemeyer, realizada pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

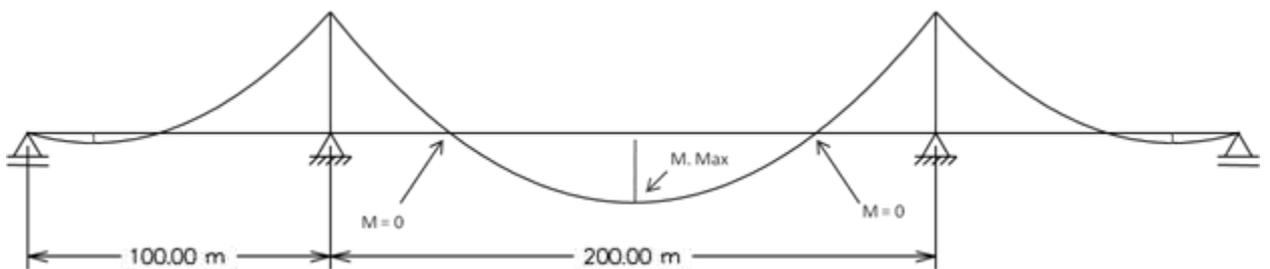


Figura 4.27 – Resultado do gráfico dos esforços de Momento Fletor realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

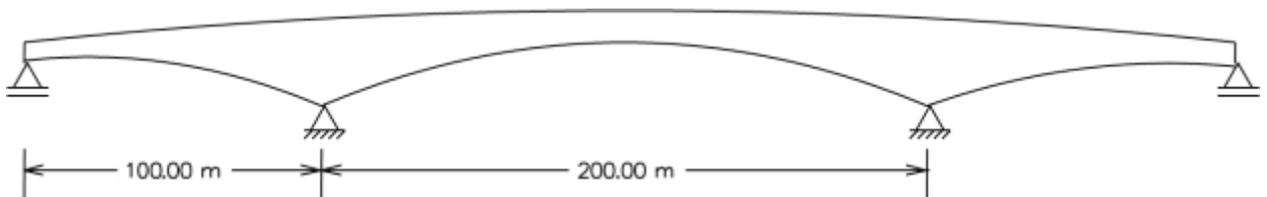


Figura 4.28 – Resultado formal obtido ao se inverter o gráfico de momento fletor, a forma arquitetônica tendo como referência a forma do gráfico de momento. Desenho realizado pelo autor. Fonte: (Photoshop, 2007).

Esses gráficos são obtidos pela análise qualitativa da relação entre vãos e esforços. O arquiteto ao adotar a forma é o responsável pela geometria arquitetônica e estrutural, Niemeyer estipulou a proporção dos vãos e suas dimensões. Não é possível afirmar que a forma da ponte é resultado do gráfico de momento fletor (Figura 4.28), entretanto, ao se determinar essa proporção e a distribuição de um único vão em trechos menores, o arquiteto consegue diminuir consideravelmente os esforços existentes no meio do vão central, resultando em uma forma mais esbelta, uma das características mais constantes em sua trajetória.

4.4 - ANÁLISE ESTRUTURAL QUALITATIVA DA PONTE UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Como o programa FTOOL (MARTHA, 2002) permite de maneira simples e bastante clara verificar o comportamento estrutural – exemplificando os esforços internos solicitantes que uma estrutura estará submetida – resolvemos analisar as possíveis variações de vãos que poderiam ser utilizados para se construir a ponte com o vão adotado pelo arquiteto. As análises realizadas demonstram o gráfico de momento fletor (Figuras 4.30 e 4.31).

Na variação de vãos fizemos uma razão de a/L , onde: a corresponde ao vão adjacente e L corresponde ao vão total da ponte, sendo constante e apresentando o valor de 400 metros, conforme o desenho a seguir:

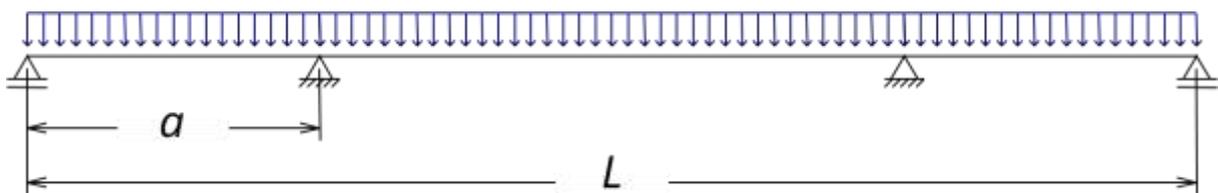
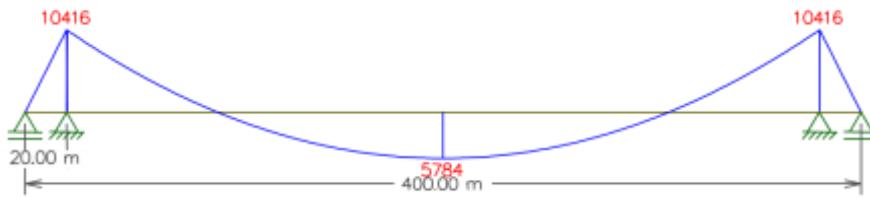


Figura 4.29 – Denominação dos vãos, desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

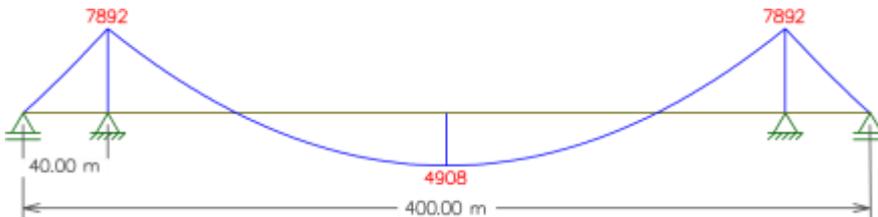
A aferição da análise é feita em cima da relação existente entre os vãos. Apesar de a ponte ter sido construída com 440 metros e os gráficos apresentarem o vão do projeto original de

400 metros, as relações entre eles são as mesmas, onde $\frac{a}{L} = \frac{100}{400} = \frac{110}{440} = 0,25$.



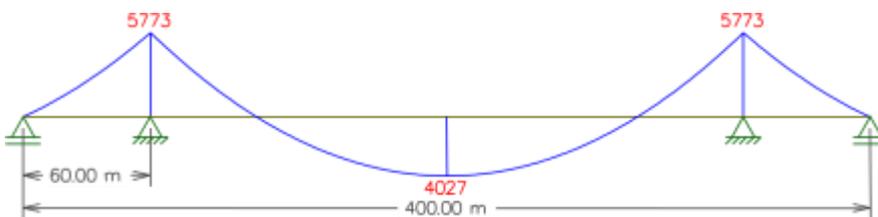
Variação de vãos 01:

$$\frac{a}{L} = \frac{20}{400} = 0,05$$



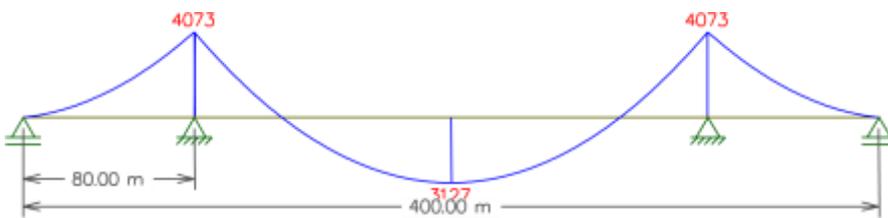
Variação de vãos 02:

$$\frac{a}{L} = \frac{40}{400} = 0,1$$



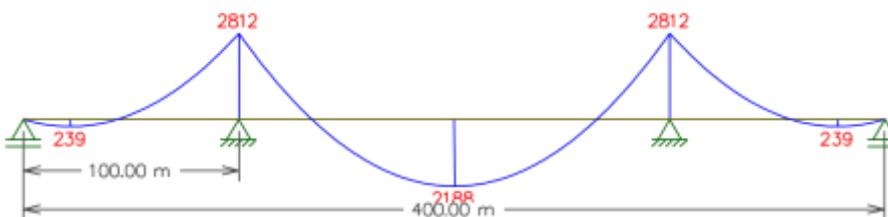
Variação de vãos 03:

$$\frac{a}{L} = \frac{60}{400} = 0,15$$



Variação de vãos 04:

$$\frac{a}{L} = \frac{80}{400} = 0,20$$

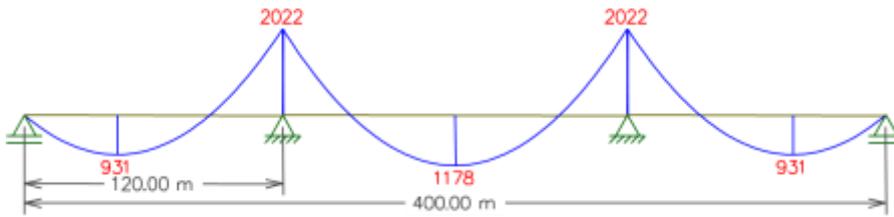


Variação de vãos 05:

$$\frac{a}{L} = \frac{100}{400} = 0,25$$

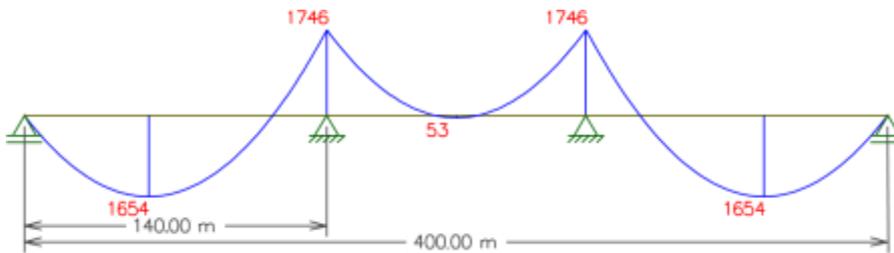
Relação estipulada por Oscar Niemeyer.

Figura 4.30 – Diagramas de momentos fletores de acordo com a respectiva variação de vãos. Desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).



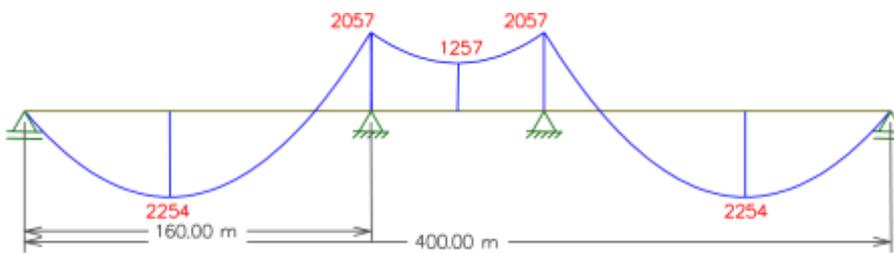
Varição de vãos 06:

$$\frac{a}{L} = \frac{120}{400} = 0,30$$



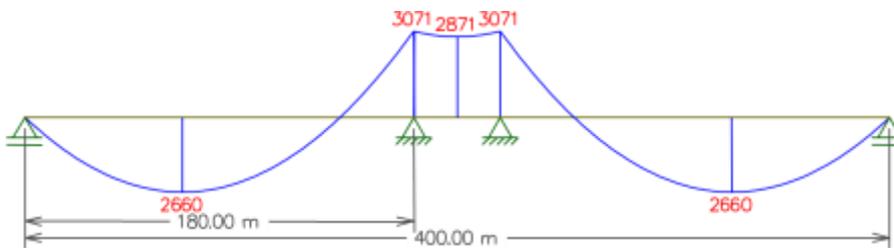
Varição de vãos 07:

$$\frac{a}{L} = \frac{140}{400} = 0,35$$



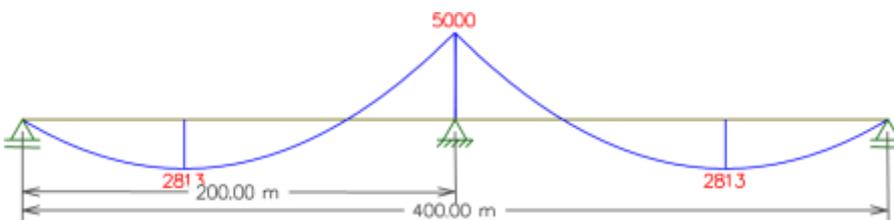
Varição de vãos 08:

$$\frac{a}{L} = \frac{160}{400} = 0,40$$



Varição de vãos 09:

$$\frac{a}{L} = \frac{180}{400} = 0,45$$



Varição de vãos 10:

$$\frac{a}{L} = \frac{200}{400} = 0,50$$

Figura 4.31 – Diagramas de momentos fletores de acordo com a respectiva variação de vãos. Desenho realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Todas as hipóteses estão sobre o carregamento unitário, representando o peso próprio da estrutura com dimensões unitárias e constantes, assim como, determinadas com o mesmo material que é o concreto. Depois dos resultados gráficos obtidos pelo programa colocamos os valores numéricos dos momentos máximos e mínimos na Tabela 4.1 que nos gera um gráfico em função desses valores (Figuras 4.32 e 4.33)

Tabela 4.1 – Resultados dos momentos máximos positivos e negativos encontrados na relação dos vãos.
Tabela realizada pelo autor. Fonte: (MICROSOFT EXCEL, 2007).

a/L	M. Positivo	M. Negativo
0,05	5783	10416
0,10	4907	7892
0,15	4027	5772
0,20	3127	4072
0,25	2187	2812
0,30	1177	2022
0,35	1654	1746
0,40	2254	2057
0,45	2660	3070
0,50	2812	5000



Figura 4.32 – Gráficos de momentos máximos positivos e negativos. Gráfico realizado pelo autor.
Fonte: (MICROSOFT EXCEL, 2007).



Figura 4.33 – Gráfico com a sobreposição dos valores dos momentos. Gráfico realizado pelo autor.
Fonte: (MICROSOFT EXCEL, 2007).

Com a Tabela 4.1 conseguimos verificar a diferença dos momentos entre a relação de vão estipulada por Niemeyer que ficou com 0,25 e as demais possibilidades construtivas. Com esse resultado conseguimos especular que essa relação, juntamente com a de 0,30 possuem os momentos máximos e mínimos mais próximos, sem uma disparidade perceptiva. Encontramos na relação 0,35 a possibilidade construtiva mais ideal do ponto de vista do engenheiro civil, entretanto nessa relação, seria muito difícil proporcionar a forma mais bela.

Além da forma arquitetônica mais interessante, a relação de Niemeyer se mostra superior às outras por apresentar fundação mais econômica – por estar mais próximo das margens a fundação se torna mais vantajosa financeiramente – e a própria navegabilidade do lago, o vão central de 200 metros apresenta maior possibilidade para passagem de lanchas e barcos. Os vãos laterais de Niemeyer, sendo mais próximos da margem também ajudam a vencer o vão central conferindo a ele certo engastamento.

Com essa relação de vãos conseguimos entender o raciocínio sintético e especular com a forma estrutural a partir dos diagramas de esforços. A figura a seguir mostra a relação de 0,25 com o vão central de 200 metros e vãos laterais de 100 metros, demonstrando os gráficos de esforço cortante, momento fletor, deslocamento (flecha) e normal (esse será zero), não existe esforço normal em viga reta sob ação de uma carga distribuída verticalmente, mas servirá de comparação quando mostrado o gráfico do normal na análise com o vão arqueado.

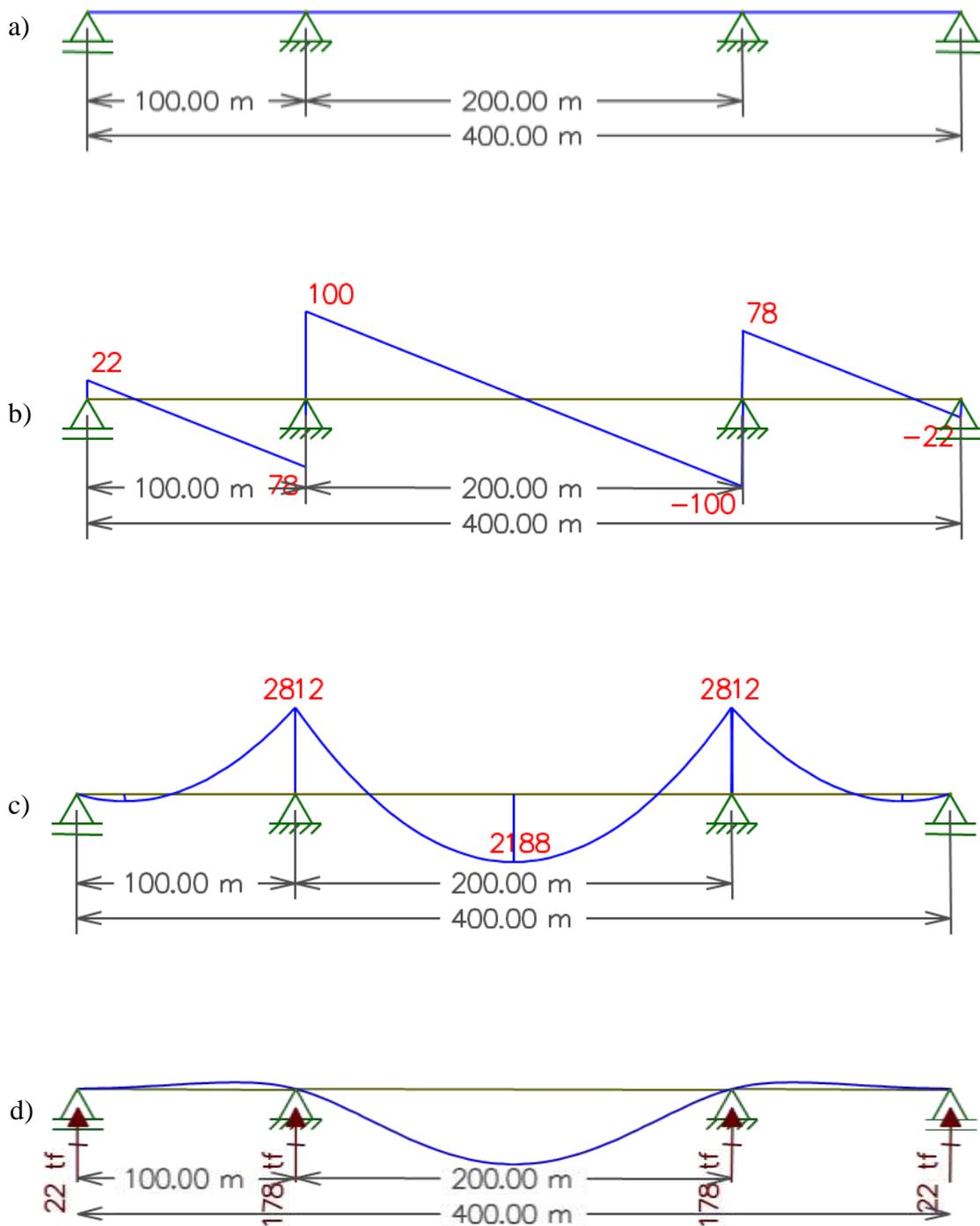


Figura 4.34 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga distribuída unitária, representando o peso próprio da estrutura. a) normal; b) cortante; c) fletor; d) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Nas análises já realizadas, levamos em consideração uma viga reta, representando a estrutura da ponte com um carregamento uniformemente distribuído, essa carga representa o peso próprio da estrutura, é uma carga estática e permanente. No projeto de estruturas, as cargas acidentais são incertas e incluem todos os pesos móveis que fazem parte ou que compõem o espaço construído, pessoas, animais, máquinas, móveis, acessórios, etc. e devem ser levadas em consideração para o correto cálculo estrutural. No caso de análise em pontes, a carga acidental provenientes dos automóveis que a utilizaram, influencia de maneira excepcional o seu projeto. Fazemos uso do *Trem Tipo* para uma melhor análise estrutural.

Em engenharia estrutural trem-tipo são carregamentos padronizados que simulam os veículos (caminhões ou trens) que irão passar sobre uma ponte rodoviária ou ferroviária, permitindo assim o seu dimensionamento. O trem-tipo é escolhido de acordo com a classe da estrada, sendo utilizado para calcular os esforços em uma estrutura sujeita a cargas móveis, como no caso de pontes. Ele é constituído de cargas concentradas que correspondem aos eixos do veículo (NBR 7188, 1982).

No caso de trem-tipo rodoviário, ainda se considera cargas distribuídas, chamadas carga multidão, apenas utilizada nos trechos que podem onerar o esforço que se deseja calcular. Por exemplo, para o trem-tipo de 36 t, temos 3 cargas de 12 t distanciadas de 1,5 m e mais uma carga multidão nas laterais, na frente e atrás do trem-tipo (colocadas apenas nas situações mais desfavoráveis).

O trem-tipo deve ser colocado sobre um gráfico chamado Linha de Influência, que representa a variação de um determinado esforço (momento, cortante, etc.) em uma determinada seção da estrutura, quando uma carga móvel unitária se move ao longo da estrutura, em uma posição que, multiplicando-se cada carga concentrada pela ordenada do gráfico, e as cargas distribuídas pela área do gráfico abaixo delas, dê o valor máximo (positivo e negativo). Calculado o valor máximo positivo e valor máximo negativo em várias seções, combinam-se esses valores com os esforços devido às cargas estáticas (como o peso próprio da estrutura) e traça-se outro diagrama chamado "envoltória de esforços", com base no qual a estrutura será dimensionada (MARTHA, 2007).

Entretanto, as análises com trem-tipo e diagrama de envoltório de esforços requerem um grande conhecimento estrutural e matemático para sua resolução, conseqüentemente, na

nossa pesquisa essas teorias se fazem necessárias somente para a realização de um expediente teórico. A simplificação do trem tipo por uma carga unitária colocada em determinados pontos, representando a carga móvel que uma estrutura pode estar submetida, nos permite compreender qualitativamente o comportamento estrutural de uma ponte. O primeiro ponto escolhido é no meio do vão adjacente (Figura 4.35) e o segundo no meio do vão central (Figura 4.36), como os vãos adjacentes são simétricos, o resultado gráfico é o mesmo.

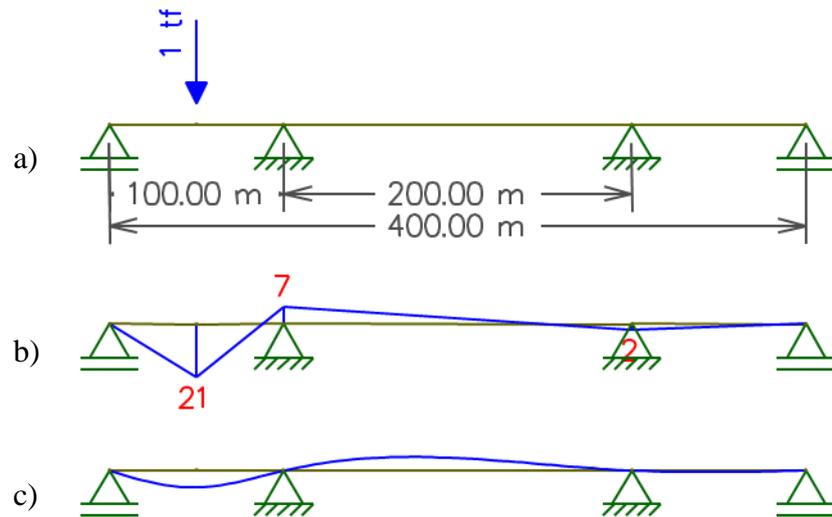


Figura 4.35 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. a) posição do trem-tipo no vão adjacente; b) fletor; c) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

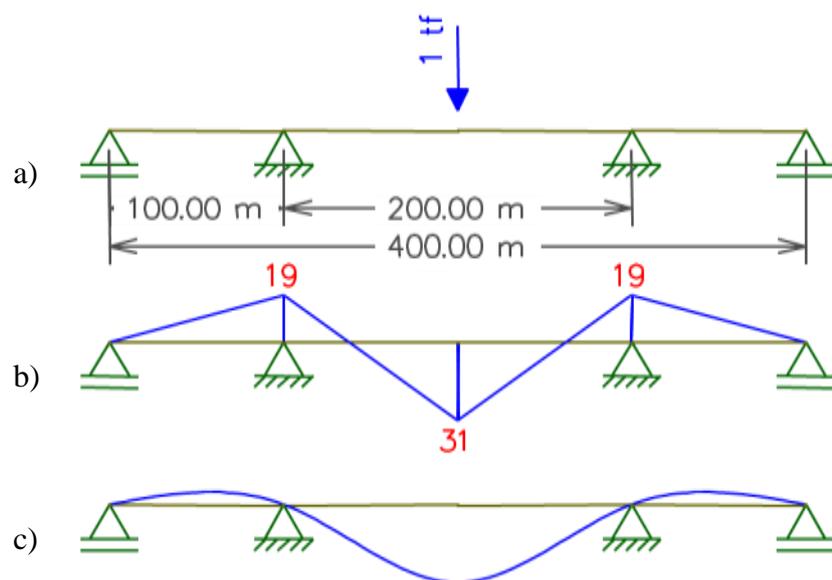


Figura 4.36 – Gráficos de esforços solicitantes da viga reta sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. a) posição do trem-tipo no vão central; b) fletor; c) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Os gráficos anteriores nos demonstram que, mesmo uma carga atuando sobre um ponto específico da estrutura, essa carga acaba influenciando o comportamento estrutural do corpo como um todo, refletindo esse esforço em determinados pontos distintos.

Os estudos em viga reta se tornam mais simplificados e de simples entendimento, no entanto, a geometria da ponte de Oscar Niemeyer apresenta formas curvas e de grande variedade dimensional. Essa variação de altura na seção lateral da ponte garante uma grande variação de inércia, que influencia o comportamento estrutural do objeto em estudo e não pode ser desprezado nas análises computacionais.

Para essa análise (Figura 4.40), foi desenhada a ponte com a geometria existente de 440 metros, sendo dividida em diversos pontos longitudinais e transversais. Esses pontos foram determinados conforme o projeto fornecido pela NOVACAP e exemplificado na Figura 4.11, entretanto, conforme já explicado anteriormente, o procedimento geral e objetivo para determinar as posições de cargas móveis e acidentais que provocam valores extremos de um determinado esforço em uma seção de uma estrutura são feito com auxílio de Linhas de Influência.

Para uma análise mais detalhada do comportamento estrutural, determinamos a partir da geometria da ponte o nível médio das alturas existentes (Figura 4.37), e, posteriormente determinamos as inércias desses trechos, chamados de seção, com o encontro de seu d médio, onde: d é a altura (ou inércia) da seção, sendo o d médio encontrado pela soma do d esquerdo com o d direito e dividindo-se por 2. Esse também seria o procedimento em uma análise quantitativa de modelo de barras.

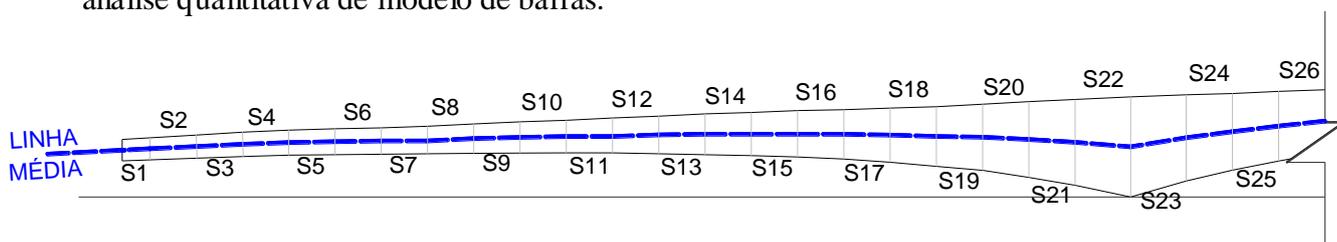


Figura 4.37 – Desenho da linha de média em azul e dos trechos das seções. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: (CAD, 2007).

Cada trecho (S1, S2, S3... SN) foi designado com o d médio correspondente encontrado no cálculo e esses valores foram inseridos no programa FTOOL (MARTHA, 2002) na determinação da propriedade de seção. O próprio programa calcula automaticamente a

inércia de cada seção, sendo escolhida uma seção I com b constante, correspondente a largura de 13,50 m (Figura 4.38 e 4.39).

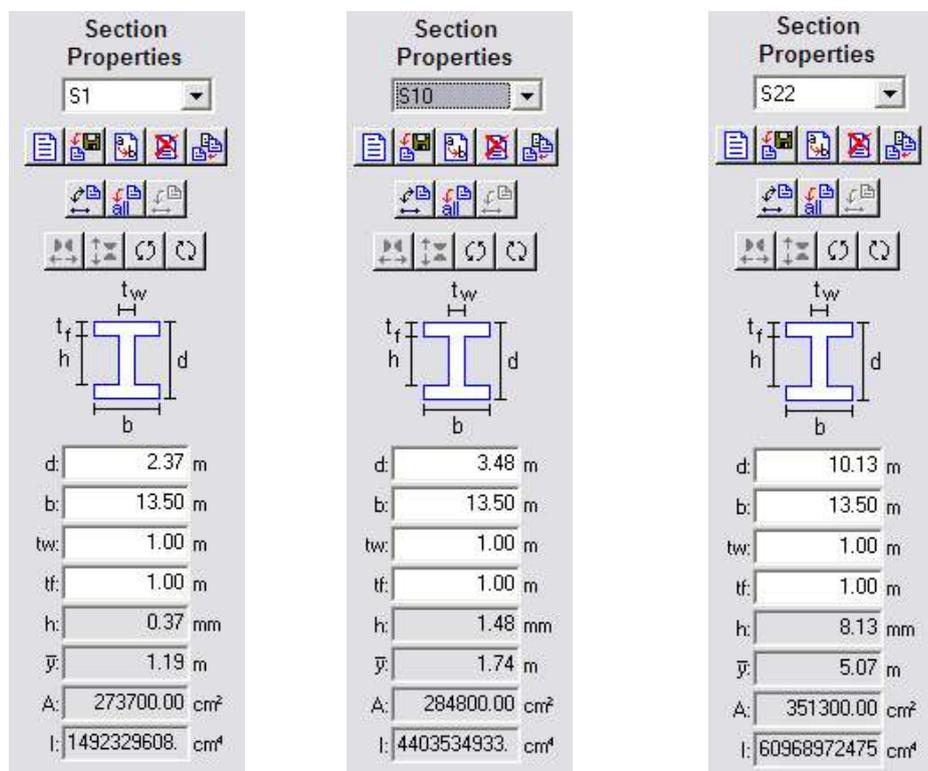


Figura 4.38 – Imagem da área de Propriedades da Seção do programa FTOOL. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

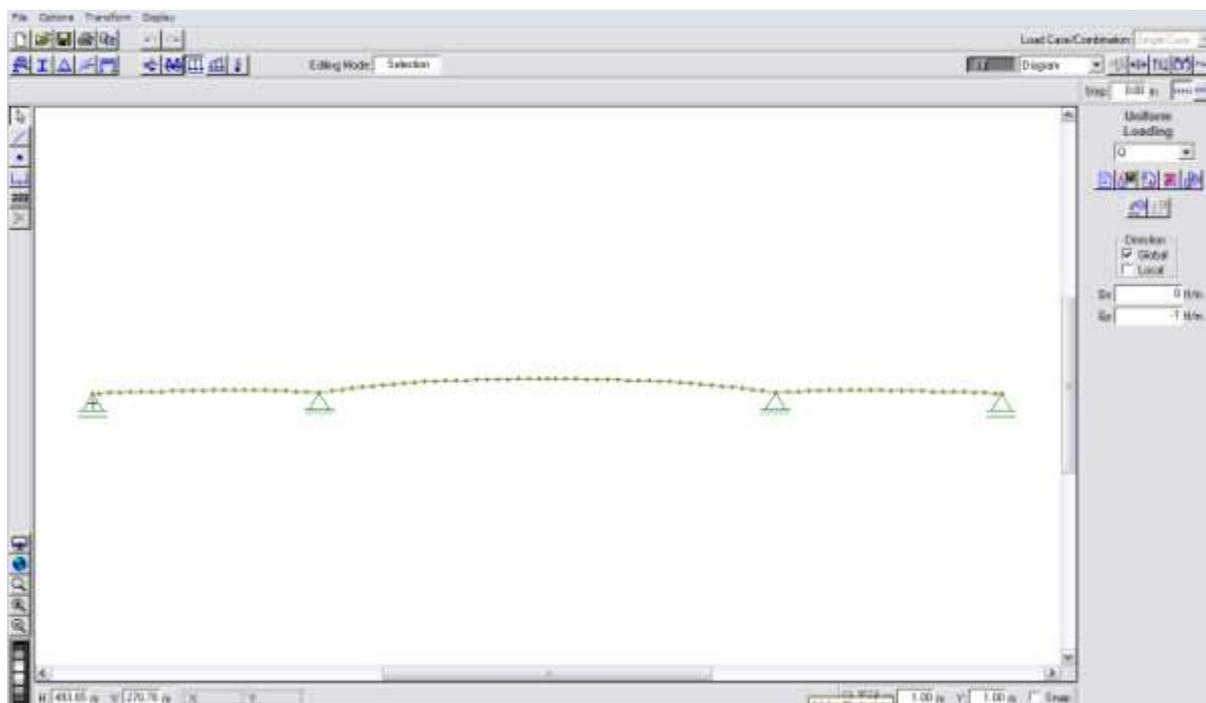


Figura 4.39 – Ambiente gráfico do programa FTOOL, com a geometria da ponte em estudo, com seções variáveis. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

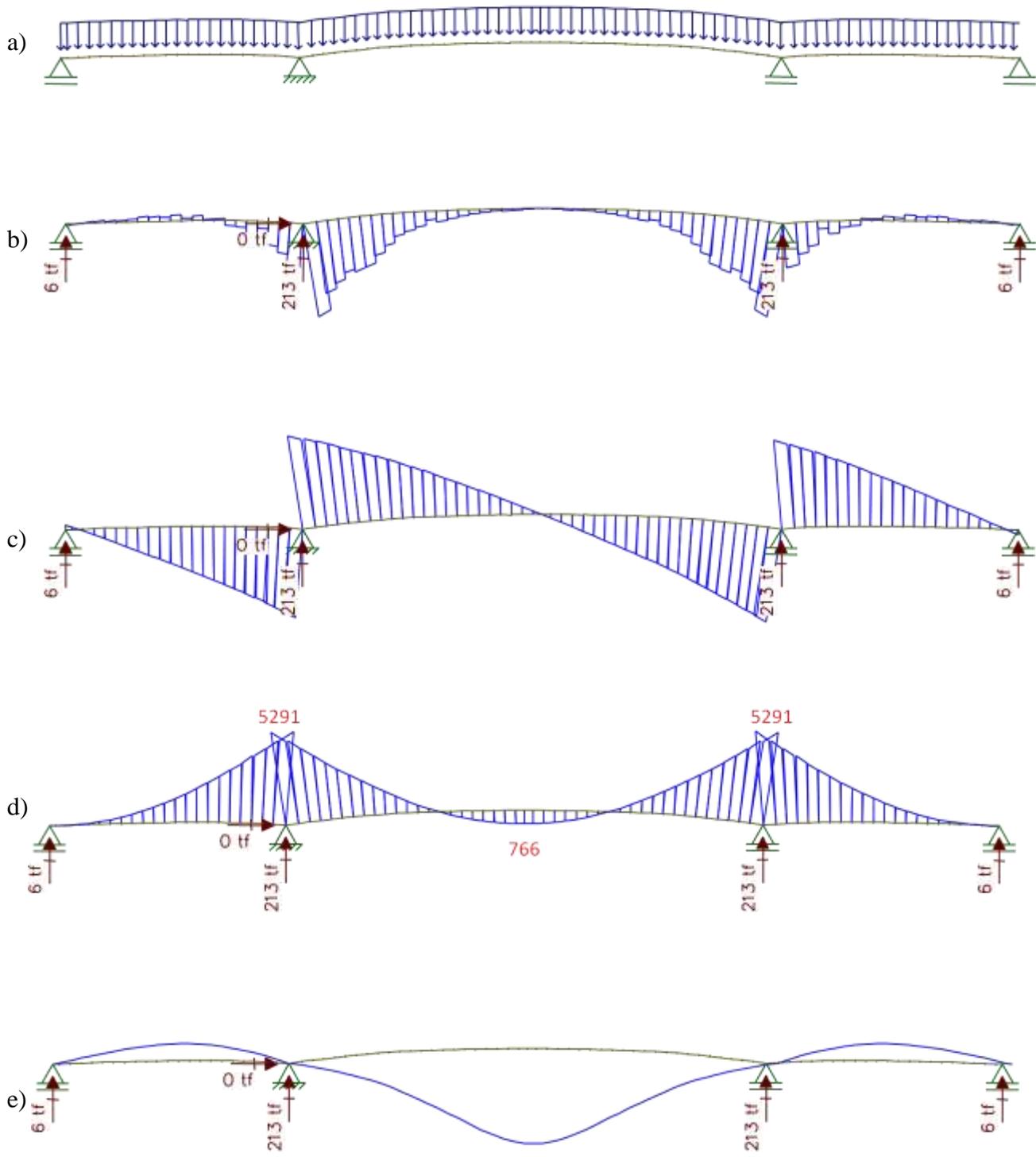


Figura 4.40 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga distribuída, representando o peso próprio da estrutura. a) carga distribuída; b) normal; c) cortante; d) fletor; e) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Outro fator que foi considerado em nossa análise é da forma estrutural final da ponte, onde o trecho central se configura em um trecho metálico representando uma viga Gerber, apoiado em dentes Gerber (Figura 4.41).

A viga Gerber central apóia-se sobre os trechos adjacentes, portanto, esse esquema nada mais é do que uma articulação criada na estrutura hiperestática, tornando-a isostática. Nessa composição, as ligações entre as vigas constituintes da viga Gerber são idealizadas como rótulas. Na análise de uma viga Gerber é mais prático identificar a decomposição nas diversas vigas isostáticas básicas, para, então, determinar as reações e os esforços seccionais de cada uma dessas vigas isoladamente, e posteriormente compor os diversos resultados parciais. Isso evita a resolução de um sistema de equações simultâneas na determinação das reações de apoio e torna o traçado dos diagramas de esforços seccionais mais simples (SORIANO, 2007).

O dente Gerber é uma representação construtiva da rótula, onde o momento é zero no gráfico de momento fletor. Apesar de no projeto original a estrutura não apresentar a viga Gerber, esse sistema foi adotada pelo escritório de cálculo Figueiredo Ferraz para aliviar a estrutura como um todo. As análises a seguir são baseadas no projeto fornecido pela NOVACAP, onde apresentava o corte longitudinal da superestrutura da ponte, mostrando as distâncias longitudinais exatas da viga Gerber, conforme mostrado na Figura 4.11.

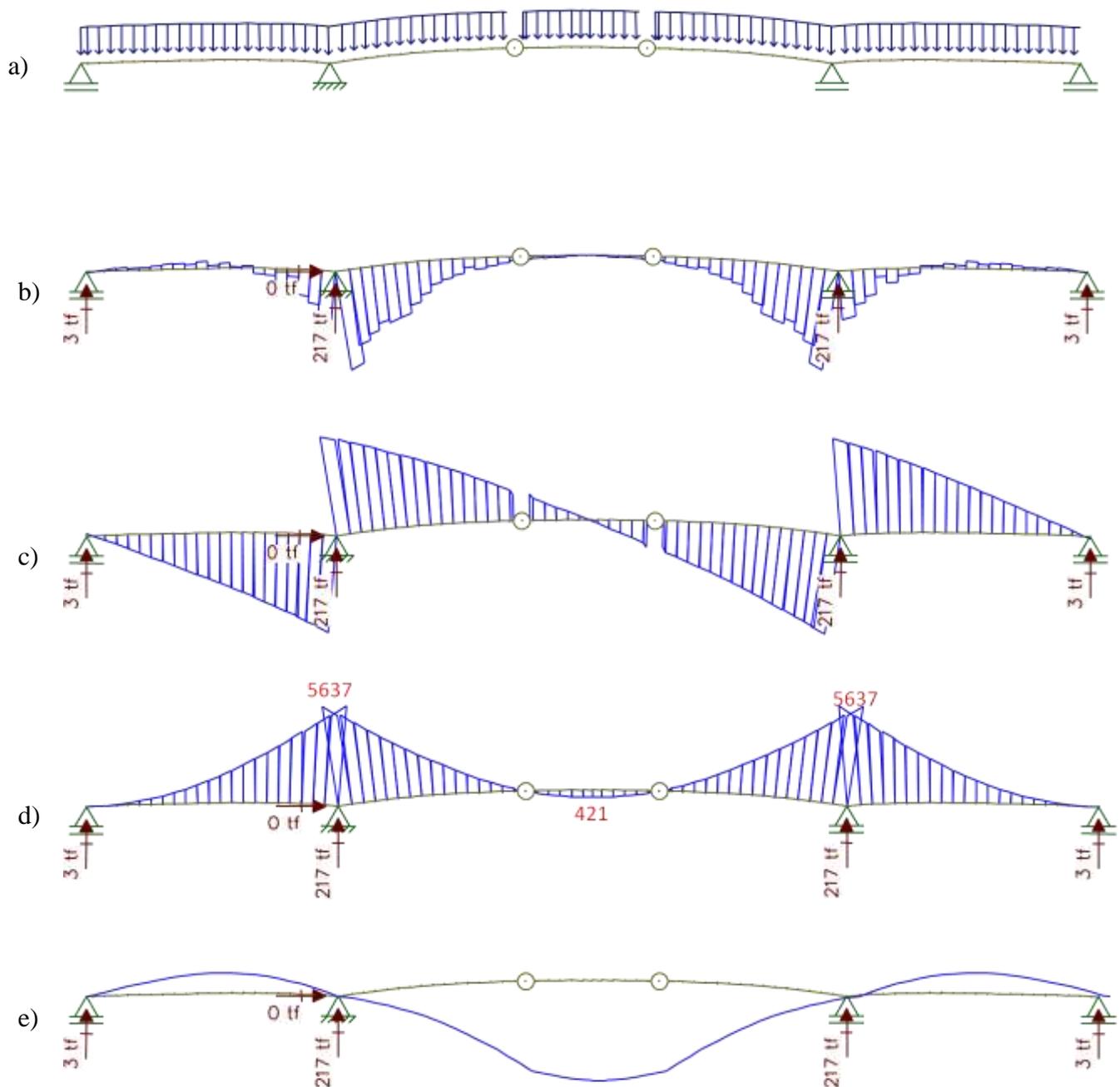


Figura 4.41 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga distribuída, representando o peso próprio da estrutura com rótulas representando a viga Gerber. a) carga distribuída; b) normal; c) cortante; d) fletor; e) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

A análise dos resultados da ponte com carga distribuída apresenta gráficos e valores dos esforços solicitantes muito próximos, mas ao se realizar a análise com uma carga concentrada, representando o trem-tipo, ocorre uma variação desses resultados (Figuras 4.42, 4.43 e 4.44). Com o dente Gerber a estrutura passa a ser isostática, as rótulas absorvem os esforços e a estrutura não se apresenta da mesma forma quando está apenas sob a ação de carga distribuída.

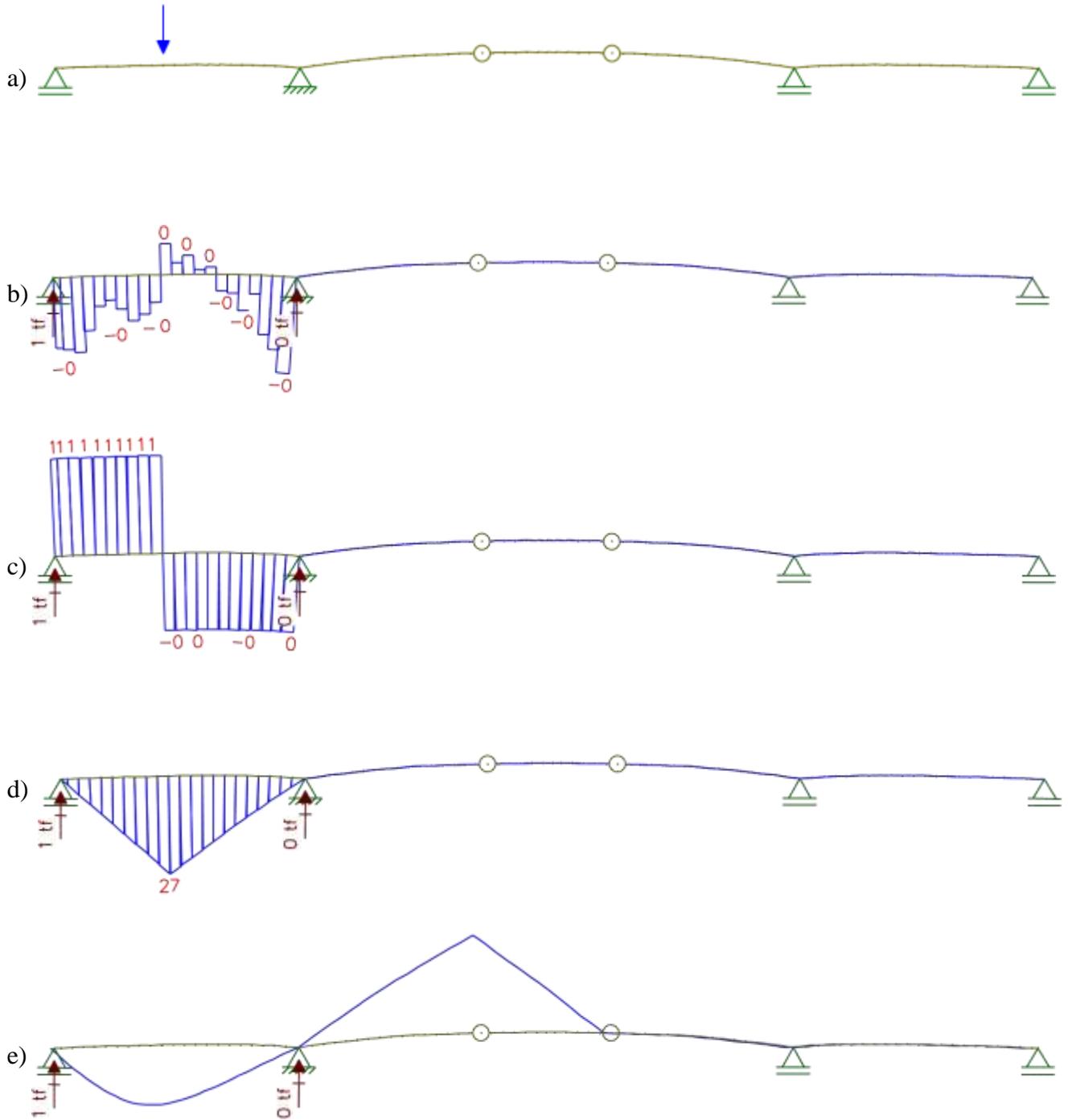


Figura 4.42 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Estrutura com rótulas representando a viga Gerber. a) carga distribuída; b) normal; c) cortante; d) fletor; e) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

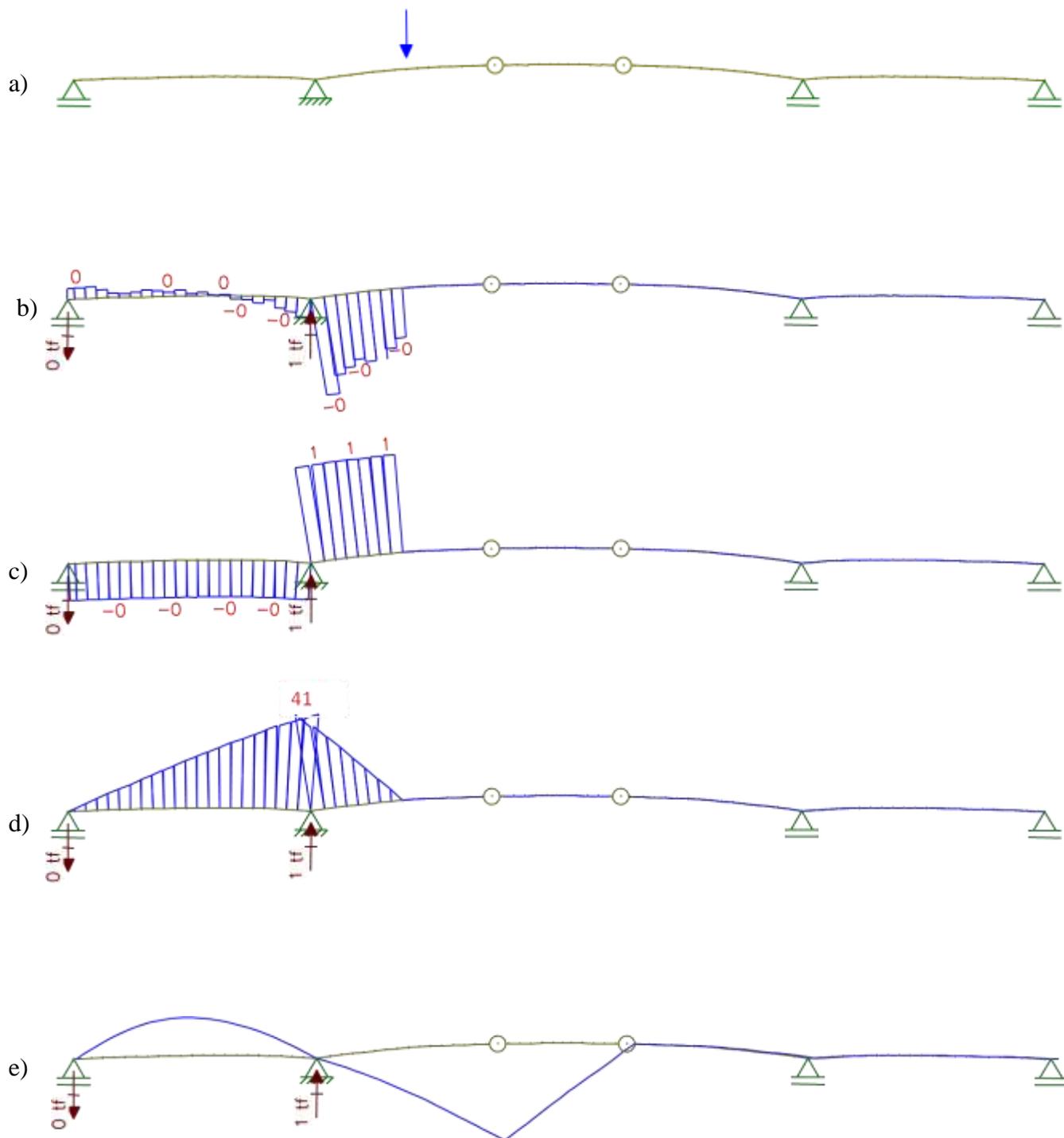


Figura 4.43 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Estrutura com rótulas representando a viga Gerber. a) carga concentrada; b) normal; c) fletor; d) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

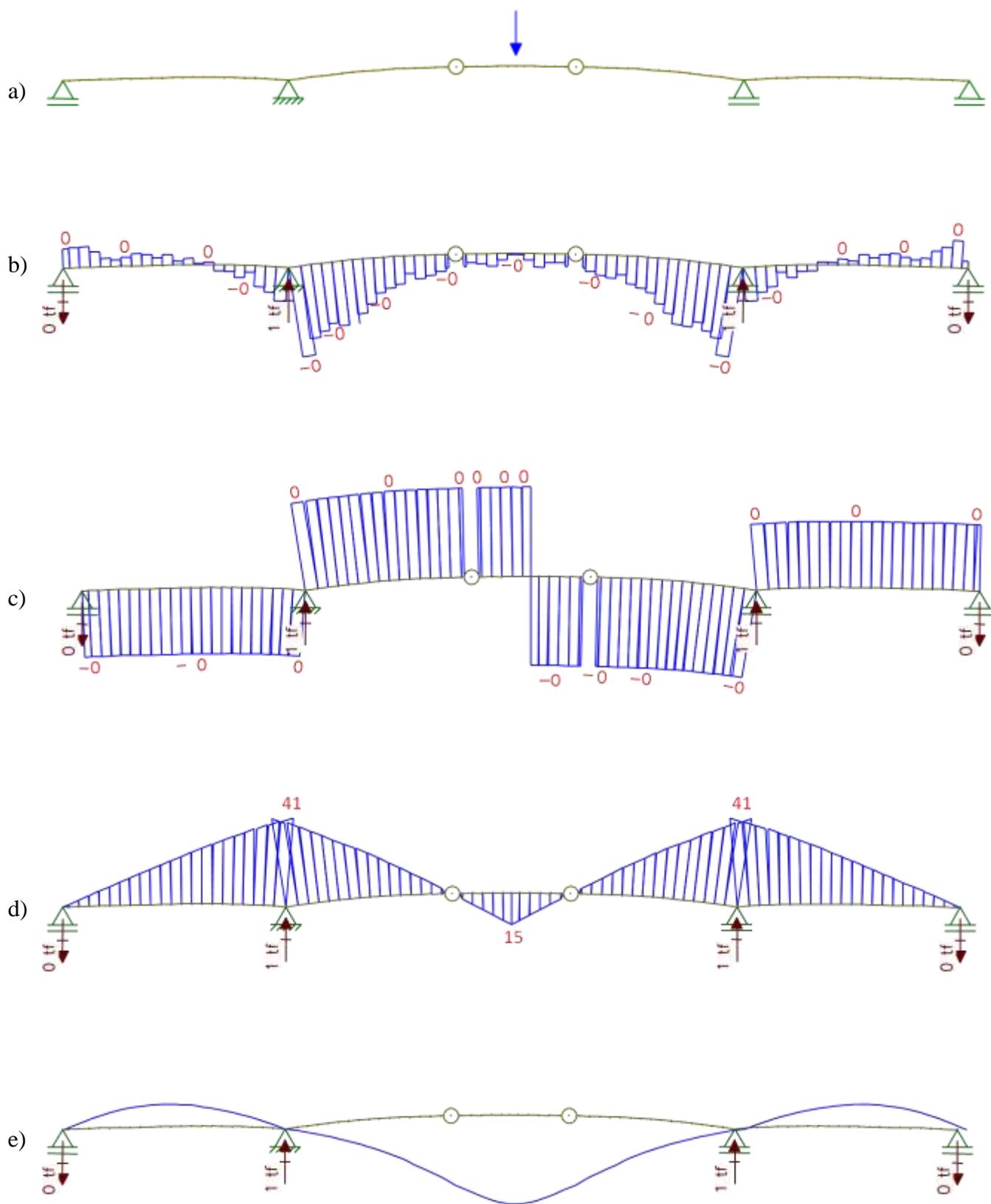


Figura 4.44 – Gráficos de esforços solicitantes sob a ação de uma carga concentrada, representando o trem-tipo. Estrutura com rótulas representando a viga Gerber. a) carga concentrada; b) normal; c) fletor; d) deslocamento. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Com a simulação de um trem tipo é possível observar que essa carga concentrada em movimento muda os esforços, carregando tanto os momentos positivos quanto os negativos (Figura 4.42, 4.43 e 4.44). Esse aumento de esforços representa a envoltória de esforços, que apesar de ter difícil resolução matemática, apresenta uma simples resolução qualitativa com a ajuda do programa FTOOL (MARTHA, 2002).

Ao verificar os esforços e seus comportamentos com a forma, geometria, variação de vãos, inércia etc. o arquiteto cria uma metodologia de análise que lhe permite especular com a relação da forma com os esforços. Todo esse processo ajuda o arquiteto a criar um método, processo ou operação que consiste em reunir elementos diferentes, concretos ou abstratos, e fundi-los num todo coerente, resultando em uma síntese que está fora do escopo do engenheiro.

4.5 - A RAZÃO DA LEVEZA

No seu projeto para a Ponte Monumental, Oscar Niemeyer estipulou a razão dos vãos em $\frac{1}{4}$, onde encontramos o resultado de 0,25. Essa razão nos apresenta uma dualidade matemática, onde encontramos os motivos e a proporção que propicia a leveza.

A intenção de Niemeyer em usar essa proporção reflete sua busca constante e contínua de vencer um grande vão com seções esbeltas. Essa escolha reflete quase que sem dúvidas, a importância da presença do engenheiro para a obra de Niemeyer, o domínio dessa solução estrutural por parte do arquiteto vem do estrito contato que o arquiteto sempre possuiu com seus engenheiros calculistas, como Joaquim Cardozo e Sussekind. Com a insistência dessa razão, Niemeyer proporciona leveza à obra com razões até então desconhecidas, mas clarificadas com a ajuda de uma metodologia de análise computacional.

Com as análises no programa FTOOL (MARTHA, 2002), buscamos justificar essa forma mais leve de maneira técnica, analisando suas possíveis variações e constatando a razão para a sua leveza. Com os gráficos (Figuras 4.32 e 4.33), que demonstram a variação numérica dos momentos positivos e negativos em relação aos vãos, é evidente que existe um vão mais econômico. A razão de 0,30 apresentaria a proporção mais econômica se levássemos apenas os vãos como objeto de análise, entretanto, como se trata de uma ponte, a proporção de 0,25 defendida por Niemeyer, proporciona a construção de fundações mais econômicas. O vão mais econômico não é só determinado pela superestrutura, mas também

pela infra-estrutura, é notório que em uma obra de engenharia a infra-estrutura consome uma grande parcela dos recursos financeiros para sua realização, contudo, o arquiteto definiu que os pilares centrais estariam mais próximos da margem facilitando sua execução e diminuindo os custos de construção, sem falar da navegabilidade.

Nas análises anteriores, conseguimos constatar que além do peso próprio atuando sobre a estrutura existe um trem-tipo influenciando o seu comportamento estrutural. Ao se mover, o trem-tipo provoca uma tração nas fundações dos extremos que deve ser combatida com contrapesos nas extremidades. No caso construtivo esse contrapeso foi obtido com a colocação de terra nos caixões perdidos da superestrutura (Figuras 4.6 e 4.45).

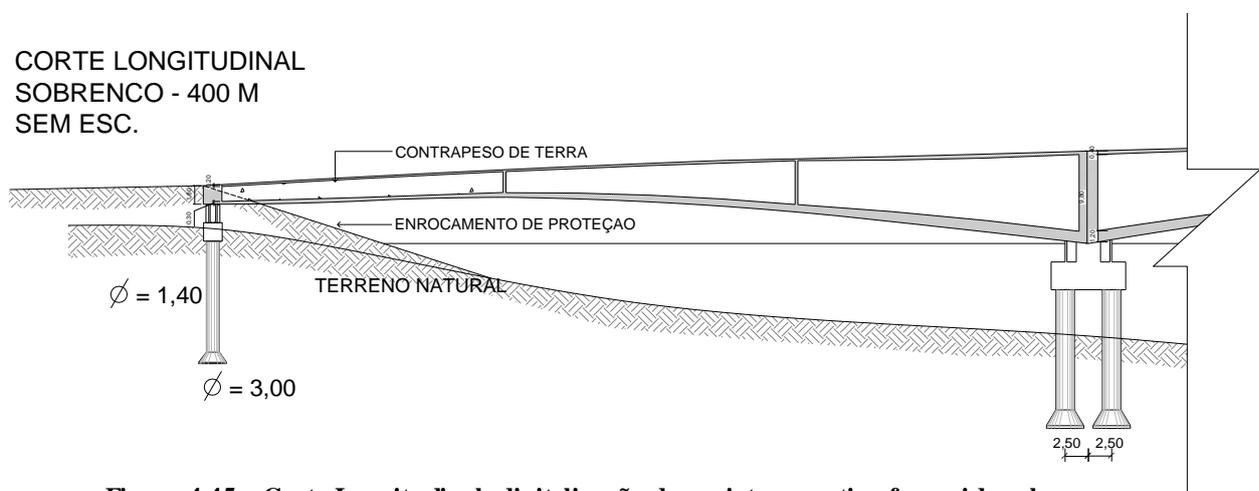


Figura 4.45 – Corte Longitudinal: digitalização do projeto executivo fornecido pela empresa SOBRENCO. Detalhe construtivo com o contrapeso de terra. Desenho CAD realizado pelo autor segundo projeto original. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).

A forma também é responsável pela leveza. Niemeyer é um arquiteto com grande conhecimento dessa afirmação, sempre fez uso da forma para garantir leveza, entretanto, com as análises computacionais constatou-se que a forma determinada pelo arquiteto para a ponte além de garantir uma percepção visual de leveza, garante também, maior leveza no desempenho estrutural. A forma em arcos proporciona o aparecimento de esforços normais, diminuindo os esforços de momento fletor. Niemeyer compreendia que para aquele vão, ao adotar a forma arqueada os esforços de flexão seriam diminuídos com o aparecimento do esforço normal de compressão (facilmente absorvidos pelo concreto) garantindo um melhor desempenho estrutural (Figuras 4.46 e 4.48).

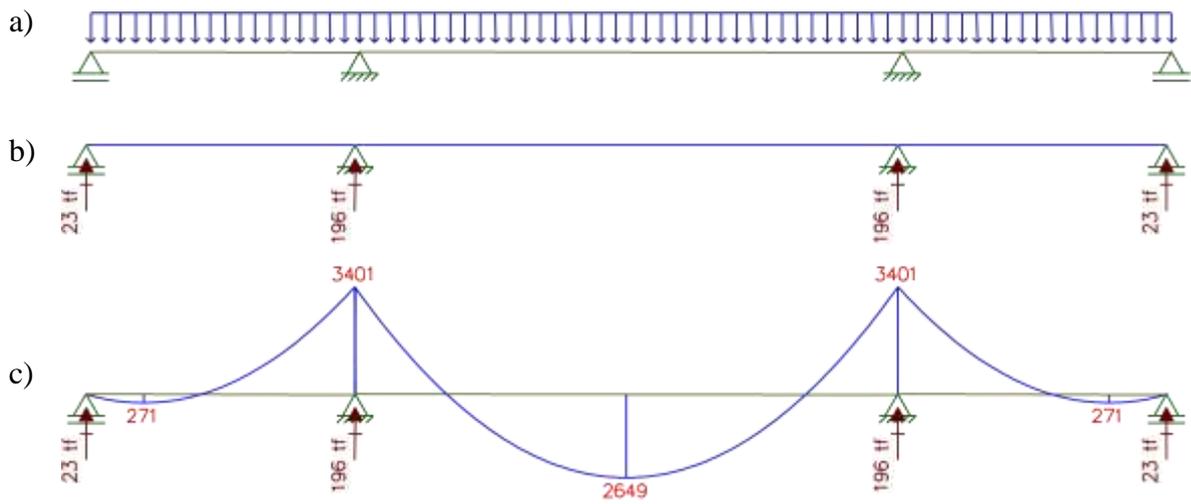


Figura 4.46 – Gráfico dos esforços: a) viga reta com carregamento distribuído; b) esforço normal; c) momento fletor. Na viga reta o esforço normal é inexistente. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

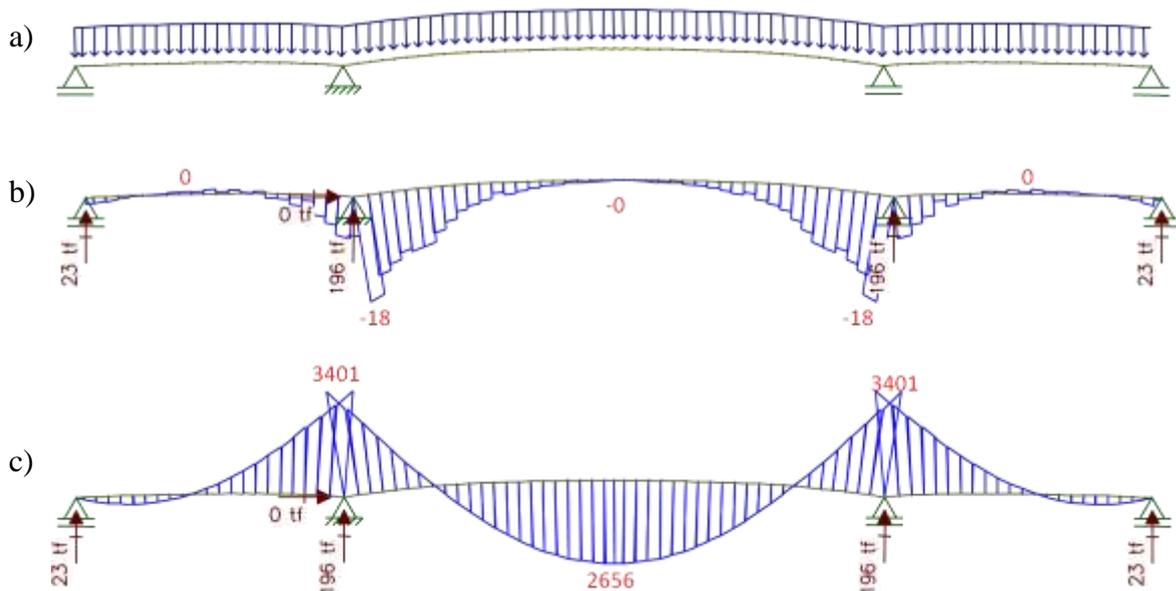


Figura 4.47 – Gráfico dos esforços: a) viga arqueada com carregamento distribuído; b) esforço normal; c) momento fletor. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: (FTOOL, 2007).

Os momentos acima (Figuras 4.46 e 4.47) são praticamente idênticos, no entanto, o modelo real deve apresentar na prática alguma restrição horizontal, contribuindo para um melhor funcionamento da viga em serviço, sob cargas usuais (Figura 4.48). O modelo executado deve estar baseado em uma possibilidade entre as duas hipóteses onde o aparecimento do esforço normal diminui as deformações.

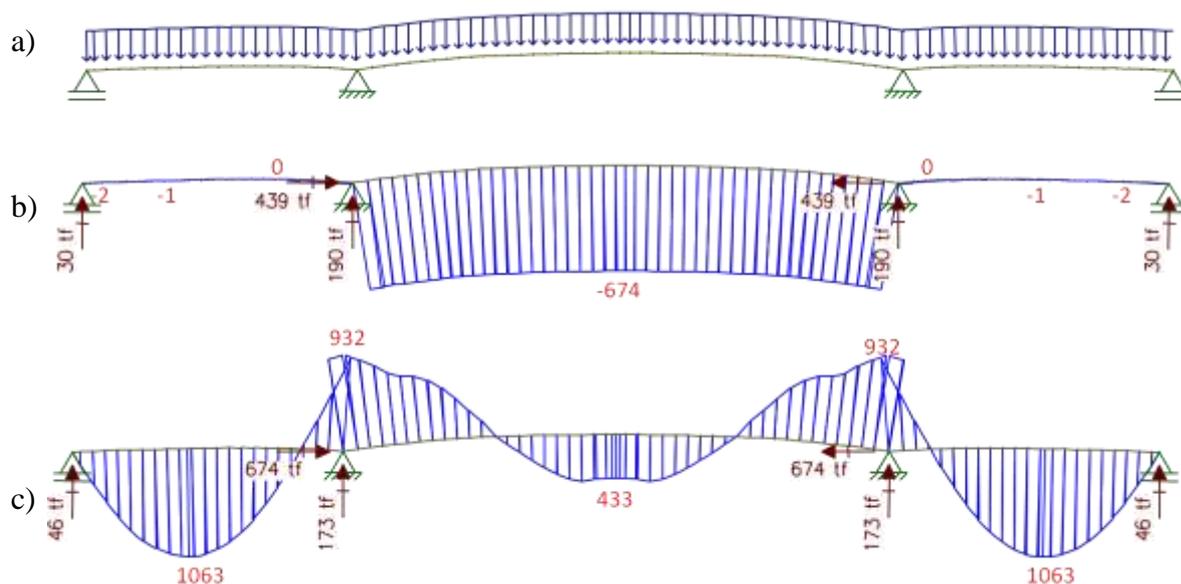


Figura 4.48 – Gráfico dos esforços: a) viga arqueada com carregamento distribuído; b) esforço normal; c) momento fletor. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Outro fator considerado na análise foi que a forma é responsável pela função estrutural, além da tipologia em arcos a dimensão é outro fator da razão da leveza. A inércia atrai momento de flexão, e por isso em nosso estudo colocamos as dimensões originais de projeto. Se o arquiteto é responsável pela forma e dimensão do objeto, ele também é responsável por sua função estrutural.

Com as análises fica dedutível que a além da forma em arco, as dimensões escolhidas por Niemeyer nos encontros dos pilares – com a dimensão de 10 metros de altura – favorece o desempenho estrutural para o vencimento do vão de 200 metros. Com uma dimensão maior nos pilares centrais, o arquiteto aumentou a inércia favorecendo tanto a transposição do vão central quanto a leveza da forma, só sendo possível com a associação ao arco.

Em um pré-dimensionamento básico de altura de vigas utilizamos corriqueiramente a proporção de $l/20$, onde l é o comprimento ou vão que pretendemos vencer. Niemeyer fez uso desse raciocínio e constatou que a altura de uma viga transpondo o vão de 200 metros seria de 10 metros de altura, mas lógico que essa dimensão acarretaria em uma forma desinteressante e monótona. Ao elaborar a forma de sua ponte, Niemeyer demonstra o conhecimento estrutural na associação da inércia com a forma arqueada, favorecendo o design e comportamento estrutural.

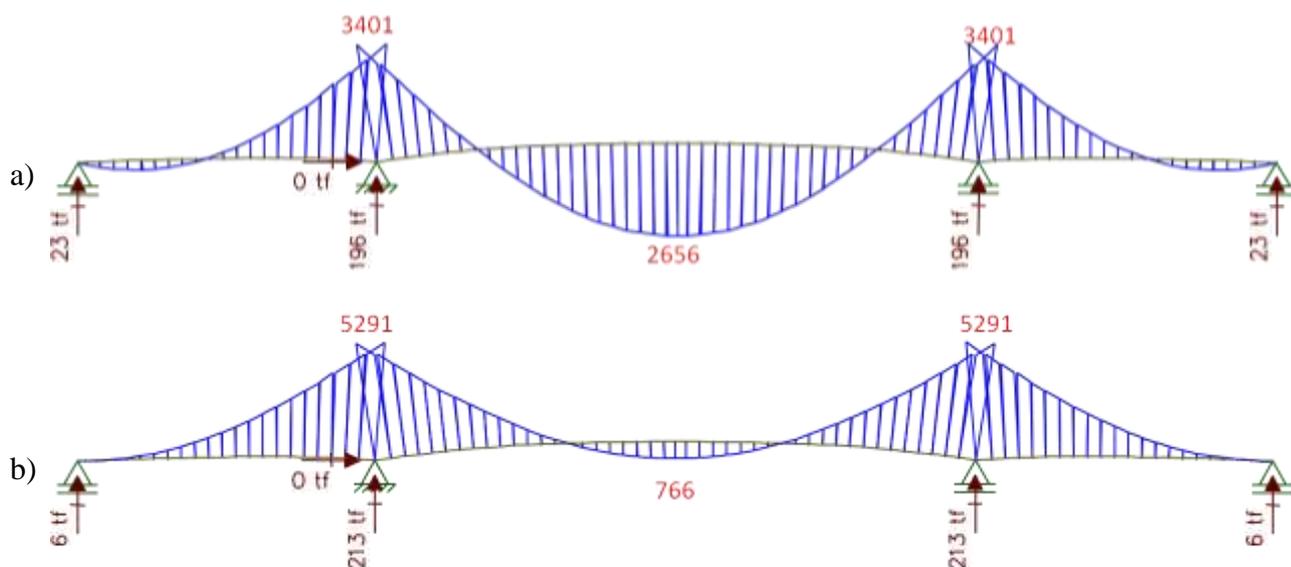


Figura 4.49 – Gráfico dos esforços de momento fletor para a viga arqueada: a) viga com seção única, inércia constante em todos os trechos; b) viga com seção variável, inércia variável conforme dimensões do projeto de Niemeyer. Diferença dos valores dos momentos máximos da viga de inércia constante comparada com a viga de inércia variável. Gráfico realizado pelo autor. Fonte: FTOOL (MARTHA, 2002).

Na comparação de design da ponte de Niemeyer e da Ponte JK (recém construída em 2002) – essa comparação se torna pertinente por ambas se confrontarem sobre o lago Paranoá em Brasília – fica evidente a busca da leveza nos dois projetos. A ponte JK foi projetada pelo arquiteto Alexandre Chan que elegeu o aço como material construtivo. A ponte possui 3 arcos centrais, cada arco possui dois pontos de apoio vencendo um vão de 240 metros cada, o tabuleiro nesse trecho é sustentado por estais presos aos arcos (Figuras 4.50, 4.51 e 4.52).

Na adoção do material o aço se mostra mais racional na busca pela leveza, é um material mais leve se comparado ao concreto, entretanto, do ponto de vista do observador, a ponte de Niemeyer, mesmo utilizando o concreto, se mostra bastante leve se comparada à ponte em aço.

Apesar da Ponte JK possuir um comprimento muito maior que a de Niemeyer – 1200 metros contra 440 metros – os vãos vencidos são muito próximos: o vão de cada arco é de 240 metros contra 220 metros do vão central da Ponte de Niemeyer. A comparação somente desse trecho reflete todo o conhecimento de um arquiteto em busca da leveza. No projeto de Niemeyer, a percepção de leveza torna-se mais evidente mesmo com a

utilização de um material mais pesado como o concreto, nesse momento a experiência se sobrepõe perante as qualidades materiais (Figura 4.53).

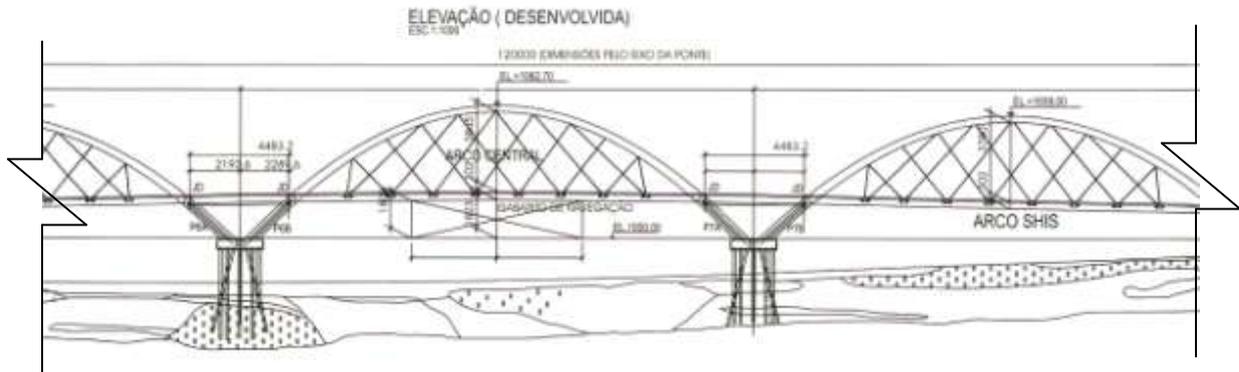


Figura 4.50 – Elevação da Ponte JK, trechos dos arcos com os estais. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).

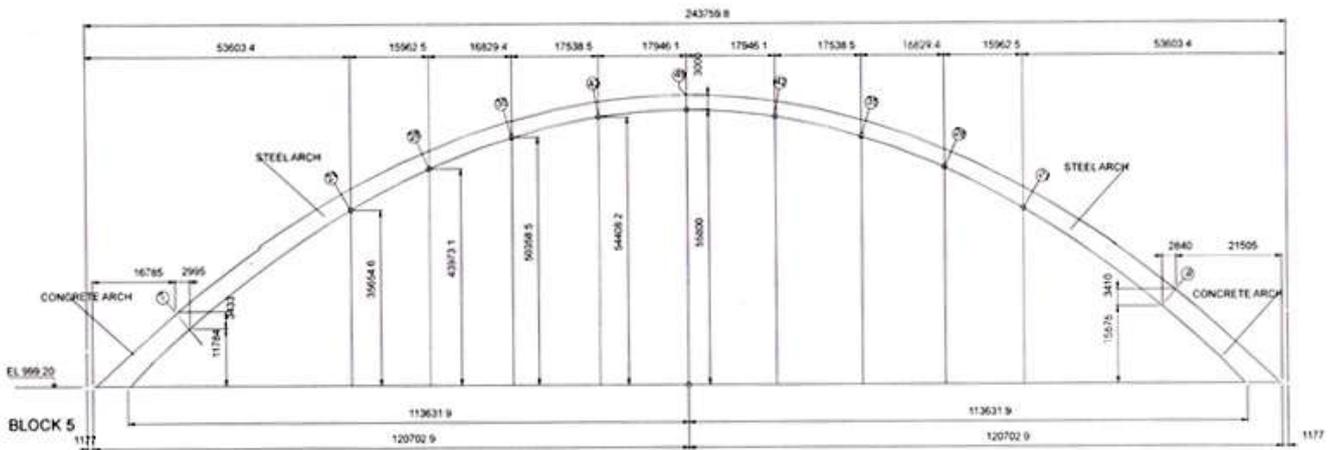


Figura 4.51 – Detalhamento de um dos arcos: vão de 240 metros, altura do arco: nível do lago 55,80 metros, nível do tabuleiro 37,80. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).

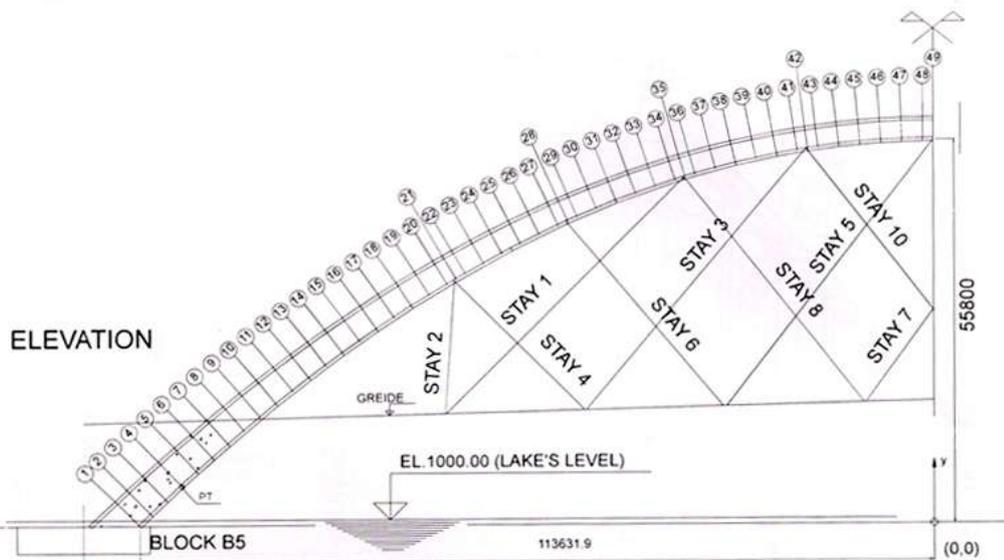


Figura 4.52 – Elevação dos estais. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).

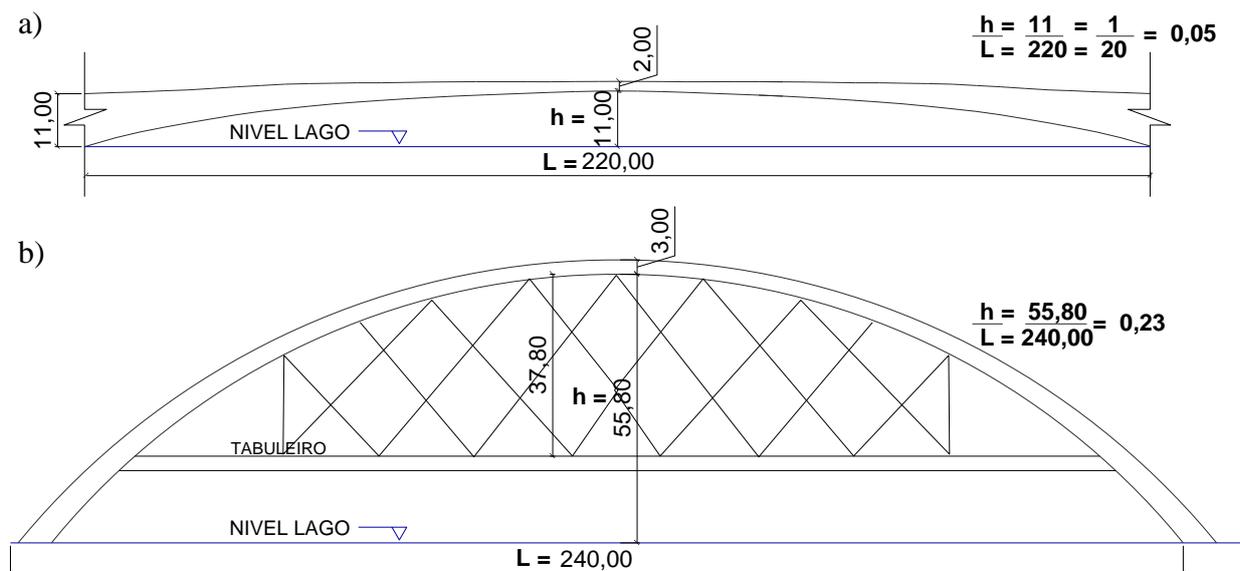


Figura 4.53 – Comparação entre as pontes e a razão dos vãos com as alturas. a) Ponte Costa e Silva; b) Ponte JK. Desenho CAD realizado pelo autor baseado nos projetos originais. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969) e (VIA DRAGADOS, 2002).

Os sistemas construtivos adotados também evidenciam técnicas completamente diferentes: a ponte de Niemeyer foi construída com o sistema de balanços sucessivos e pilares centrais em concreto armado e engastado em tubulões cravados a ar comprimido (Figura 4.54). A ponte JK possui um sistema construtivo com estruturas metálicas auxiliares para sustentação tanto dos tabuleiros quanto dos arcos (Figura 4.55).

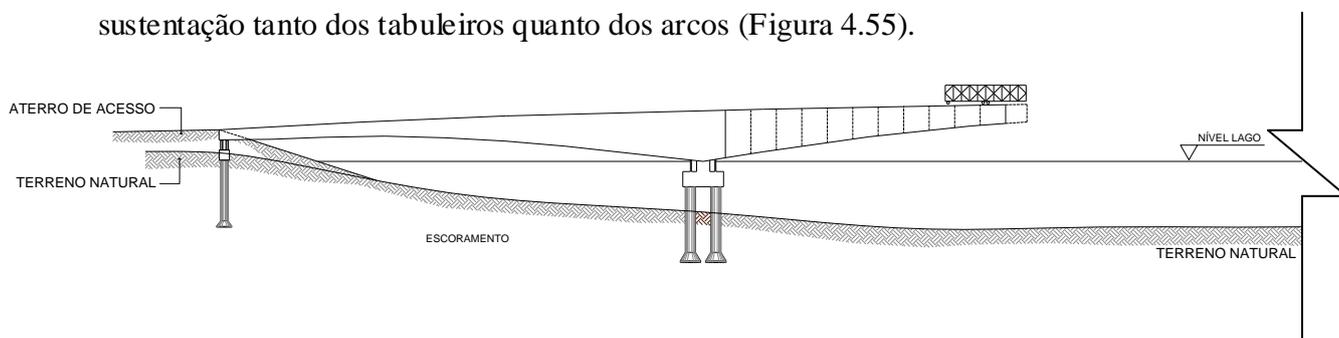


Figura 4.54 – Fase da Construção 03, exemplo da construção em balanço sucessivo, para maior detalhe conferir a Figura 5.9. Fonte: (DE – DVO – NOVACAP, 1969).



Figura 4.55 – Foto do sistema de montagem e construção da Ponte JK. Fonte: (VIA DRAGADOS, 2002).

4.6 - COMENTÁRIOS FINAIS

O estudo pormenorizado de cada parte de um todo, para conhecer melhor sua natureza, suas funções, relações, causas etc. define o que é a análise. Ao realizarmos a análise da forma estrutural da ponte projetada por Oscar Niemeyer em Brasília, buscamos compreender as razões de projetos que permitiram uma obra utilitária possuir características de obra de arte, leveza e beleza.

As análises estéticas são voltadas para a reflexão a respeito da beleza sensível e do fenômeno artístico. As análises estruturais, por sua vez, são voltadas para o entendimento e compreensão dos fenômenos físicos que determinada pode estar sujeita, geralmente realizada por engenheiros e com análises matemáticas. Ao se realizar um exame da forma estrutural de maneira qualitativa, procuramos criar elementos para produzir uma síntese do que realmente interessa para o arquiteto.

Essa síntese pode ser encontrada com a metodologia da análise de uma obra com o programa FTOOL. Esse método demonstra como pode ser possível compreender as razões de leveza que uma forma estrutural confere a uma obra arquitetônica sem especulações estéticas e sim com características técnicas, permitindo que o arquiteto desenvolva projetos mais concisos entre forma e função estrutural.

A metodologia criada para investigar essa obra de Niemeyer nos permite compreender que o arquiteto não produziu uma obra sem preocupações estruturais e plásticas, inclusive é possível afirmar que a qualidade plástica da obra só foi possível em virtude da intenção estrutural proposta no momento de projeto. A admiração que o arquiteto sempre demonstrou pelos seus colaboradores estruturais se mostra refletida na obra arquitetônica analisada. As horas de conversas entre o arquiteto e Joaquim Cardozo, Sussekind e demais engenheiros são refletidas nas obras projetadas.

A metodologia de análise de forma qualitativa é uma síntese do que realmente pode ser esperado dessa ferramenta computacional. Com ela conseguimos fazer o caminho inverso: analisamos obras construídas, entendemos seu comportamento e assim conseguimos mostrar que existe um raciocínio para a criação estrutural.

O raciocínio estrutural aparece de forma intuitiva no método projetual de diversos arquitetos, como Oscar Niemeyer. A ferramenta consegue comprovar a existência desse raciocínio, extinguindo de forma categórica a gratuidade da forma arquitetônica.

5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 - INTRODUÇÃO

A modernidade pode ser entendida como um processo que se iniciou com a renovação científica do século XVII decorrendo em uma mudança na visão de mundo pelo homem e de sua maneira de se expressar. Até hoje em dia esse processo está em curso e um de seus desdobramentos, foi o Modernismo: um movimento estético e cultural do começo do século XX.

No Brasil, o modernismo assumiu características próprias, somando os conceitos e práticas das vanguardas artísticas européias às buscas de reafirmação da identidade nacional, através da valorização do legado colonial barroco e das artes ditas populares (BAHIA, 2006). As medidas implementadas para transformar a imagem do país, e do povo brasileiro, tiveram como uma de suas faces mais visíveis a arquitetura – representação concreta e em larga escala dos valores do que se queria promover (CAVALCANTI, 2006). Ocorreram embates entre as diferentes correntes arquitetônicas significando um confronto mais amplo onde o resultado era a respeito da nação que se desejava construir.

O grupo moderno, de Lucio Costa e Oscar Niemeyer se projetou internacionalmente, identificado como uma imagem de futuro e desenvolvimento ganhando respeito e admiração internamente. Oscar Niemeyer aproveitou esse contexto ideológico e o apoio de Juscelino Kubitschek para realizar um conjunto de obras inovadoras, de grande repercussão internacional para explorar as possibilidades técnicas e plásticas do concreto armado.

Assim como a França buscou na exposição internacional de 1889 o desejo de recapturar seu passado de glória do século XVIII, representado pelas magníficas obras de Gustave Eiffel, a construção nacional viu em Oscar Niemeyer um expoente que poderia evidenciar a vanguarda da arquitetura, engenharia e tecnologia construtiva do concreto armado em nosso país.

O vislumbre da modernidade estava presente nas obras “modernas” de Oscar Niemeyer, e posteriormente, evidenciadas nas obras que demonstravam a grande capacidade da

engenharia nacional: por trás de toda maestria conceitual de sua obra existia uma perplexidade ao se procurar entender como uma obra em concreto armado poderia se apresentar tão leve e esbelta.

Essas características foram primordiais para mostrar um Brasil novo, um país moderno e com vanguarda construtiva. Niemeyer conseguiu exaltar a imagem do engenheiro calculista no Brasil, conferindo à classe, maiores prestígios. Essa co-relação entre as duas profissões permitiu que tanto a arquitetura quanto a engenharia nacional tivessem repercussão internacional. A arquitetura teve seu período de produção heróico, décadas de 1930 a 1960 e a engenharia mostrou grandes expoentes como Emílio Henrique Baumgart (1889-1943) vencendo diversos recordes mundiais com construções em concreto armado sendo seguido por Joaquim Cardozo, entre outros.

Niemeyer é um representante de seu tempo. Sua obra foi influenciada pela busca da modernidade e afirmação do Brasil como uma referência na arquitetura mundial, consecutivamente, foi influenciada posteriormente pela superioridade da engenharia nacional, resultando em obras que demonstravam toda a capacidade técnica de seus estimados colaboradores: os engenheiros calculistas. Esse intercâmbio possibilitou que Niemeyer criasse um método projetual onde a forma arquitetônica pudesse ser influenciada pela função estrutural, e isso se reflete claramente nas análises realizadas nesse trabalho para o projeto de sua ponte em Brasília.

5.2 - FORMA E FUNÇÃO ESTRUTURAL

Nas análises realizadas, conseguimos demonstrar que a forma mais bela da ponte de Niemeyer coincide com a forma mais útil e proveitosa, isto é, seu design fornece condições para resistir perfeitamente aos esforços solicitantes, custando menos e com maiores qualidades estéticas. Possuindo as características inerentes a uma obra da Arte Estrutural.

O conhecimento estrutural de Niemeyer é completamente demonstrado no projeto da Ponte para Brasília. A associação de vãos laterais com dimensões iguais a metade do vão interno exemplificam uma razão que favorece a diminuição da espessura da massa de concreto no vão central – conferindo também maior leveza – os vãos laterais funcionam como uma espécie de tirantes, favorecendo a forma final.

Esse procedimento de Niemeyer pode ser encarado por muitos como um processo formal intuitivo, visando somente à forma mais bela, entretanto, nem sempre a forma mais bela proporciona o melhor desempenho estrutural. A associação da forma mais bela com melhor função estrutural pode ser justificada com a proximidade de Niemeyer com seus engenheiros calculistas, esse assunto se torna repetitivo, mas é pertinente.

Da mesma maneira que a atualidade cercava e influenciava a obra de Niemeyer – o modernismo e a interpretação de modernidade para o Brasil – os debates técnicos também contribuíram para uma melhor qualidade plástica e estrutural de suas obras. Não é possível provar essa afirmação, entretanto, em seus escritos sobre como nasce a sua arquitetura, ele deixa explícito a importância dos técnicos do concreto armado. Sua obra pode ser encarada como uma rua de mão dupla, do mesmo modo que sua arquitetura foi influenciada pelas condições sociais também foi influenciada pelas possibilidades técnicas transmitidas a ele.

Fica mais fácil compreender essa influência de maneira indireta. Nos momentos de descontração com Joaquim Cardozo, Bruno Contarini e José Sussekind era inevitável que não surgissem conversas com grande conteúdo técnico que pudessem influenciar a concepção plástica e estrutural de sua obra, isso pode ser encontrado como um resultado para seu projeto da ponte em Brasília.

No nosso objeto de estudo, o arquiteto demonstra o interesse de manter a razão dos vãos, uma maneira de manter a razão da beleza e a razão estrutural. O ideal estético precedeu e controlou o ideal técnico.

Os vãos selecionados permitem uma obra mais econômica em virtude da profundidade da fundação, quanto mais próxima das margens menos profunda e onerosa será sua edificação. A própria forma adotada, em arcos abatidos, também contribuiu para uma melhor função estrutural. Todos esses fatores conferem uma maior economia.

Com a função estrutural ele confere maior esbeltez e com a função arquitetônica ele confere maior leveza. Para essa obra o arquiteto buscava representar a flutuação da ponte sobre o lago, fazendo inclusive analogia do vôo de um pássaro sobre o Paranoá, isso foi alcançado com a adoção da geometria dos blocos de fundação de maneira recuada. Recuando os blocos de fundação 3,00 metros de cada lado, Niemeyer confere a sensação de flutuação da obra sobre lago, e favorece a percepção de leveza com o encontro de seus vãos arqueados. Todo esse processo garante variação tridimensional a obra.

São poucas as construções contemporâneas em que a solução para o problema estrutural se aproxima tão intimamente da pura expressão plástica, Niemeyer procurou, em grande maioria de sua obra, tirar proveito desse encontro. Com a geometria escolhida para a ponte conseguiu favorecer a economia e também a eficiência, essa refletida nas seções delgadas dos vãos adjacentes e central.

5.3 - CONCLUSÕES

As conclusões são um resultado de uma metodologia de análise da obra construída, o que antes poderíamos colocar como suposições sobre a qualidade estrutural da obra, atualmente pode-se concluir a importância de sua aplicação para o projeto com comprovações científicas calcadas em análises computacionais. A metodologia adotada permite que seja possível fazer uma reflexão com base nos dados obtidos da intenção estrutural por trás do resultado formal. Essas reflexões só são possíveis depois de cumpridas determinadas etapas e processos.

A primeira etapa consiste em um levantamento bibliográfico das relações entre forma arquitetônica e forma estrutural, depois desse levantamento é realizada uma documentação histórica do objeto de análise. Para o nosso objeto de estudo foi realizado um levantamento de fontes primárias com pesquisa dos projetos apresentados pelo arquiteto, as normatizações legais para a sua realização como editais de concorrência, memoriais construtivos, descritivos e de cálculo estrutural. Por se tratar de uma obra pública de grande importância urbana foi realizada uma coleta de dados em jornais da cidade de Brasília, contribuindo para uma melhor verificação dos fatos ocorridos para sua concretização.

A etapa seguinte é marcada pela avaliação qualitativa da ponte utilizando ferramentas computacionais, nesse sistema de análise é possível especular com a forma estrutural adotada e conseguir obter resultados de como foi concebida a concepção estrutural pelo arquiteto e qual a vantagem que se pôde trazer para o objeto em estudo. Todo esse procedimento pode partir de suposições que são confirmadas ou não pelo programa, salvo as análises de desempenho estrutural.

Essa metodologia permite que, além de proporcionar uma análise de uma obra construída, o arquiteto consiga entender o comportamento estrutural de determinadas obras ou

geometrias, podendo engrandecer o seu sistema projetual. Ficou bastante claro que com esse metodologia é possível analisar o método projetual não somente de uma determinada obra, mas também de várias obras de um mesmo arquiteto, podendo, em um futuro, se especular com uma repetição de método projetual estrutural e encontrar um fator típico e determinante.

Outra vantagem que esse processo pode favorecer nos estudos estruturais é a capacidade de experimentação de projeto, ou seja, se o arquiteto determinar a estrutura como elemento principal de partido arquitetônico, o uso dessa ferramenta permite que seja realizado um estudo, ou vários, da obra que se pretende conceber.

Esse processo desencadeia uma série de benefícios onde o arquiteto pode elaborar uma geometria que esteja de melhor acordo com as solicitações estruturais, tirando vantagem tanto na hora de eleger o material construtivo quanto às dimensões propostas. Em suma, o sistema permite que o arquiteto desenvolva um projeto com maiores vantagens construtivas e não apenas um desafio estrutural sem qualidade, concebendo obras que possam se aproximar das qualidades técnico-plásticas das realizadas por Oscar Niemeyer.

5.4 - TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de análise permite um variado campo de atuação, principalmente para o estudo da arquitetura brasileira iniciada pelo movimento moderno. As grandes obras desse período, assim como também seus principais personagens, já possuem distanciamento histórico que permitem uma exploração nesse sentido. Oscar Niemeyer está perto de completar um século de vida, mas seus projetos continuarão perpetuados para as análises históricas com o objetivo de um estudo de sua concepção estrutural, visando à classificação de arte estrutural proposta por Billington.

O estudo da relação entre a obra construída em Brasília e a engenhosidade de Joaquim Cardozo se torna bastante pertinente, nesse sentido, será possível estudar as soluções estruturais encontradas nos Palácios de Brasília e a relação da influencia entre o calculista e as obras de Oscar Niemeyer.

A metodologia permite também, uma maneira de ensino de estruturas para estudantes de arquitetura.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – “**NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**” – 1982.
- ARQUIVO PÚBLICO DO DF. **Fundo Novacap I**. Código Nov. B09. Ano, 1969-1971. Proc. 12610/69. Parte I, Caixa:158. Consultado em março de 2006.
- ARQUIVO PÚBLICO DO DF. **Fundo Novacap II**. Código Nov. B09. Ano, 1969-1971. Proc. 12610/69. Parte II, Caixa:158. Consultado em março de 2006.
- BAHIA, Denise Marques. **Assim caminha a modernidade...** Mínimo Denominador Comum - Revista de Arquitetura e Urbanismo, v. 02, p. 04-07, 2006.
- BENEVOLO, Leonardo. **História da arquitetura moderna**. São Paulo: Perspectiva, 1998.
- BILLINGTON, David P. **The Art of Structural Design: A Swiss Legacy**. E.U.A. New Haven Editors, USA, 2003.
- BILLINGTON, David P. **The tower and the bridge: the new art of structural engineering**. Princeton, Universidade de Princeton, 1983.
- BOGÉA, Marta; LOPES, João Marcos; REBELLO, Yopanan. **Arquiteturas da engenharia, ou, Engenharias da arquitetura**. São Paulo: Mandarim, 2006.
- BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Resistência dos materiais para entender e gostar**. São Paulo: Studio Nobel, 1998.
- BOTEY, Josep M. **Oscar Niemeyer**. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.
- BRUAND, Yves. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, 1999.
- CAVALCANTI, Lauro. **Moderno e brasileiro: a história de uma nova linguagem na arquitetura (1930-60)**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006.
- CHARLESON, Andrew W. **Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers**. Oxford: Elsevier, 2005.
- CHING, Francis D.K. **Arquitetura: forma, espaço e ordem**. São Paulo: Martins Fontes, 1996.
- CORREIO BRAZILIENSE. **A ponte sobre o lago**. Correio Braziliense. Brasília, 21 junho 1969. 2. cad. p.1.

- CORREIO BRAZILIENSE. **O panorama da ponte.** Carlos Pontes. Correio Braziliense. Brasília, 11 jan. 1970. 1. cad. p.2.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Ponte do lago procura compensar o atraso.** Correio Braziliense. Brasília, 25 junho. 1970. 2. cad. p.10.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Problema técnico atrasa término da ponte.** Correio Braziliense. Brasília, 23 ago. 1970. 1. cad. p.1.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Desaba viaduto na GB: mortos e feridos.** Correio Braziliense. Brasília, 21 nov. 1971. 1. cad. p.1.
- CORREIO BRAZILIENSE. **A ponte monumental sobre o lago.** Correio Braziliense. Brasília, 01 fev. 1976. 2. cad. p.25.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Ponte abre para a cidade promissoras perspectivas.** Correio Braziliense. Brasília, 05 fev. 1976. 1. cad. p.10.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Ponte e viadutos já tem transito livre.** Correio Braziliense. Brasília, 07 fev. 1976. 1. cad. p.11.
- CORREIO BRAZILIENSE. **Povo e governo na festa dos viadutos.** Correio Braziliense. Brasília, 07 fev. 1976. Suplemento. p.se-3.
- CORREIO BRAZILIENSE. **A ponte, uma vitória nacional.** Correio Braziliense. Brasília, 12 fev. 1976. 1. cad. p.9.
- CORREIO BRAZILIENSE. **História esquecida nas pontes.** Rovênia Amorim. Correio Braziliense. Brasília, 05 fev. 2006. Caderno Cidades. p.28/29.
- CORONA, Eduardo. **Oscar Niemeyer: uma lição de arquitetura. Apontamentos de uma aula que perdura há 60 anos.** São Paulo: FUPAM, 2001.
- COSTA, Lucio. **Registro de uma vivência.** São Paulo: Empresa das Artes e EDUnB, 1995.
- DETAIL EDITION. **Lehrter Main Station in Berlin.** Munich, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 2005.
- HOLGATE, Alan. **The Art in structural design.** Londres: Oxford University Press, 1986.
- FRAMPTON, Kenneth. **História crítica da arquitetura moderna.** São Paulo: Martins Fontes, 2000.
- FOSTER AND PARTNERS. **Hongkong and Shanghai Bank Headquarters.** Foto atual, elevação sul e seção do edifício. 1986. Disponível em: <http://www.fosterandpartners.com>. Acesso em: 31 out. 2006.

- FUNDAÇÃO OSCAR NIEMEYER. **Pontes projetadas por Oscar Niemeyer.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por rogerpamponet@hotmail.com em 19 de janeiro de 2006.
- GAMA, Ruy. **Tecnologia e o Trabalho na História.** São Paulo: Studio Nobel, 1986.
- GIEDION, Sigfried. **Espaço, tempo e arquitetura. O desenvolvimento de uma nova tradição.** São Paulo: Martins Fontes, 2004.
- GOERDELER, C. D. **A utopia decretada.** São Paulo, Geo-Special: 2000.
- GRAEFF, Edgar Albuquerque. **Arte e Técnica na formação do arquiteto.** São Paulo: Studio Nobel, 1995.
- ISONO, Yoshito. **Fábrica de Papel Sociedade Burgo.** 1995. 1 álbum (2 fot.); color.; 600 x 326 pixels.
- LE CORBUSIER. **Precisões: sobre um estado presente da arquitetura e do urbanismo.** São Paulo: Cosac & Naify, 2004.
- MARTHA, Luiz Fernando. **FTOOL: Um Programa Gráfico-Interativo para ensino de comportamento de estruturas.** Rio de Janeiro: Tecgraf, 2002.
- MARTHA, Luiz Fernando. **Método básico para análise de estruturas.** Disponível para download no endereço: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/~lfm/>. Acesso em: 25 mar. 2007.
- NIEMEYER, Oscar. **Depoimento.** Módulo – Revista de arquitetura e artes plásticas. Rio de Janeiro, n.09, p.3-6, fevereiro 1958.
- NIEMEYER, Oscar. **Sede do Touring Club do Brasil, em Brasília.** Módulo, Rio de Janeiro, v.7, n.30, p.32-4, out. 1962.
- NIEMEYER, Oscar. **Problemas da Arquitetura 3: arquitetura e técnica estrutural.** Módulo – Revista de arquitetura e artes plásticas. Rio de Janeiro, n.52, p. 34-39, dez./jan. 1978/79.
- NIEMEYER, Oscar. **Problemas da Arquitetura 2: o problema estrutural e a arquitetura contemporânea.** Módulo – Revista de arquitetura e artes plásticas. Rio de Janeiro, n.57, p. 94-97, fevereiro 1980.
- NIEMEYER, Oscar. **Meu sócia e eu.** 2. ed. Rio de Janeiro: Revan, 1999.
- NIEMEYER, Oscar. **Conversa de amigos: Correspondência entre Oscar Niemeyer e José Carlos Sussekind.** Rio de Janeiro: Revan, 2002.
- NIEMEYER, Oscar. **Minha Arquitetura 1937-2004.** 4. ed. Rio de Janeiro: Revan, 2004.

- NIEMEYER, Oscar. [**Niemeyer: arquiteto por uma vida, obras para a eternidade**]. Rio de Janeiro, 2007. Entrevista concedida a Jô Santucci para a revista Conselho do CREA-RS em Abril de 2007.
- NOVACAP. DE – DVO – NOVACAP. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Ano 1969-1971. Consultados em abril de 2007.
- NOVACAP. **DE – DVO – NOVACAP**. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Ano 1969-1971. Consultados em abril de 2007.
- NOVACAP. **DE – DVO – NOVACAP**. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Ano 1974-1976. Consultados em abril de 2007.
- PEREIRA, Miguel Alves. **Arquitetura, Texto e Contexto. O discurso de Oscar Niemeyer**. Brasília, UNB, 1997.
- PIC PAMPULHA. **Parque aquático do PIC Pampulha**. Fotos atuais, 2006. Disponível em: <http://www.pic-clube.com.br>. Acesso em: 25 nov. 2006.
- PFEIL, Walter. Pontes: **Curso básico: projeto, construção e manutenção**. Rio de Janeiro: Campus, 1983.
- REBELLO, Yopanan C.P. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.
- SALVADORI, Mario George; HELLER, Robert. **Structure in architecture**. Englewood cliffs: Prentice Hall, N.J., 1975.
- SALVADORI, Mario. **Por que os edifícios ficam de pé: a força da arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 2006.
- SANDAKER, Bjorn Normann. EGGEN, Arne Petter. **The structural basis of architecture**. Nova Iorque: Whitney Editors, 1992.
- SCHREIECK, Diana. **Lehrter Bahnhof, Berlin**. 2004. 1 album (35 fot.); color.; 600 x 326 pixels.
- SIEGEL, Curt. **Formas estructurales en la arquitectura moderna**. Mexico: Continental, 1966.
- SHARP, Dennis. **Historia en imágenes de la arquitectura del siglo XX**. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 1973.
- SORIANO, Humberto Lima. **Estática das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna, 2007
- SOUZA, Abelardo de. **Arquitetura no Brasil**. Depoimentos. São Paulo : Edusp, 1978.

- TAMANINI, Lourenço Fernando. **Memória da Construção, Brasília: A surpreendente história do lago sul e outras histórias exemplares.** Brasília: Royal Court, 1997.
- TEIXEIRA, Kátia Azevedo. **Algumas razões da pesquisa qualitativa.** Integração, São Paulo, p.13-15, 2004.
- TORROJA, Eduardo. **Razón y ser de los tipos estructurales.** Madri: Instituto E. Torroja de la construcción y del cemento, 1976.
- TREMARI, Raúl Gómez. **Diseño estructural simplificado.** Guadalajara: Universidade de Guadalajara, 1993.
- UNDERWOOD, David. **Oscar Niemeyer e o modernismo de formas livres no Brasil.** São Paulo: Cosac & Naif Edições, 2002.
- VASCONCELOS, Carlos Augusto de. **Concreto no Brasil: recordes, realizações, história.** São Paulo: Copiare, 1985.
- VIA DRAGADOS. **JK Bridge: Brasília.** Rio de Janeiro: EducaBem Editora, 2002.
- VIERO, Edison Humberto. **Isostática: passo a passo, sistemas estruturais em engenharia e arquitetura.** Caxias do Sul, RS: Educs, 2004.
- WISSEMBACH, Vicente. **Arquitetura brasileira atual.** São Paulo: Revista projeto, 1981.